



การศึกษามรรณณะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด

STUDY OF THE PERFORMANCE AND POLLUTION
OF SYNTHETIC FUEL GAS PRODUCTION AND COMBUSTION SET
FROM PELLET BIOMASS TO PRODUCE CLEAN HOT GAS

พิษณุ แก้วคุณงาม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การศึกษามรรณณะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

STUDY OF THE PERFORMANCE AND POLLUTION
OF SYNTHETIC FUEL GAS PRODUCTION AND COMBUSTION SET
FROM PELLET BIOMASS TO PRODUCE CLEAN HOT GAS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษามรรณณะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด

ของ

พิษณุ แก้วคุณงาม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน) (รองศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีธรรมวัน) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมภมมงคล)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด
ผู้วิจัย	พิษณุ แก้วคุณงาม
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมมาศ แก้วล้วน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาคภูมิ ศรีมรรณ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด ชีวมวลอัดเม็ดถูกแปรสภาพเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเตาแก๊สซิฟิเคอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นที่มีพื้นที่หน้าตัด 0.073 m^2 จากนั้นถูกเผาเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาดด้วยหัวเผาแบบไซโคลนที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนสามารถดักจับเถ้าลอยและผลิตแก๊สร้อนสะอาดที่ระดับอุณหภูมิสูงได้ ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกถ่ายเทให้กับน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนปล่อยไอเสียทิ้งสู่บรรยากาศ การศึกษาสมรรถนะและมลพิษดำเนินการที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาแก๊สซิฟิเคอร์ที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h ตามลำดับ สอดคล้องกับพลังงานจากชีวมวลอัดเม็ดป้อนเข้าเตาที่ 49, 63 และ 77 kW ตามลำดับ อากาศที่ป้อนเข้าสู่ชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยอากาศ 2 ส่วนแรกใช้สำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และ อีก 2 ส่วนใช้สำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ในขณะที่น้ำซึ่งมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 169-173 kg/h ถูกป้อนเข้าสู่ชุดท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดลองผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h โดยมีอัตราส่วนอากาศผสมมูล (ER) ที่ 0.29 พบว่าอุณหภูมิภายในห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และท่อส่งแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 385-584 °C และ 298-517 °C ตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีค่าความร้อนทางสูงในช่วง 4.13 -4.32 MJ/Nm³ เมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เผาไหม้ในหัวเผาแบบไซโคลนพบว่าอุณหภูมิที่ทางออกจากหัวเผามีค่าอยู่ในช่วง 1098-1292 °C และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนสามารถดักจับเถ้าลอยได้ 14.4– 31.5 g ต่อ 1 kg ของชีวมวลอัดเม็ด ปริมาณของมลพิษในไอเสียแห้งจากผลวิเคราะห์ไอเสียแห้งและฝุ่นละอองที่เจือปนมากับไอเสียจากชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ คือ 10.9 , 14.04 และ 17.04 kg/h ตามลำดับ พบว่าไอเสียแห้งมีองค์ประกอบของ O₂ , CO₂, CO และ NO_x ในช่วง 4.94-6.07%, 13.08-13.77%, 230-880 ppm, และ 391-418 ppm ตามลำดับ และปริมาณฝุ่นละอองที่เจือปนมากับไอเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 40 , 141 และ 146 mg/m³ ตามลำดับ เมื่อทดลองนำแก๊สร้อนสะอาดเข้าสู่เครื่องผลิตไอน้ำพบว่าระบบผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ในช่วงร้อยละ 38.91-47.05

คำสำคัญ : แก๊สซิฟิเคอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น, หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน, ชีวมวลอัดเม็ด

Title	STUDY OF THE PERFORMANCE AND POLLUTION OF SYNTHETIC FUEL GAS PRODUCTION AND COMBUSTION SET FROM PELLET BIOMASS TO PRODUCE CLEAN HOT GAS
Author	PISANU KAEWKUNNGAM
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Sommas Kaewluan
Co Advisor	Assistant Professor Dr. Parkpoom Sriromreun

This thesis studies the performance and the pollution caused by synthetic fuel gas production and a combustion set from pellet biomass in order to produce clean hot gas. The pellet biomass is processed as a synthetic fuel gas for use in an updraft bedding gasifier with a cross-sectional area of 0.073 m^2 . It was then combusted to produce clean hot gas using a developed cyclone furnace. The synthetic fuel gas cyclone furnace can entrap fly ash and produce clean hot gas at a high temperature. The heat from the combustion was transferred to water in a heat exchanger before the exhaust is released into the atmosphere. The study of performance and pollution was conducted at pellet biomass feeding rates of 10.90, 14.04, and 17.04 kg/h in accordance with the energy from the fed pellet biomass of 49, 63, and 77 kW, respectively. The air fed into the synthetic fuel gas production and combustion set is separated into four parts, with the first two parts used to produce the synthetic fuel gas and the other two parts used for combustion. The water flow rate was 169-173 kg/h and fed into the heat exchanger. The results of using fuel feeding rates was 10.90, 14.04, and 17.04 kg/h, with the equivalence ratio (ER) of 0.29, the internal temperature of synthetic gas production chamber and pipe tended to increase from 385 to 584°C and 298 to 517°C, respectively, according to the feeding rate of fuel. The synthetic fuel gas has a high calorific value in the range of 4.13 -4.32 MJ/Nm³. When the fuel gas was combusted in the cyclone furnace, the temperature at the outlet is 1098-1292°C and the cyclone furnace can entrap fly ash of 14.4 – 31.5g per 1 kg of pellet biomass. The amount of dry exhaust pollution based on the dry exhaust and dust contaminated in the exhaust from the synthetic fuel gas production and combustion set were analysed at three pellet biomass feeding rates of 10.9, 14.04, and 17.04 kg/h, respectively. It is found that the dry exhaust had the components of O₂, CO₂, CO, and NO_x with the range of 4.94-6.07%, 13.08-13.77%, 230-880, and 391-418 ppm, respectively. The amount of contaminated dust tends to increase to 40, 141, and 146 mg/m³, respectively. When clean hot gas was fed to a steam generator, the steam generation system has a thermal efficiency of 38.91-47.05%.

Keyword : fixed bed updraft gasifier, Cyclone synthetic fuel gas burner, Pellet biomass

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาช่วยเหลือและความอนุเคราะห์อย่างดียิ่ง จากบุคคลหลายท่าน ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สมมาส แก้วล้วน อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์และ ผศ.ดร. ภาคภูมิ ศรีธรรมรินทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จตุพร แก้วอ่อน และ ผศ.ดร.พิชัย อัมมมมงคล คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนเพิ่มพูนความรู้และประสบการณ์ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้โอกาสในการศึกษา ในหลายสาขาวิชาชีพระและนำไปปฏิบัติจริงเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาประเทศชาติ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน จนเติบโตและสนับสนุนให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดันแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ท้ายที่สุดนี้ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจนำไปศึกษาต่อยอดหรือพัฒนา จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

พิษณุ แก้วคุณงาม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ชีวมวล	4
2.2 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน.....	8
2.3 ปฏิริยาเคมีในการผลิตแก๊ส.....	12
2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	15
2.5 ทฤษฎีการเผาไหม้และการคำนวณการเผาไหม้	19
2.6 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง.....	23
2.7 ชนิดของเตาผลิตแก๊สในปัจจุบัน	26
2.8 การทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง.....	33
2.9 อุปกรณ์ลำเลียงวัสดุ	36

2.10 ค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน	41
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองและวิธีการทดลอง.....	51
3.1 วัตถุประสงค์สำหรับการทดลอง.....	51
3.2 การออกแบบเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น.....	52
3.3 สกรูลำเลียงและโรตารีแอร์ลอคควาล์วป้องกันชีวมวลอัดเม็ด.....	57
3.4 ชุดป้อนอากาศสำหรับชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	59
3.5 หัวเผาแบบไซโคลน.....	60
3.6 ห้องรับเปลวไฟ	61
3.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ	62
3.8 การวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	64
3.9 การวัดองค์ประกอบของแก๊สเสียจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	65
3.10 การวัดฝุ่นละอองจากปล่องไอเสีย	66
3.11 การออกแบบการทดลองของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	66
3.12 การทดลองผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	69
3.13 การทดลองนำความร้อนจากหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์	75
3.14 การประเมินสมรรถนะของเตาแก๊สซีฟิเออร์แบบไหลขึ้น.....	78
3.15 การประเมินอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงและประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน ...	79
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....	80
4.1 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในเตาแก๊สซีฟิเออร์.....	81
4.2 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ออกจากเตาแก๊สซีฟิเออร์	82
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง	83

4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ แห้ง	85
4.5 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	86
4.6 ผลการวิเคราะห์การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	87
4.7 ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละออง	89
4.8 ปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยที่ดักจับได้	89
4.9 ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน	90
4.10 ผลการวิเคราะห์การนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์	92
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	93
5.1 สรุปผลการวิจัย	93
5.2 อภิปรายผล	95
5.3 ข้อเสนอแนะ	97
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก	101
ประวัติผู้เขียน	164

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 คุณสมบัติของของเหลือทิ้งชีวมวล.....	6
ตาราง 2 แสดงลักษณะของกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน	10
ตาราง 3 แสดงสมการปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว	20
ตาราง 4 แสดงสมการปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ	23
ตาราง 5 ลักษณะสมบัติแนะนำในการเผาในเตาแก๊สซิฟายเออร์ของเศษไม้.....	28
ตาราง 6 เตาเชื้อเพลิงแบบ Fixed Bed Gasifier.....	29
ตาราง 7 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและการทำงานของเตาปฏิกรณ์	32
ตาราง 8 ระยะเวลาฐานของไซโคลน	34
ตาราง 9 แพลเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง (F_d)	38
ตาราง 10 แพลเตอร์ใบกังหัน (F_b)	39
ตาราง 11 แพลเตอร์ใบเกลียว (F_f)	39
ตาราง 12 สมบัติวัสดุที่สามารถใช้เกลียวลำเลียงระดับปริมาณการป้อนกลุ่มเกลียวและสัมประสิทธิ์กำลังม้า (F_m)	40
ตาราง 13 แพลเตอร์พายกววน (F_p)	40
ตาราง 14 ประสิทธิภาพการส่งกำลัง (e)	41
ตาราง 15 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด	51
ตาราง 16 รายละเอียดของเซนเซอร์ที่ติดตั้งในเครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas) ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus.....	64
ตาราง 17 อัตราการป้อนอากาศเชิงมวลที่สอดคล้องกับอัตราการป้อนชีวมวล	73
ตาราง 18 การทดลองผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลที่อัตราการป้อนอากาศเชิงปริมาตร.....	74

ตาราง 19 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้.....	91
ตาราง 20 ผลการนำความร้อนจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์.....	92



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบทางเคมี.....	5
ภาพประกอบ 3 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล	12
ภาพประกอบ 4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลงที่ Equivalent Ratio ต่างๆ.....	16
ภาพประกอบ 5 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น	26
ภาพประกอบ 6 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง.....	27
ภาพประกอบ 7 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง	28
ภาพประกอบ 8 เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไธด์เบด (Fluidize Bed Gasifier)	30
ภาพประกอบ 9 เตาผลิตแก๊สฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน (CFB Gasifier).....	30
ภาพประกอบ 10 การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับ	31
ภาพประกอบ 11 การทำงานของไซโคลน	33
ภาพประกอบ 12 ขนาดของไซโคลน	34
ภาพประกอบ 13 การหาค่า N_t	36
ภาพประกอบ 14 องค์ประกอบ Screw Conveyor	36
ภาพประกอบ 15 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดบริษัท ศิริโรจน์รุ่งเรือง.....	51
ภาพประกอบ 16 ขั้นตอนปฏิกิริยาในเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น	55
ภาพประกอบ 17 เตาแก๊สซิไฟเออร์.....	56
ภาพประกอบ 18 กล่องลม	56
ภาพประกอบ 19 ชุดควบคุมอัตราการป้อนของชีวมวลอัดเม็ด.....	57
ภาพประกอบ 20 โรตารีแอร์ล็คควาล์ว	58
ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ในการหมุนของชุดป้อนชีวมวล กับอัตราการป้อนชีวมวล	59

ภาพประกอบ 22 ชุดป้อนอากาศสำหรับชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	60
ภาพประกอบ 23 หัวเผาแบบไฮโดรเจนและ Pilot Burner.....	61
ภาพประกอบ 24 ห้องรับเปลวไฟ	62
ภาพประกอบ 25 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ.....	63
ภาพประกอบ 26 เครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas) ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus	65
ภาพประกอบ 27 เครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียจากปล่องอุตสาหกรรม ยี่ห้อ TESTO รุ่น 350 XL.....	65
ภาพประกอบ 28 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแก๊สไอเสียเพื่อหาปริมาณฝุ่นละออง.....	66
ภาพประกอบ 29 แผนภาพของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ต่อกับห้องรับเปลวไฟ.....	69
ภาพประกอบ 30 ชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่อกับห้องรับเปลวไฟ	74
ภาพประกอบ 31 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	75
ภาพประกอบ 32 การทำงานของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	76
ภาพประกอบ 33 แสดงผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศต่ออุณหภูมิในเตาแก๊สซีไฟเออร์	82
ภาพประกอบ 34 แสดงผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่ 1 และ 2 ต่ออุณหภูมิทางออกจากเตาแก๊สซีไฟเออร์.....	83
ภาพประกอบ 35 แสดงผลการวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง	84
ภาพประกอบ 36 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและอัตราการไหลเชิงปริมาตร ของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง.....	86
ภาพประกอบ 37 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์.....	87
ภาพประกอบ 38 แสดงผลอากาศเผาไหม้และอุณหภูมิเบรินเนอร์.....	88

ภาพประกอบ 39 แสดงผลการวิเคราะห์การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์	88
ภาพประกอบ 40 ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละออง	89
ภาพประกอบ 41 ผลของสภาวะการทำงานของชุดอุปกรณ์ต่อปริมาณเข้าหนัก และเถ้าลอยที่ดัก จับได้	90
ภาพประกอบ 42 ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ	91
ภาพประกอบ 43 ผลการวิเคราะห์การนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก ทำให้รัฐบาลหลายสมัยกำหนดนโยบายในการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ โดยมุ่งพัฒนาพลังงานหมุนเวียน (อริศรา เหล็กคำ 2561) พลังงานทดแทนในอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้คือ พลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นพลังงานที่หลายประเทศให้การยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลาย (พนิตา เจริญสุข 2557) และรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ได้สะดวกคือ แบบเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด หรือเรียกชื่ออื่น ๆ เช่น เชื้อเพลิงแท่งตะเกียบ เชื้อเพลิงไม้อัดเม็ด เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรกลับมาใช้ประโยชน์และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง เนื่องจากไม่มีการเผาวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตเพื่อจะเตรียมการเพาะปลูกในครั้งต่อไป ซึ่งเห่ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ฟางข้าว เศษหญ้า เศษไม้ที่เหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวและตัดแต่งต้นไม้ ชี้เลื่อยที่ได้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งนำมาผลิตเป็นชีวมวลอัดเม็ดที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ง่ายและมีการใช้ประโยชน์ได้ในหลายรูปแบบโดยเฉพาะในรูปของพลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสามารถนำไปใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ผลิตไอน้ำ หรือใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบหม้อต้มไอน้ำ (boiler) เป็นต้น รวมถึงการให้ความร้อนกับที่อยู่อาศัย ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุที่เหลือทิ้งจากการเกษตร การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงราคาแพงในภาคอุตสาหกรรม เช่น การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทดแทนน้ำมันเตา ทดแทนแก๊สธรรมชาติ ทดแทนแก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือทดแทนน้ำมันดีเซล มีทั้งข้อดีและข้อด้อย โดยข้อดีคือช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานเชื้อเพลิง ในขณะที่ข้อด้อยที่พบเช่น ความซับซ้อนของอุปกรณ์เผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ฝุ่นคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้ และถูกพ่นออกจากหัวเผาพร้อมกับเถ้าเข้าสู่อุปกรณ์ใช้ความร้อนและปลดปล่อยสู่บรรยากาศ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้มีแก๊สมลพิษเกินเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด การดับของเหลวไฟที่หัวเผา และการระเบิดของแก๊สที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในอุปกรณ์ใช้ความร้อน อุณหภูมิเปลวไฟต่ำเกินไป เพื่อขจัดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจึงได้มีการพัฒนาชุดหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไฮโดรเจนที่ทำงานร่วมกับแก๊สซีพีเออร์เพื่อลดข้อด้อยจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทดแทนเชื้อเพลิงที่มีราคาแพงแต่การเผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในเตาเผาแบบเผาตรงยังมีข้อจำกัดในการใช้ประโยชน์ เช่นไม่สามารถใช้ทดแทนหัวเผาเชื้อเพลิงแก๊ส

หรือหัวเผาเชื้อเพลิงเหลวได้ อีกทั้งยังไม่สามารถควบคุมให้เกิดความสม่ำเสมอของการเผาไหม้และอุณหภูมิจากการเผาไหม้ได้ รวมทั้งการเผาไหม้ชีวมวลอัดเม็ดโดยตรงยังมีการปลดปล่อยฝุ่นละอองตามมากับกระแสแก๊สร้อนในอัตราสูงซึ่งแก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลอัดเม็ดให้เป็นพลังงานในรูปแก๊สเชื้อเพลิงโดยกระบวนการ ทางเคมีซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะจำกัดปริมาณอากาศ ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเตาแก๊สซิฟายเออร์มีให้เลือกหลากหลายชนิดด้วยกัน ทั้งในด้านประสิทธิภาพการทำงาน คุณภาพแก๊สที่ต้องการ ดังนั้น ระบบแก๊สซิฟิเคชันจึงเป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการนำแก๊สเชื้อเพลิงไปใช้เพื่อผลิตพลังงานเพื่อให้ความร้อน ซึ่งจะนำไปสู่ การได้รับเทคนิคและวิธีการใหม่ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานจากชีวมวล ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาจะสามารถชี้วัดความเหมาะสมในการนำเทคโนโลยีไปใช้งานในอนาคต อันจะก่อให้เกิดประโยชน์ อย่างไรก็ตามการแปรสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ก่อน นำไปเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดปัญหาด้านมลพิษจากการเผาไหม้ ที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มโอกาสในการใช้ประโยชน์ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทดแทนเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแก๊สในภาคอุตสาหกรรม แต่การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลยังปัญหาเรื่องความสะอาดของแก๊สที่ต้องมีการติดตั้งระบบทำความสะอาดแก๊สต่อจากระบบผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทำให้มีความซับซ้อนในการนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นการออกแบบและสร้างระบบผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่มีระบบทำความสะอาดแก๊สภายในหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว การประเมินสมรรถนะของเตาแก๊สซิฟายเออร์ที่ นั้นจะพิจารณาจาก ประสิทธิภาพความร้อนระบบแก๊สซิฟายเออร์คืออัตราส่วนของพลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ระบบผลิตได้ต่อพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ป้อนให้กับระบบผลิตแก๊ส

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด และการพัฒนาระบบผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสำหรับเป็นแหล่งพลังงานความร้อนทดแทนเชื้อเพลิงที่มีราคาแพง โดยศึกษาการทำงานของหัวเผาตามภาระความร้อน ด้วยชุดหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนที่ทำงานร่วมกับแก๊สซิฟายเออร์ขนาด 80 kWth โดยเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ใช้แก๊สซิฟายเออร์แบบเบดนิ่งอากาศไหลขึ้นและเชื่อมต่อกับหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนที่มีอัตราการป้อนพลังงานจากชีวมวลเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์ที่ 3 ระดับตามค่าอัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (specific gasification rate, SGR)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อออกแบบเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น และสร้างหัวเผาแก๊สจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตและเผาแก๊สจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดร่วมกับระบบผลิตแก๊สร้อนสะอาด

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของแก๊สจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ภาวะความร้อน ต่ำ, ปานกลาง และสูง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8-10 mm ความยาวไม่เกิน 50 mm ที่อัตราการป้อนไม่เกิน 40 kg / hr

1.3.2 ศึกษาสมรรถนะของหัวเผาที่ภาวะความร้อน ต่ำ, ปานกลาง และสูง

1.3.3 ตรวจวัดอุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊สไอเสียหลังจากเผาไหม้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ค่าสมรรถนะของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

1.4.2 สามารถรู้และเข้าใจตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

1.4.3 สามารถควบคุมสภาวะการเผาไหม้ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานของกรมโรงงาน

1.4.4 สามารถสร้างความรู้ความเข้าใจให้แก่ผู้ที่ศึกษาต่อตลอดจนผู้ที่สนใจโครงการเพื่อต่อยอด

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบสมรรถนะหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต้องอาศัยหลักการและทฤษฎีต่างๆ ประกอบการพิจารณาคำนวณออกแบบ และการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองของอุปกรณ์หัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด โดยทฤษฎีที่ใช้ประกอบการทำโครงการมีดังนี้

1. ชีวมวล
2. กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน
3. ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตแก๊ส
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง
5. ทฤษฎีการเผาไหม้และการคำนวณการเผาไหม้
6. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
7. ชนิดของเตาผลิตแก๊สในปัจจุบัน
8. การทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง
9. อุปกรณ์ลำเลียงวัสดุ
10. ค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน
11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง วัสดุหรือเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ชีวมวลจึงนับรวมถึงวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ มูลสัตว์ และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิลมีที่มาจากแหล่งเดียวกัน คือพืชและสัตว์ แต่มีความแตกต่างกันที่เวลา นั่นคือการเกิดเชื้อเพลิงฟอสซิลต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนานในการแปรสภาพซากพืชซากสัตว์ ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่ต่างกัน จึงไม่ถือว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นชีวมวล

2.1.1 แหล่งที่มาของชีวมวล

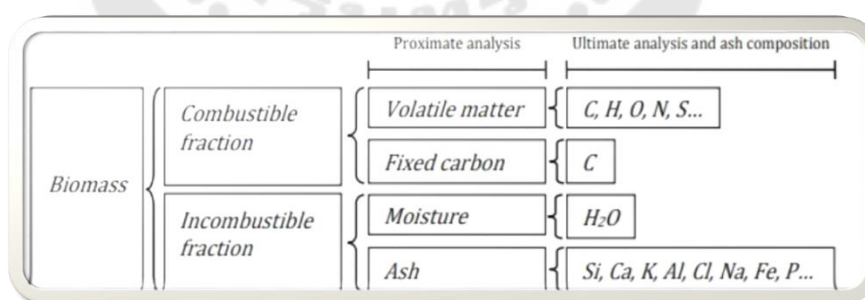
ชีวมวลประกอบด้วยวัสดุหลายประเภทแต่มักจะหมายถึงวัสดุจากพืชเป็นหลัก เช่น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้จากการทาสงไม้ หรือแปรรูปไม้ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ และสามารถจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

2.1.1.1 เศษไม้ (Wood Residues) เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่อยู่ในรูปของแข็งที่เกิดขึ้นมากในอุตสาหกรรมป่าไม้ ซึ่งส่วนใหญ่ต้องการใช้เพียงแค่ส่วนของลำต้นหรือเนื้อไม้ ส่วนที่เหลือ คือ ใบและกิ่งก้านต่างๆ รวมถึงขี้เลื่อยจากกระบวนการแปรรูปไม้ที่ไม่สามารถนำมาใช้ตามวัตถุประสงค์สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้

2.1.1.2 เศษพืชผลทางการเกษตร (Agricultural Wastes) เป็นเศษวัสดุต่างๆ ที่เกิดจากพืชผลทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และเศษผัก เป็นต้น เศษวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มีจำนวนมาก และสามารถนำมาผลิตพลังงานได้เช่นกัน

2.1.1.3 สิ่งปฏิกูลจากสัตว์ (Animal Wastes) สิ่งปฏิกูลจากสัตว์มีปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากการเลี้ยงสัตว์ในลักษณะเป็นฟาร์ม การรวบรวมสิ่งปฏิกูลได้มากพอจะสามารถผลิตเป็นพลังงานได้

2.1.1.4 ของเหลือใช้จากชุมชน (Municipal Wastes) หรืออาจเรียกว่าขยะชุมชน เป็นผลจากการบริโภคของมนุษย์ที่มีการทิ้งของที่เหลือใช้ในสภาพขยะ ซึ่งในเมืองใหญ่หรือในที่มีปริมาณประชากรหนาแน่นจะยังมีปริมาณของเหลือทิ้งชนิดนี้มาก



ภาพประกอบ 1 องค์ประกอบทางเคมี

ที่มา Propensity of bed materials used in dual fluidized beds to retain ash-forming elements from biomass fuels

ตาราง 1 คุณสมบัติของของเหลือทิ้งชีวมวล

คุณสมบัติของเหลือทิ้งชีวมวล											
ชื่อตัวอย่าง	Properties (As received basis)										
	Proximate Analysis (%)				Ultimate Analysis (%)					HHV (kcal/kg)	LHV (kcal/kg)
	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	Sulfur	Oxygen		
ยอดและใบอ้อย	61.778	27.44	6.986	3.796	16.916	9.024	0.155	0.066	70.042	1,580	1,460
เหล้ามันสำปะหลัง	60.693	28.623	8.834	1.85	19.551	9.274	0.375	0.013	69	1,630	1,490
กระถินยักษ์	29.105	53.928	16.429	0.538	36.298	7.502	0.178	0	55.484	3,160	2,910
หญ้าเนเปียร์	86.917	8.497	2.714	1.863	5.58	10.241	0.102	0.003	82.211	550	450
ผักตบชวา	92.523	5.207	1.208	1.062	2.926	10.686	0.151	0.006	85.17	280	250
อูปลูซี่	72.392	20.699	4.47	2.439	12.64	9.689	0.175	0.039	75.018	1,180	1,100
ซังข้าวโพด	13.268	65.625	19.217	1.889	41.097	6.917	0.754	0.009	49.333	3,720	3,420
ต้นข้าวโพด	14.582	58.398	18.008	9.011	35.832	6.553	1.517	0.038	47.048	3,380	3,090
เปลือกข้าวโพด	13.527	65.559	18.636	2.278	38.664	6.853	0.663	0	51.542	3,570	3,280
ต้นอ้อ	58.131	31.997	8.458	1.413	20.783	9.071	0.596	0.024	68.112	1,860	1,710
ฟางข้าวสด	64.036	25.397	4.96	5.607	15.042	9.191	0.726	0.02	69.414	1,420	1,300
ตอซังข้าว	39.29	36.239	7.971	16.5	21.323	7.378	0.259	0.023	54.518	1,950	1,790
แกลบ	16.552	49.39	16.97	17.088	32.033	6.007	1.271	0	43.6	3,030	2,780
อ้อยสด	64.926	25.418	6.243	3.413	15.326	9.228	0.158	0.037	71.838	1,430	1,320
ทางมะพร้าวสด	68.767	22.854	5.962	2.418	13.665	9.531	0	0	74.387	1,220	1,120
ทางปาล์มน้ำมันและใบ	56.645	31.231	8.729	3.395	20.557	8.834	0.077	0	67.137	1,840	1,710
ทะลายปาล์มสด	22.344	62.425	12.964	2.267	38.276	7.897	0.376	0	51.185	3,810	3,530
ไม้เบญจพรรณ	34.498	45.443	19.306	0.752	36.02	7.603	0.57	0	55.467	3,110	2,880
ปลายไม้กระถินยักษ์	48.03	38.221	11.882	1.866	25.523	8.495	0.435	0.032	63.649	2,270	2,100
ซีเลื่อยสัก	19.184	62.726	16.862	1.228	42.834	7.364	0.265	0	48.309	3,900	3,620
ปีกไม้ยางพารา	43.401	39.633	12.209	4.757	27.57	8.129	0.281	0	59.263	2,480	2,300
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	60.373	27.427	7.426	4.775	17.326	8.736	0.173	0	68.991	1,480	1,370

2.1.2 การเก็บรักษาเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล

การเก็บรักษาชีวมวลให้ได้คุณภาพนั้นอาจมีความยุ่งยากและมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการให้คงที่ตลอดปี ข้อจำกัดประการหนึ่ง คือ ชีวมวลต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษานานกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลหากเทียบกับปริมาณพลังงานความร้อนที่เท่ากัน หรือก็คือการเก็บไม้พืนต้องใช้พื้นที่มากกว่าน้ำมันเตา ดังนั้น ในการพัฒนาระบบการจัดเก็บและการขนส่งจึงมีความสำคัญหากพื้นที่สำหรับการก่อสร้างมีราคาสูง

การเก็บรักษาชีวมวลและการเตรียมเชื้อเพลิงให้เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน รวมถึงการคัดแยกสิ่งเจือปน การลดความชื้นและการเตรียมขนาดให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นส่วนสำคัญที่จะช่วยควบคุมประสิทธิภาพของระบบและคุณภาพของก๊าซที่ผลิตได้ หากเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้มีคุณภาพดีจะส่งผลให้การทำงานของระบบแก๊สซิฟิเคชันมีความเสถียรและทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสม่ำเสมอ หลักการเก็บรักษาเชื้อเพลิงที่เหมาะสมควรเก็บแยกจากบริเวณที่ติดตั้งเตาแก๊สซิฟายเออร์ เนื่องจากชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอย่างดีและสามารถสะสมความร้อนและเกิดการลุกติดไฟได้ พื้นที่กองเก็บชีวมวลควรเป็นบริเวณพื้นที่มีหลังคาและเป็นพื้นที่ปิดเพื่อป้องกันความชื้นและฝุ่นละอองที่อาจฟุ้งกระจายรวมทั้งกลิ่นเหม็นที่ก่อให้เกิดความรำคาญหรืออันตรายต่อการทำงานโดยรอบ นอกจากนี้ ขนาดของสถานที่เก็บรักษาเชื้อเพลิงควรรองรับปริมาณเชื้อเพลิงได้เพียงพอต่อการดำเนินงานอย่างน้อย 2-3 วัน

2.1.3 การเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล

เชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในระบบแก๊สซิฟิเคชันจะมีความเฉพาะตัวอย่างมากหากเทียบกับระบบเผาไหม้โดยตรง และในแต่ละระบบของเตาแก๊สซิฟายเออร์จะมีการออกแบบให้สามารถรองรับเชื้อเพลิงที่ต่างกัน ปัจจัยทางกายภาพและเคมีที่เป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดความเหมาะสมของชีวมวล ได้แก่ ขนาดรูปร่าง การกระจายตัว ความหนาแน่น ความชื้น ปริมาณความร้อน สารระเหย องค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น

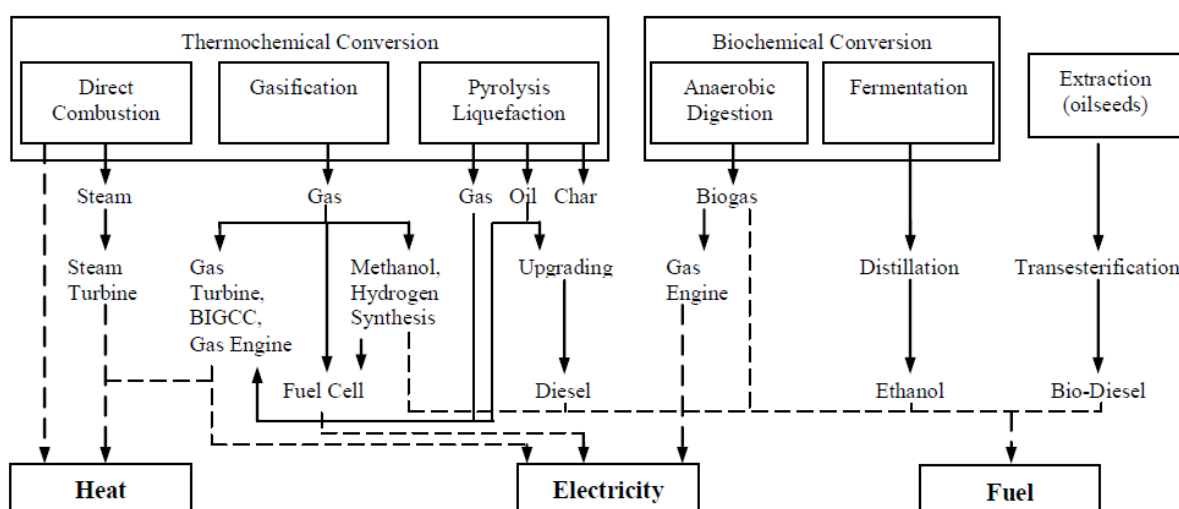
หลักการเตรียมชีวมวลให้เหมาะสมสำหรับเตาแก๊สซิฟายเออร์ มีดังนี้

1. การคัดแยกสิ่งเจือปน: การคัดแยกเศษหิน ดิน ทราวย ที่ปะปนมากับวัสดุทางการเกษตร
2. การลดขนาด: การบดหรือสับเพื่อให้ชีวมวลได้ขนาดตามต้องการ เช่น ไม้พืน
3. การทำให้แห้งหรือการลดความชื้น: เพื่อให้ชีวมวลมีค่าความชื้นอยู่ในระดับเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยทั่วไปค่าความชื้นที่เหมาะสมควรมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 20-30

4. การอัดแท่งหรืออัดก้อนชีวมวล: ใช้สำหรับกรณีที่ชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำ เช่น ขี้เลื่อย ชานอ้อย ฟางข้าว ตะกอนสลัดจ์ เป็นต้น

2.2 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน

การนำชีวมวลประเภทต่างๆ มาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานนั้นมีหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งแยกกระบวนการออกเป็นหมวดหมู่ ตามลักษณะวิธีการแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงานได้ 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการสกัด กระบวนการทางเคมีความร้อน และกระบวนการทางชีวเคมี ดังภาพประกอบ 2 ในแต่ละกระบวนการมีวิธีการและเทคนิคการเปลี่ยนรูปที่ต่างกัน ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแตกต่างกันด้วย โดยกระบวนการสกัดผลที่ได้คือ น้ำมันเพื่อนำมาผ่านกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน เพื่อให้ได้ไบโอดีเซล ส่วนกระบวนการทางเคมีความร้อนผลที่ได้คือ แก๊สสังเคราะห์ เชื้อเพลิง น้ำมันจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) หรือความร้อนจากการเผาไหม้ และกระบวนการทางชีวเคมี ผลที่ได้คือ แอลกอฮอล์ หรือแก๊สชีวภาพ ซึ่งเกิดจากการหมักด้วยวิธีที่แตกต่างกันไป



ภาพประกอบ 2 แผนผังการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานโดยวิธีต่างๆ

2.2.1 กระบวนการสกัด

กระบวนการสกัดน้ำมัน (Extraction) เมล็ดหรือผลของพืชบางชนิด เช่น ถั่วลิสง ถั่วเหลือง เมล็ดงุ่น เมล็ดยางพารา มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน สามารถเอามาสกัดเอาน้ำมันที่เรียกว่า น้ำมันพืช แต่การที่จะเอาน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจะต้องทำให้บริสุทธิ์ก่อน โดยการแยกหรือกำจัดส่วนประกอบจำพวกไขมันอิสระ และสิ่งเจือปนต่างๆ ซึ่งวิธีการสกัดน้ำมันพืชจะขึ้นกับชนิดและปริมาณน้ำมันของพืชเหล่านั้น โดยทั่วไปใช้กันอยู่ 2 วิธี

2.2.1.1 การสกัดด้วยการบีบอัด (Pressing) ใช้สำหรับพืชที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบมากกว่า 25 % เช่น ถั่วลิสง มะพร้าว ปาล์มน้ำมัน เมล็ดละหุ่ง โดยการบีบอัดน้ำมันออกมาจากเมล็ดหรือผลของพืชนั้น ด้วยเครื่องสกัดแบบอัดเกลียว (Screw Press)

2.2.1.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) ใช้สำหรับพืชที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า 25 % เช่น ถั่วเหลือง เมล็ดงุ่น ราชำว เมล็ดฝ้าย โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เฮกเซน สกัดน้ำมันออกมาจากเมล็ดพืชเหล่านี้ในเครื่องสกัด

2.2.2 กระบวนการทางเคมีความร้อน

การเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานโดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนทำให้โครงสร้างทางเคมีของชีวมวลเปลี่ยนไปเป็นพลังงานตามความต้องการ โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ

2.2.2.1 การเผาไหม้ (Combustion) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของสารที่ติดไฟได้ กับออกซิเจนซึ่งในการเผาไหม้จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน และแสงสว่าง โดยในการเกิดปฏิกิริยาจะใช้ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณที่มากเกินไป ในการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิมากกว่า 900°C สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลคือ ความชื้นที่มีอยู่ใน ชีวมวล เพราะในการเผาไหม้จะต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งในการระเหยความชื้นออกจากชีวมวล ให้หมดก่อน จากนั้น ชีวมวลที่ถูกเผาไหม้จึงสามารถให้พลังงานออกมาได้

2.2.2.2 การแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) เป็นกระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวลโดยการเผาไหม้ชีวมวลในที่จำกัดปริมาณอากาศหรือออกซิเจน (Partial Combustion) หรือการใช้ ออกซิเจนบางส่วนในการทำปฏิกิริยา (ประมาณร้อยละ 30 ของปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้) โดยกระบวนการจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ $600 - 900^{\circ}\text{C}$ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้จะประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เป็นหลัก ซึ่งถือว่าเป็นแก๊สที่ให้พลังงานได้ โดยสามารถนำแก๊สที่ได้ไปเผาให้ความร้อนโดยตรง หรือทำให้ควบแน่นแล้วนำไปกลั่นเป็นเมทา

นอล นอกจากนี้ยังสามารถนำแก๊สนี้ไปแยกองค์ประกอบแล้วใช้ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติของแก๊สแต่ละชนิด

2.2.2.3 การย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นการสลายพันธะเคมีของวัสดุชีวมวลด้วยความร้อนโดยไม่พึ่งพาออกซิเจน หรืออากาศในการทำปฏิกิริยาโดยเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-600 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ เช่น การทำถ่าน ผลที่ได้จากกระบวนการนี้ประกอบด้วยของแข็ง 30-50 % ของเหลว 18-20 % และแก๊ส 20-30 % ปริมาณผลผลิตแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเงื่อนไขของอัตราการให้ความร้อน เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิสูงสุด ดังตารางที่ 2

ตาราง 2 แสดงลักษณะของกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน

Type	Residence Time	Heating Rate (°C/s)	Max Temperature (°C/s)	Major Product
Slow Pyrolysis	hrs-day	Very low	400	Solid (Carbon)
	5-30 min	<10	600	Solid, Liquid and Gas
Fast Pyrolysis	0.5-5 sec	10-100	600-650	Solid, Liquid and Gas
Flash Pyrolysis	<0.5 sec	>100 or 1000	1000	Gas

2.2.3 กระบวนการทางชีวเคมี

การเปลี่ยนรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานโดยกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical Conversion) เป็นการใช้ประโยชน์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองรูปแบบ คือ

2.2.3.1 กระบวนการหมักในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) พลังงานในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเรียกว่า แก๊สชีวภาพ (Biogas) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญเป็น

แก๊สมีเทน 40-60 % แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 30-40 % และแก๊สอื่นๆ 2-3 % มีค่าความร้อนประมาณ 19-22 MJ/m³

2.2.3.2 การหมักผลิตแอลกอฮอล์ หรือการผลิตเอทานอล (Ethanol Fermentation) การเปลี่ยนรูป ชีวมวลประเภทคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ หรือยีสต์เป็นตัวทำปฏิกิริยาย่อยสลาย ปกติมีแอลกอฮอล์ประกอบประมาณ 11-14 % โดยปริมาตร เมื่อนำไปกลั่นจะได้แอลกอฮอล์เข้มข้นสูงกว่า 90 % นำไปเป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบทางเคมีได้ มีค่าความร้อนประมาณ 23.54 MJ/L

2.2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวลเกิดขึ้นในภาชนะปิดเรียกว่า เตาผลิตแก๊ส (Gasifier) โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ในภาวะที่จำกัดปริมาณออกซิเจน (Partial Oxidation) กระบวนการผลิตแก๊สเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบ Heterogeneous คือสารที่มี 2 สภาวะมาทำปฏิกิริยากัน เช่นการผลิตแก๊สจากเชื้อเพลิงแกลบ (ของแข็งกับแก๊ส) โดยการผลิตแก๊สจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) สามารถแบ่งตามตัวกลางที่ใช้ทำปฏิกิริยา และขั้นตอนในการเผาไหม้ ออกได้เป็น 4 ชนิด

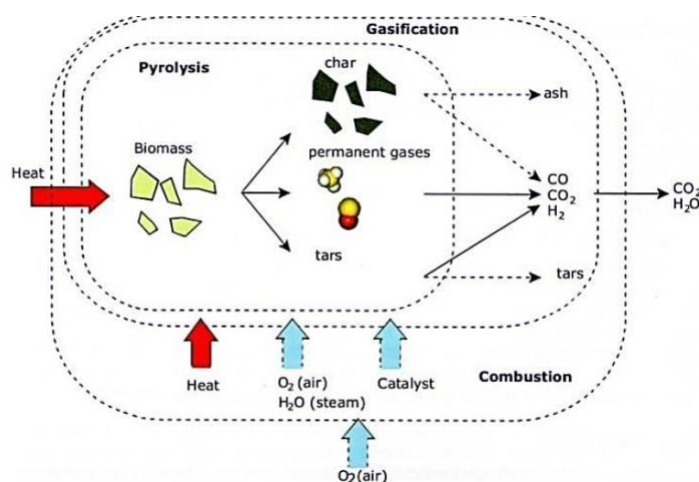
2.2.4.1 Air-Blown Gasification กระบวนการชนิดนี้เกิดขึ้นโดยใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในชั้นเผาไหม้ ได้รับความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วถูกส่งต่อไปเพื่อผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะได้แก๊สที่ค่าความร้อนไม่สูงนักเนื่องจากมีไนโตรเจนที่อยู่ในอากาศเป็นองค์ประกอบอยู่ในแก๊สเชื้อเพลิง 70 % และแก๊สที่ให้พลังงานคือคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน รวมถึงสารระเหยต่างๆ รวมกันประมาณ 30 %

2.2.4.2 Oxidative Gasification ลักษณะของปฏิกิริยาการเกิดแก๊สชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ แทนอากาศซึ่งทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง เพราะไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในแก๊สเชื้อเพลิงการควบคุมกระบวนการเผาไหม้สามารถทำได้ดีกว่า แต่ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาของออกซิเจนบริสุทธิ์มีราคาสูง

2.2.4.3 Steam Gasification ในกระบวนการนี้ใช้น้ำเข้าช่วยทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง ซึ่งจะช่วยให้ค่าความร้อนให้กับแก๊สเชื้อเพลิง โดยเป็นการเพิ่มไฮโดรเจน แต่อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาจะต้องสูงซึ่งไม่ควรต่ำกว่า 800 °C จึงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้

2.2.4.4 Hydrogen Gasification เป็นกระบวนการที่ใช้ไฮโดรเจนแทนอากาศทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงโดยไม่มีการใช้อากาศหรือออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา ปกติจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่

อุณหภูมิประมาณ 750 °C และภายใต้ความดันที่สูง 20 MPa โดยแก๊สที่ได้ประกอบด้วยมีเทนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการนี้จะสร้างขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิง (Synthetic Fuel) และเชื้อเพลิงที่นิยมนำมาใช้ผลิตแก๊สคือ ถ่านหินเนื่องจากมีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์



ภาพประกอบ 2 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล

2.3 ปฏิริยาเคมีในการผลิตแก๊ส

ปฏิริยาในการผลิตแก๊สโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็นชั้นที่สำคัญได้ 4 ชั้นซึ่งสามารถแบ่งได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิ ปฏิริยาที่เกิดขึ้น และผลผลิตที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น โดยที่ความเป็นจริงแต่ละชั้นอาจอยู่เลื่อมล้ำกัน (Overlap) กันอยู่ก็ได้

2.3.1 ชั้นการเผาไหม้ (Hearth Zone or Combustion Zone)

ในบริเวณชั้นนี้เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับออกซิเจนทำปฏิริยาเคมีกัน โดยที่คาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงจะเผาไหม้กับออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำดังสมการที่ 2.1 และ 2.2



ปฏิกิริยาในชั้นการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction) อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ระหว่าง 900-1300 °C โดยความร้อนที่ได้ในชั้นนี้ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) และชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) ผลพลอยได้ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในชั้นนี้ คือ ความร้อน และซีเก๊า

2.3.2 ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone)

ชั้นรีดักชัน หรือชั้นปฏิกิริยาก่อนเกิดแก๊ส เชื้อเพลิง เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาที่ทำให้ได้แก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไอน้ำ (H₂O) ที่ได้จากชั้นการเผาไหม้ จะไหลเข้าสู่ชั้นนี้ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดแก๊สที่เกิดในชั้นนี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic Reaction) โดยชั้นนี้จะเปลี่ยนแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ (CO₂ และ H₂O) ให้กลายเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ คือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น 3 กลุ่มปฏิกิริยา คือ

2.3.2.1 ปฏิกิริยาบาร์ดัวร์ (Boudouard Reaction) เป็นปฏิกิริยาหลักในการผลิตแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างคาร์บอน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.3



2.3.2.2 ปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊ส (Water Gas Reaction) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำ และคาร์บอนเปลี่ยนเป็น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C



ในกรณีที่ปริมาณไอน้ำในการทำปฏิกิริยามากเกินไป ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่าปฏิกิริยาวอเตอร์ชิฟ ดังสมการที่ 2.5 มีผลทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง



ถ้าไอน้ำมีปริมาณสูงมาก ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อุณหภูมิประมาณ 500-600 °C ดังสมการที่ 2.6 ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งถูกใช้ไปส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง



2.3.2.3 ปฏิกิริยาการผลิตมีเทน (Methane Production) เป็นปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับแก๊สไฮโดรเจนดังสมการที่ 2.7 ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C เป็นต้นไป แต่ในภาวะความดันบรรยากาศโอกาสเกิดแก๊สมีเทนเป็นไปได้น้อย



ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ กับแก๊สไฮโดรเจนมีโอกาสเกิดแก๊สมีเทนได้เช่นกัน ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9

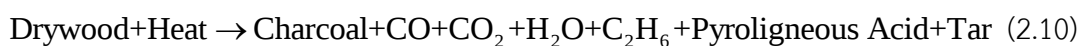


แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นมีน้อยมากและโอกาสที่เกิดขึ้นในชั้นกลั่นสลายมากกว่า แต่ถ้าคาร์บอนทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C จะไม่ทำให้เกิดแก๊สมีเทน ปฏิกิริยาการเกิดแก๊สมีเทนที่เหมาะสมจะต้องอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C และในภาวะความดันสูง

2.3.3 ชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone or Distillation Zone)

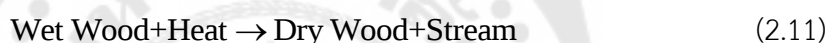
ในชั้นนี้เชื้อเพลิงจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อนโดยไม่มีออกซิเจนเลยโดยเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนซึ่งได้รับความร้อนจากชั้นรีดักชันเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงให้ได้สารระเหย (Volatile Matter) ต่างๆ ออกมาประกอบด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน เป็นต้น โดยที่อุณหภูมิในชั้นนี้เกิดขึ้นระหว่าง 135-600 °C ของแข็งที่เหลืออยู่จากกระบวนการนี้คือ

คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะถูกนำไปใช้ต่อไปในกระบวนการรีดักชันและกระบวนการเผาไหม้ซึ่งในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นไม้สามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังสมการที่ 2.10



2.3.4 ชั้นลดความชื้น (Drying Zone)

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ยังไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการกลั่นสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยความร้อนที่ใช้ในชั้นนี้เป็นความร้อนที่ได้มาจากชั้นกลั่นสลาย ซึ่งสามารถที่จะระเหยความชื้นที่มีอยู่ภายในตัวเชื้อเพลิงออกมาในรูปของไอน้ำ ดังสมการที่ 2.11 อุณหภูมิของชั้นนี้เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิบรรยากาศไปจนถึงอุณหภูมิ 135 °C



2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

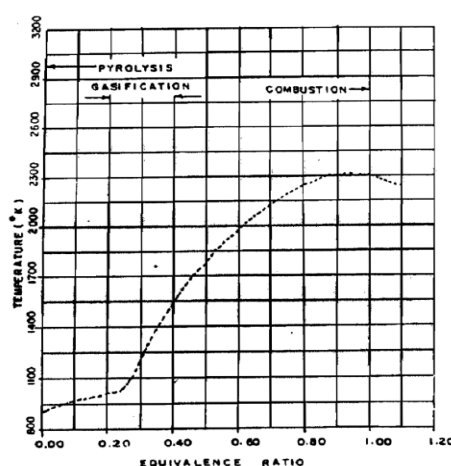
ในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิ และความดันจะเป็นสภาวะที่กำหนดให้เกิดปฏิกิริยาบางปฏิกิริยา และเกิดแก๊ส หรือสารประกอบตามสภาวะสมดุลทางเคมี กระบวนการทางกายภาพ เช่น การควบแน่นของแก๊สที่จะทำปฏิกิริยากับธาตุคาร์บอนจะตอบสนองไม่ทันกับกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นรวดเร็ว ภายในระบบผลิตแก๊สจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นมากมายในสภาวะอุณหภูมิ และความดันต่างๆ พื้นที่ที่ถูกจำกัดภายในระบบผลิตแก๊สจะทำให้กระบวนการทางกายภาพทำหน้าที่ควบแน่นส่งถ่ายมวลสารได้ดีเพียงใด ล้วนเป็นปัจจัยส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น แต่ยังมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงดังนี้

2.4.1 Equivalent Ratio

Equivalent Ratio หรือค่า ER คือ ค่าที่บอกถึงการเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยอ้างอิงโดยค่า ER แสดงได้ดังสมการที่ 2.12

$$ER = \frac{(\text{Weight of Oxidant} / \text{Weight of Dry Fuel})}{(\text{Oxidant} / \text{Fuel} (\text{Stoichiometric Weight Ratio}))} \quad (2.12)$$

ER มีผลต่อองค์ประกอบ และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง โดยปกติจะมีตัวแปร 3 อย่างคืออุณหภูมิเปลว (Adiabatic Flame Temperature) ค่า ER และอุณหภูมิภายในเตา ซึ่งส่งผลต่อพลังงานเคมี และค่าพลังงานของแก๊สเชื้อเพลิง โดยค่า ER ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สในภาวะสมดุลอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.4 ซึ่งจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial Oxidation) กรณีที่ ER เท่ากับ 1 จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และทำให้อุณหภูมิเปลวสูงขึ้นดังรูปที่ 3 สำหรับค่า ER ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สจากไม้ คือ 0.25 เป็นภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด



ภาพประกอบ 3 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลวที่ Equivalent Ratio ต่างๆ

2.4.2 ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture Content)

ความชื้นของเชื้อเพลิงทำให้สัดส่วนแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้นแต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สและค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ลดลง ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง แหล่งที่มา และการดัดแปลงสภาพก่อนนำมาผลิต แก๊สความชื้นในเชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ความชื้นที่อยู่ในเนื้อชีวมวล สามารถอยู่ในรูปเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96-97 % ความชื้นที่ผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินจากความชื้นในรูปเปิดของเซลล์ชีวมวล ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200-250 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ระเหยความชื้นที่ผิวและความชื้นที่อยู่ภายในชีวมวลถ้าต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน ความชื้นไม่ควรเกิน 50 % การแสดงค่าความชื้นนิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์มี 2 รูปแบบคือ

1. ความชื้นฐานเปียก (wet basis) เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้ความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์

2. ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะช่วยให้คำนวณได้สะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของเชื้อเพลิงจะคงที่ อาจบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ หรือ จำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง ($\text{g H}_2\text{O} / \text{g solid}$)

วิธีการวัดความชื้นของเชื้อเพลิงแข็งที่เป็นที่นิยมคือการใช้ความร้อนด้วยเตาอบตามมาตรฐาน ASTM E1358-97 ซึ่งมีเงื่อนไขในการอบแห้งคือ การใช้เตาอบไมโครเวฟขนาดไม่ต่ำกว่า 600 W ด้วยเวลาดังนี้

- อบด้วยเตาไมโครเวฟ ครั้งแรก 2 นาที 1 ครั้ง, 1 นาที 2 ครั้ง และ 30 วินาที ตามลำดับจนน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง

- อบด้วยเตาไมโครเวฟ ครั้งแรก 3 นาที 1 ครั้ง และ 30 วินาที ตามลำดับจนน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง

- อบด้วยเตาไมโครเวฟ ครั้งแรก 1 นาที 3 ครั้ง และ 30 วินาที ตามลำดับจนน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง

- อบด้วยเตาไมโครเวฟ ครั้งแรก 1 นาที 2 ครั้ง และ 30 วินาที ตามลำดับจนน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง

ซึ่งเวลาข้างต้นที่จะเลือกใช้ต้องเลือกจากความเหมาะสมของวัสดุเป็นสำคัญ

2.4.3 ขนาดของเชื้อเพลิง (Fuel Size)

ขนาดของเชื้อเพลิงจะมีผลกับการเกิดความดันลด (Pressure Drop) ภายในเตาผลิตแก๊ส ถ้าเกิดความดันลดภายในเตามากเกินไปทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำเอาอากาศเข้า และพาแก๊สที่ผลิตได้ออกจากเตาผลิตแก๊สมาก พัดลมจะต้องมีแรงมากพอที่จะเอาชนะความดันลดของระบบทั้งหมด ในทางทฤษฎีอากาศควรสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สที่เพิ่มขึ้น ถ้าเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีปริมาณช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงมากเป็นผลทำให้ปริมาณอากาศไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิริยาเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามลงไปด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กเกินไปก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น

2.4.4 การกระจายขนาด (Size Distribution)

เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาในเตาผลิตแก๊สต้องมีขนาดไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้ามีขนาดแตกต่างกันมากอากาศและแก๊สจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ และขนาดเล็กซ้อนทับกัน ทำให้บางบริเวณเกิดการเผาไหม้รุนแรง บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมาทำให้เกิดการหลอมกันเป็นก้อน (Clinker)

2.4.5 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

เป็นค่าที่แสดงลักษณะการเปลืองเนื้อที่ของเชื้อเพลิงนั้นๆ กล่าวคือ เมื่อเทเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดลงในภาชนะ รูปทรงของแต่ละเม็ดจะทำให้พื้นที่ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้ นั่นคือเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงขึ้น ทำให้เปลืองเนื้อที่ภายในภาชนะเนื่องจากมีช่องว่างอากาศทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมต่ำลงการหาค่า bulk density ทำได้โดยการบรรจุวัสดุลงไปภาชนะที่ทราบปริมาตรเพื่อลดความผิดพลาด ควรใช้ภาชนะขนาดใหญ่พอสมควร เช่น ขนาด 1 ลิตร แล้วนำไปชั่ง ปาดหรือเกลี่ยผิวหน้าให้เรียบ

2.4.6 สารระเหยในเชื้อเพลิง (Volatile Matter)

สารระเหยที่ออกมาในชั้นกลั่นสลายที่อุณหภูมิ 135-600 °C ประกอบด้วย น้ำ น้ำมันดิน (Tar) และน้ำมันที่กลั่นตัวต่างๆ ถ้าเชื้อเพลิงมีสารระเหยมากจะสร้างปัญหามากเนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของสารพวกนี้จะไปอุดตันตามระบบการส่งจ่ายแก๊ส และสารระเหยพวกนี้ยังมีฤทธิ์ กัดกร่อนที่สร้างปัญหาให้กับการใช้งานของแก๊สเชื้อเพลิง

2.4.7 ขี้เถ้า (Ash)

ขี้เถ้าเกิดจากสารแร่ธาตุที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนอิสระขณะเผาไหม้ ในความเป็นจริงอาจมีคาร์บอนที่ถูกเผาครึ่งๆกลางๆ ที่เรียกว่า ชาร์ (Char) สัดส่วนของขี้เถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาผลิตแก๊ส ถ้าสัดส่วนขี้เถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูงจะทำให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง เนื่องจากถ้าเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของขี้เถ้าสูงแสดงว่าในเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่ต่ำลงไปตามสัดส่วน และถ้าภายในเตามีอุณหภูมิสูงอาจเกิดการหลอมตัวของขี้เถ้าเกิดเป็น Slag ไปจับเกาะที่ตัวเตาซึ่งการนำ Slag ออกจากตัวเตาทำได้ลำบาก

2.5 ทฤษฎีการเผาไหม้และการคำนวณการเผาไหม้

ในการคำนวณการเผาไหม้จะคำนวณปริมาณต่างๆต่อปริมาณเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วย อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปสำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจะใช้มวล 1 kg (เขียนตามความนิยมน่า kg-f) และสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซ จะใช้ 1 m³N (เขียนตามความนิยมน่า m³N-f) เป็นปริมาณหนึ่งหน่วย หน่วย m³N หมายถึงปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน (ความดัน 0.1013 MPa (1 บรรยากาศ) อุณหภูมิ 0 °C (273.15 K)) เมื่อแสดงปริมาณอากาศหรือปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงต่างๆด้วยหน่วยนี้แล้วจะสามารถกำหนดปริมาณสัมบูรณ์ของก๊าซเหล่านั้นได้ จึงมีความสะดวกในการใช้งาน กรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะแสดงสัดส่วนโดยมวล (kg/kg-f) ของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, กำมะถัน, ออกซิเจน, ไนโตรเจน, ความชื้น และขี้เถ้าในเชื้อเพลิงด้วย C,H,S,O,N,w,a ตามลำดับ

$$C + H + S + O + N + w + a = 1 \quad (2.13)$$

ในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซจะแสดงสัดส่วนโดยปริมาตร [m³N/ m³N -f] ของคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ฯลฯ ซึ่งเป็นองค์ประกอบด้วย CO,H₂,C_mH_n,O₂,N₂,CO₂,H₂O ตามลำดับ

$$CO+H_2 + \sum C_m H_n + O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O = 1 \quad (2.14)$$

สมการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างก่อนและหลังปฏิกิริยาเผาไหม้ เรียกว่า สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจนและออกซิเจนเผาไหม้เกิดไอน้ำ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ H_2 และ O_2 จะไม่เปลี่ยนเป็น H_2O ทั้งหมดทันที แต่จะต้องผ่านปฏิกิริยาพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้เกิด H_2O ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง และในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาที่ H_2O สลายตัวย้อนกลับกลายเป็น H_2 กับ O_2 อีกด้วย ดังนั้น H_2 , O_2 และ H_2O จะยังคงอยู่ด้วยสัดส่วนค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะนั้น (สภาวะสมดุล เคมี) อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้นจะมีค่าสูงมาก หากอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ไม่ได้มีอุณหภูมิสูงมากแล้ว จะพิจารณาว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

ตารางที่ 3 แสดงสมการปฏิกิริยาของธาตุองค์ประกอบต่างๆ เมื่อเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวเกิดการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น หัวข้อ I ในตาราง เป็นสมการปฏิกิริยาในกรณีที่คาร์บอนเผาไหม้สมบูรณ์ คาร์บอน 1 kmol (12 kg) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 kmol (32 kg, $22.4 \text{ m}^3\text{N}$) เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ 1 kmol (44 kg, $22.4 \text{ m}^3\text{N}$) หากเชื้อเพลิง 1 kg มีคาร์บอนอยู่ c [kg] แล้ว เนื่องจากคาร์บอนจำนวน c [kg] จะเท่ากับ $c/12$ [kmol] ดังนั้น การทำให้คาร์บอนนี้เผาไหม้สมบูรณ์จะต้องใช้ O_2 จำนวน $(c/12) \times 22.4$ [m^3N] ผลจากการเผาไหม้สมบูรณ์ จะเกิด CO_2 ขึ้น $(c/12) \times 22.4$ [m^3N]

ตาราง 3 แสดงสมการปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว

	C	+	O_2	=	CO_2
I	1 kmol		1 kmol		1 kmol
	12 kg		32 kg		44 kg
			$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$		$22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$
	$c \text{ kg}$		$(c/12) \times 22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$		$(c/12) \times 22.4 \text{ m}^3 \text{ N}$

ตาราง 3 (ต่อ)

	C	+	O ₂	=	CO ₂
II	C	+	(1/2) O ₂	=	CO
	1 kmol		1/2 kmol		1kmol
	12 kg		32/2 kg		28 kg
			22.4/2 m ³ N		22.4 m ³ N
	c kg		(c/12)/2×22.4 m ³ N		(c/12)×22.4 m ³ N
III	H	+	(1/4) O ₂	=	(1/2) H ₂ O
	1 kmol		1/4 kmol		1/2 kmol
	1 kg		32/4 kg		18/2 kg
			22.4/4m ³ N		22.4/2 m ³ N
	H kg		(h/4)×22.4 m ³ N		(h/2)×22.4 m ³ N

ตาราง 3 (ต่อ)

	C	+	O ₂	=	CO ₂
	S	+	O ₂	=	SO ₂
	1 kmol		1 kmol		1 kmol
IV	32 kg		32 kg		64 kg
			22.4 m ³ N		22.4 m ³ N
	s kg		(s/32)×22.4 m ³ N		(s/32)×22.4 m ³ N
	N	=	(1/2) N ₂		
	1 kmol		1 kmol		
V	14 kg		28/2 kg		
			22.4/2 m ³ N		
	n kg		(n/28)×22.4 m ³ N		
	H ₂ O	=	H ₂ O		
	1 kmol		1kmol		
VI	18 kg		18 kg		
			22.4 m ³ N		
	W kg		(w/18)×22.4 m ³ N		

ตาราง 4 แสดงสมการปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซ

I	CO	+	(1/2) O ₂	=	CO ₂		
	1 kmol		1/2 kmol		1 kmol		
	22.4 m ³ N		22.4/2 m ³ N		22.4 m ³ N		
	co m ³ N		(1/2) co m ³ N		co m ³ N		
II	H ₂	+	(1/2) O ₂	=	H ₂ O		
	1 kmol		1/2 kmol		1kmol		
	22.4 m ³ N		22.4/2 m ³ N		22.4 m ³ N		
	h ₂ m ³ N		(1/2) h ₂ m ³ N		h ₂ m ³ N		
III	C _m H _n	+	(m+n/4) O ₂	=	m CO ₂	+	n/2 H ₂ O
	1 kmol		(m+n/4) kmol		m kmol		n/2 kmol
	22.4 m ³ N		(m+n/4)× 22.4/2 m ³ N		m × 22.4/2 m ³ N		(n/2) × 22.4/2 m ³ N
	C _m h _n m ³ N		(m+n/4) C _m h _n m ³ N		m C _m h _n m ³ N		(n/2) C _m h _n m ³ N

2.6 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

ในการทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์อากาศที่ใช้จะต้องมีปริมาณไม่น้อยกว่าปริมาณพอดีอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศพอดีและเชื้อเพลิงเรียกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเชิงทฤษฎี (theoretical air-fuel ratio) ซึ่งมีสัญลักษณ์ AFR_T และการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของเชื้อเพลิงแข็งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\text{AFR}_T = (11.44X_C + 34.32X_H + 4.29X_S - 4.29X_O)(1 - X_M - X_A) \quad (2.16)$$

โดยที่

AFR_T คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (kg/h)

X_C คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิงที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_H คือ สัดส่วนโดยมวลของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_S คือ สัดส่วนโดยมวลของซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_O คือ สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนในเชื้อเพลิงที่แห้งและไม่มีเถ้า

X_M คือ สัดส่วนโดยมวลของความชื้น

X_A คือ สัดส่วนโดยมวลของเถ้า

ในกรณีของการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงซึ่งจากการตรวจสอบก๊าซต่างๆในก๊าซเสียสามารถหาได้จากสมการที่ 2.17

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \left(\frac{28x_{cb}y_{N_2}}{12(y_{co} + y_{co_2})} \right) - x_{N,ar} \quad (2.17)$$

โดยที่

AFR_A คืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (kg/h)

X_{cb} คือ สัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ต่อมวลเชื้อเพลิง

y_{co} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์

y_{co_2} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์

y_{N_2} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของไนโตรเจน

$X_{N,ar}$ คือ สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจนในเชื้อเพลิง

2.6.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

โดยทั่วไปค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะหมายถึงปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แบบพอดีของเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลว 1 kg หรือของเชื้อเพลิงก๊าซ 1 m³ การหาค่าความร้อนโดยตรงอาจใช้บอมบ์แคลอริมิเตอร์(bombcalorimeter) ค่าความร้อนขึ้นกับผลผลิตที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งอาจเป็นน้ำหรือไอน้ำก็ได้การเผาไหม้ที่ให้ผลผลิตเป็นน้ำให้ค่าความร้อนทางสูง (higher heating value) การเผาไหม้ที่ให้ผลผลิตเป็นไอน้ำให้ค่าความร้อนทางต่ำ (lower heating value) ดังนั้นผลต่างระหว่างค่าความร้อนสูงกับค่าความร้อนต่ำจึงเท่ากับค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำที่เป็นผลผลิตจากการเผาไหม้ และการหาค่าความร้อนสูง HHV และ ค่าความร้อนต่ำ LHV สามารถหาได้จากสมการที่ 2.17และ 2.18

$$\text{HHV} = (0.341C_{\text{db}} + 1.322H_{\text{db}} - 1.2O_{\text{db}} - 0.12N_{\text{db}} + 0.0686S_{\text{db}} - 0.0153A_{\text{db}}) \left(1 - \frac{W_{\text{db}}}{100}\right) \quad (2.18)$$

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2.443 \left[\left(8.936 \frac{H_{\text{db}}}{100} \times 1 - \frac{W_{\text{db}}}{100} \right) + \frac{W_{\text{db}}}{100} \right] \quad (2.19)$$

โดยที่

HHV คือ ค่าความร้อนทางสูง (MJ/kg)

LHV คือ ค่าความร้อนทางต่ำ (MJ/kg)

C_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิงที่แห้ง

H_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงที่แห้ง

O_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลออกซิเจนในเชื้อเพลิงที่แห้ง

N_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลไนโตรเจนในเชื้อเพลิงที่แห้ง

S_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงที่แห้ง

A_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลเถ้าในเชื้อเพลิง

W_{db} คือ สัดส่วนโดยมวลน้ำในเชื้อเพลิง

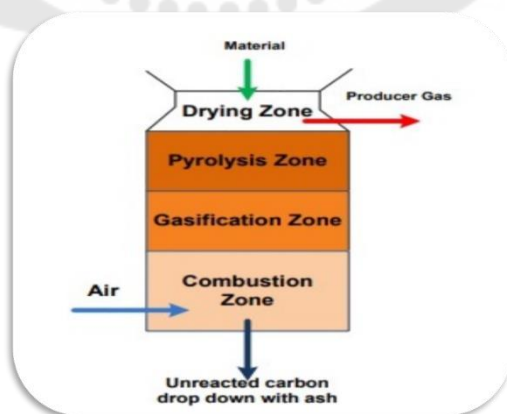
2.7 ชนิดของเตาผลิตแก๊สในปัจจุบัน

เตาผลิตแก๊สสามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงซึ่งในปัจจุบันเตาผลิตแก๊สที่ใช้กันในงานวิทยามีอยู่ 5 ชนิด ซึ่งขึ้นกับการออกแบบและเทคโนโลยีที่ใช้ ได้แก่

- 1.เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier หรือ Counter-Current Fixed Bed)
- 2.เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier หรือ Co-Current Fixed Bed)
- 3.เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง (Cross Flow Gasifier หรือ Cross-Current)
- 4.เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier)
- 5.Entrained Flow Gasifier (Moving Bed Gasifier)

2.7.1 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น (Updraft Gasifier หรือ Counter-Current Fixed Bed)

เตาชนิดนี้เชื้อเพลิงถูกป้อนจากด้านบน ในขณะที่อากาศใช้สำหรับการเผาไหม้ถูกป้อนจากด้านล่าง เป็นลักษณะไหลแบบสวนทางกันดังภาพประกอบ 5 อากาศถูกป้อนผ่านตะแกรงเข้าทางด้านล่างของเตา ซึ่งบริเวณเหนือตะแกรงเป็นชั้นของการเผาไหม้ (Combustion Zone) ของเชื้อเพลิง โดยทำปฏิกิริยากับอากาศที่ป้อนเข้ามาได้ผลผลิตเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ไหลเข้าไปยังชั้นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Zone) ในชั้นนี้เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วได้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หลังจากนั้นแก๊สที่ได้ไหลต่อไปยังชั้นกักละลาย (Pyrolysis Zone) และชั้นอบแห้ง (Drying Zone) ซึ่งในขั้นตอนนี้ความร้อนสัมผัสของแก๊สถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิง ทำให้อุณหภูมิของแก๊สที่ลดลง และมีผลผลิตจากชั้นกักละลาย (Pyrolysis Zone) เช่น น้ำมันดินและสารระเหยต่างๆ ปล่อยออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิง (Producer Gas) อีกด้วย

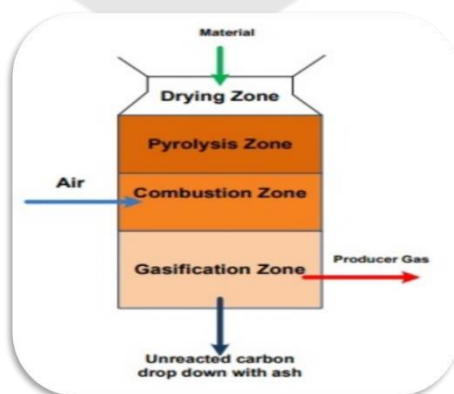


ภาพประกอบ 4 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น

จุดเด่นของเตาชนิดนี้คือ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาแบบนี้จะมีอุณหภูมิไม่สูง เตามีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด และยังสามารถบ้อนไอน้ำเข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาการเกิดแก๊สเพื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน (H_2) ในแก๊สเชื้อเพลิงอีกทั้งยังช่วยควบคุมอุณหภูมิในชั้นของการเผาไหม้แต่มีข้อเสียตรงที่แก๊สเชื้อเพลิงสกปรก จึงต้องมีชุดทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญของการเกิดแก๊สของเตาชนิดนี้ประกอบด้วย วิธีการบ้อนอากาศ ตำแหน่งที่แก๊สไหลออก ชนิดและขนาดของตะแกรง ความหนาของชั้นใส่เชื้อเพลิงและค่า Specific Gasification Rate (SGR) โดยSGR หมายถึง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงที่ใช้ทำปฏิกิริยาผลิตแก๊สใน 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดตะแกรง(m^2) โดยการกำหนดค่าตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง การออกแบบ และการทำงานของเตาผลิตแก๊ส

2.5.2 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง (Downdraft Gasifier หรือ Co-Current Fixed Bed)

เตาชนิดนี้อากาศที่ใช้ทำปฏิกิริยาไหลทางเดียวกันกับเชื้อเพลิงคือ ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง และเนื่องจากเหตุผลนี้เองทำให้ แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จึงมีส่วนประกอบของสารระเหย (Volatile Matter) ต่เนื่องมาจากผลผลิตที่ได้จากชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) จะถูกเผาไหม้ในชั้นของการเผาไหม้(Combustion Zone) ด้วยดังภาพประกอบ 6 เพราะฉะนั้นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาชนิดนี้จึงมีความสะอาดมากกว่าเตาแบบไหลขึ้นจึงเหมาะที่จะนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engines) แต่เตาผลิตแก๊สชนิดนี้จำเป็นต้องใช้วัสดุทนไฟอย่างดี เนื่องจากอุณหภูมิในชั้นของการเผาไหม้มีค่าสูงมากกว่าเตาแบบไหลขึ้นเนื่องจากมีสารระเหยต่างๆมาเผาไหม้ด้วย ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างของเตาแบบไหลลงก็คือ มีพวกเถ้าฝุ่นละอองต่างๆ ปนออกมากับแก๊สเชื้อเพลิงจนวน



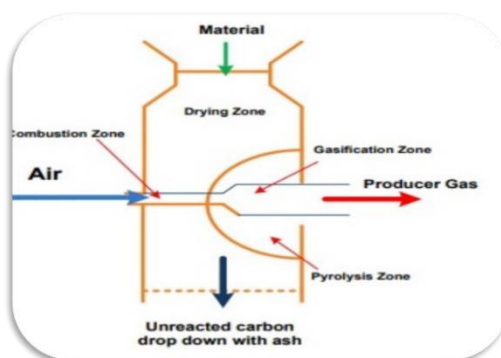
ภาพประกอบ 5 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง

ตาราง 5 ลักษณะสมบัติแนะนำในการเผาในเตาแก๊สซิฟายเออร์ของเศษไม้

ตัวแปล	Drowndraft	Updraft
ความชื้น(%น้ำหนักเปียก)	12 (สูงสุดไม่เกิน 25)	43 (สูงสุดไม่เกิน 60)
เถ้า(%น้ำหนักแห้ง)	0.5 (สูงสุดไม่เกิน 6)	14 (สูงสุดไม่เกิน 25)
ขนาด(เซนติเมตร)	2-10	0.5-10

2.5.3 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง (Cross Flow Gasifier หรือ Cross-Current)

เป็นเตาผลิตแก๊สที่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของภาระความต้องการได้ โดยการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าทางด้านบน และป้อนอากาศให้มีทิศทางตั้งฉากกับการไหลของเชื้อเพลิง ดังภาพประกอบ 7 ทำปฏิกิริยาคายความร้อนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) ไหลเข้าสู่ชั้นถัดไปตรงใกล้ทางออกคือ ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone) ทำปฏิกิริยาดูดความร้อนจนได้แก๊สเชื้อเพลิงไหลออกบริเวณกลางเตาโดยผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้งใกล้บริเวณทางออกของเตา ซึ่งชั้นเผาไหม้(Combustion Zone) และชั้นรีดักชันจะเป็นส่วนเล็กๆ ภายในเตา โดยบริเวณรอบๆทั้งสองชั้นนี้จะเป็นบริเวณของชั้นกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) ซึ่งสารระเหยที่ได้จากการกลั่นสลายของชั้นนี้จะผ่านชั้นเผาไหม้และชั้นรีดักชันก่อนที่จะออกจากเตา ทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีสารระเหย (Volatile Matter) น้อย และอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ค่อนข้างสูง เนื่องจากที่ทางออกของแก๊สที่ผลิตได้อยู่ใช้กับชั้นที่ทำปฏิกิริยา



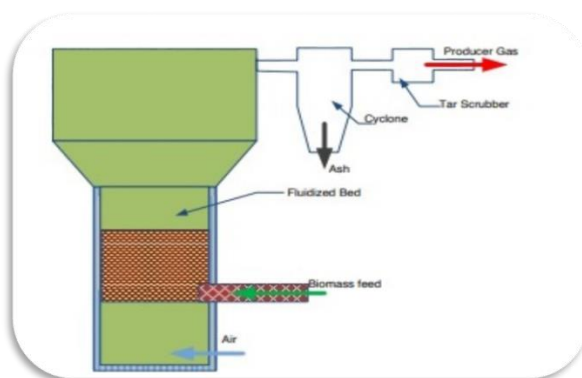
ภาพประกอบ 6 เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขวาง

ตาราง 6 เตาเชื้อเพลิงแบบ Fixed Bed Gasifier

Updraft gasifier	Down draft gasifier	Cross draft gasifier
-อากาศจะไหลเข้าทางด้านล่าง และก๊าซที่ผลิตได้จะไหลออกมาทางด้านบน Gasifier -ไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนักเพราะว่ามีปัญหาทางเรื่อง Clinker, Tar และ อาจจะต้องมีการเติมน้ำเข้าไปช่วยทำปฏิกิริยาที่ Reduction Zone	-อากาศจะไหลเข้ามาทางด้านบน และก๊าซที่ผลิตได้จะไหลออกมาทางด้านล่าง -บริเวณ Combustion Zone จะไม่ติดกับส่วนที่เป็นซีเมนต์ดังนั้นในกรณีที่อุณหภูมิของ Combustion Zone สูงๆจะไม่ทำให้เกิดการละลายรวมตัวเป็นก้อนซีเมนต์(Clinker) และนอกจากนี้ความชื้นที่ได้จากการอบเชื้อเพลิงมาใช้ทำปฏิกิริยาที่ Reduction Zone ได้ด้วย	-การออกแบบจะง่ายและมีขนาดเล็ก อากาศจะเข้ามาทางด้านหนึ่งและก๊าซที่ผลิตได้จะออกไปในอีกด้านตรงข้าม อากาศที่เข้ามาในตอนแรกนั้นจะผ่าน Combustion Zone และ Reduction Zone ตามลำดับเพื่อผลิตก๊าซ

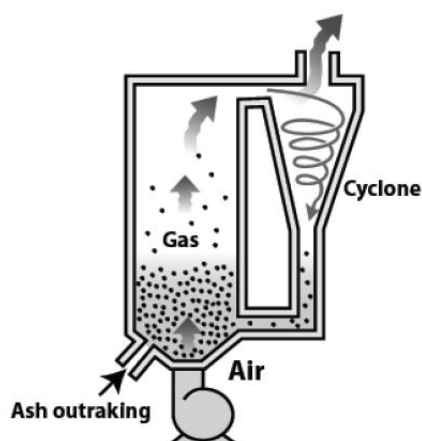
2.5.4 เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized Bed Gasifier)

เตาผลิตแก๊สชนิดนี้ออกแบบมาเพื่อขจัดปัญหาของเตาผลิตแก๊สที่ได้กล่าวมาแล้ว นั่นก็คือการทำงานของเตาที่กล่าวมาขึ้นอยู่กับคุณภาพทางเคมี และฟิสิกส์ โดยปัญหาที่มักพบก็คือการหลอมละลายของเถ้าทำให้เกิดการอุดตันในเตาผลิตแก๊ส ซึ่งปัญหานี้จะไม่เกิดกับเตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไธซ์เบด โดยการทำงานของเตาชนิดนี้จะให้อากาศไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง และเมื่อให้ความเร็วของอากาศมีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้เชื้อเพลิงที่อยู่ในห้องเผาไหม้เกิดการลอยตัวขึ้น นั่นหมายความว่า เชื้อเพลิงมีการประพฤติตัวเหมือนของไหล (Fluid) ดังภาพประกอบ 8 โดยมีข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยปกติภายในห้องเผาไหม้จะใส่วัสดุเฉื่อย (Inert Material) ลงไป เช่น ทราย หรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา เช่น หินปูน เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อน คลุกเคล้าเชื้อเพลิงและช่วยทำความสะอาดภายในห้องเผาไหม้



ภาพประกอบ 7 เตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิดไธด์เบด (Fluidize Bed Gasifier)

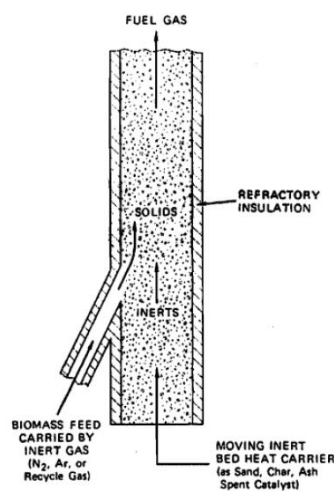
เตาแบบนี้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอม เหลวของเถ้าได้ จึงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากได้ แต่แก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดนี้จะมีเชื้อเพลิงบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่หมด เช่น เถ้าและฝุ่นผงปนออกมาเนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตาสูงจึงต้องมีระบบกำจัดฝุ่นผงซึ่งก็ได้มีการออกแบบระบบของเตาเพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยการติดตั้งไซโคลนเพื่อดักจับเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดแล้วส่งกลับไปเผาไหม้ใหม่ ภาพประกอบ 9 ซึ่งเตาผลิตแก๊สที่ได้มีการปรับปรุงใหม่นี้เรียกว่า เตาผลิตแก๊สฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน (Circulating Fluidized Bed Gasifier, CFB Gasifier)



ภาพประกอบ 8 เตาผลิตแก๊สฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนวน (CFB Gasifier)

2.5.5 Entrained Flow Gasifier (Moving Bed Gasifier)

กระบวนการผลิตแก๊สระบบนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมีการถ่ายเทความร้อนสูง การทำงานของการถ่ายเทความร้อน คล้ายกับระบบเตาผลิตแก๊สชนิดฟลูอิไดซ์เบด โดยปกติช่วงอุณหภูมิการทำงานอยู่ระหว่าง $482-593^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สระบบนี้คือ ผงถ่านหิน และชีวมวลที่มีขนาดเล็ก การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเกิดขึ้นในช่องปฏิกิริยาแบบหมุนวนดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 9 การทำปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับ

เชื้อเพลิงเกิดขึ้นในช่องปฏิกิริยาแบบหมุนวน

ตาราง 7 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและการทำงานของเตาปฏิกรณ์

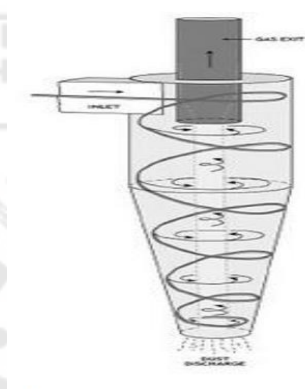
	แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง		แบบฟลูอิดไดซ์เบด	
	Upgraft	Downdrat	Bubbling	Circulating
ความไวต่อ				
ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิง	ปานกลาง	เฉพาะชนิด	ยืดหยุ่นได้	ยืดหยุ่นได้
ขนาดของเชื้อเพลิง	ดีมาก	ดี	พอใช้	พอใช้
ปริมาณความชื้น	ดีมาก	พอใช้	ดี	ดี
ปริมาณเถ้า	แย่มาก	แย่มาก	ดีมาก	ดีมาก
อุณหภูมิปฏิกิริยา	1000	1000	850	850
การผสมกันของเชื้อเพลิง	แย่มาก	แย่มาก	ดีมาก	ดีเยี่ยม
อุณหภูมิก๊าซออก	250	800	800	850
ปริมาณน้ำมันดินในก๊าซ	สูงมาก	ต่ำมาก	ปานกลาง	ต่ำ
ปริมาณฝุ่นในก๊าซ	สูง	ปานกลาง	สูงมาก	สูงมาก
ศักยภาพการปรับแปรขนาด	ดี	แย่มาก	ดี	ดีมาก
การเริ่มต้นกระบวนการ	แย่มาก	แย่มาก	ดี	ดี
การควบคุม	พอใช้	พอใช้	ดีมาก	ดีมาก
การแปลงสภาพคาร์บอน	ดีมาก	ดีมาก	พอใช้	ดีมาก
ประสิทธิภาพทางความร้อน	ดีเยี่ยม	ดีมาก	ดี	ดีมาก
ค่าความร้อนของก๊าซ	แย่มาก	แย่มาก	แย่มาก	พอใช้

2.8 การทำความสะอาดแก๊สเชื้อเพลิง

แก๊สที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊ส นอกจากมีส่วนประกอบเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้แล้ว ยังมีฝุ่นละอองจากการเผาไหม้ น้ำมันดิน (Tar) และไอน้ำปะปนออกมาด้วย การนำแก๊สไปใช้งานทันทีจะทำให้เครื่องยนต์ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ ดังนั้นก่อนที่จะนำแก๊สที่ผลิตได้ไปใช้งาน จะต้องมีการกำจัดฝุ่นละออง น้ำมันดิน และไอน้ำออกเสียก่อน

2.6.1 ไซโคลน (Cyclone)

ระบบไซโคลน (Cyclone Separator) อาศัยหลักการหนีศูนย์กลางในการแยกฝุ่นออกจากอากาศฝุ่น และอากาศจะถูกดูดเข้าไปในไซโคลนที่มีกระแสวนหนีศูนย์กลางเหวี่ยงอนุภาคไปยังผนังกระแสวนจะพาอนุภาคฝุ่นเคลื่อนตัวลงไปเรื่อยๆ จนถึงปลายโคนในขณะที่อากาศที่ไม่มีฝุ่นจะถูกหมุนกลับขึ้นไปยังส่วนบนของท่อออกดังแสดงในภาพประกอบ 11

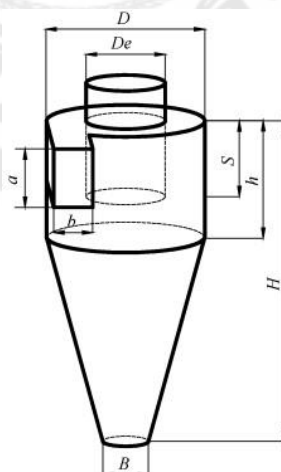


ภาพประกอบ 10 การทำงานของไซโคลน

การออกแบบระบบไซโคลนจะเลือกจากระยะมาตรฐานของไซโคลนซึ่งมีอยู่หลายแบบเช่น Shepherd & Lapple, Peterson & Whitby อย่างไรก็ตาม ระยะมาตรฐานของไซโคลนที่นิยมใช้จะมี 2 แบบคือ Stairmand และ Swift ซึ่งค่าออกแบบต่างๆ ดังตารางที่ 8

ตาราง 8 ระยะมาตรฐานของไซโคลน

ขนาดของ ไซโคลน	ความหมาย		Stairmand	Swift	Lapple
D	Body diameter		1.0	1.0	1.0
a	Inlet height	$Ka = a/D$	0.5	0.44	0.5
b	Inlet width	$Kb = b/D$	0.2	0.21	0.25
S	Outlet width	$KS = S/D$	0.5	0.5	0.625
D_e	Gas outlet diameter	$KD_e = D_e/D$	0.5	0.4	0.5
h	Cylinder height	$Kh = h/D$	1.5	1.4	2.0
H	Overall height	$KH = H/D$	4.0	3.9	4.0
B	Outlet diameter	$KB = B/D$	0.375	0.4	0.25
K	Configuration		551.3	699.2	
N_H	Inlet velocity head		6.4	9.24	8.0



ภาพประกอบ 11 ขนาดของไซโคลน

ความดันสูญเสียของไซโคลน

$$\Delta P = 0.002 \times \rho_f \times v^2 \times N_H \quad (2.20)$$

โดยที่

- ΔP คือ ความดันสูญเสีย (m/s)
 ρ_f คือ ความหนาแน่นแก๊ส (kg/m^3)
 v คือ ความเร็วของแก๊ส (m/s)
 N_H คือ Inlet velocity head

Cut Size diameter

$$d_c = \sqrt{\frac{96.8 \eta_a b}{2\pi N_t v (\rho_p - \rho_f)}} \quad (2.21)$$

โดยที่

- d_c คือ Cut Size Diameter (m)
 ρ_p คือ ความหนาแน่นวัสดุ (kg/m^3)
 N_t คือ Number of Turn
 η_a คือ Dynamic Viscosity (Pa.s)
 D คือ Body diameter (m)

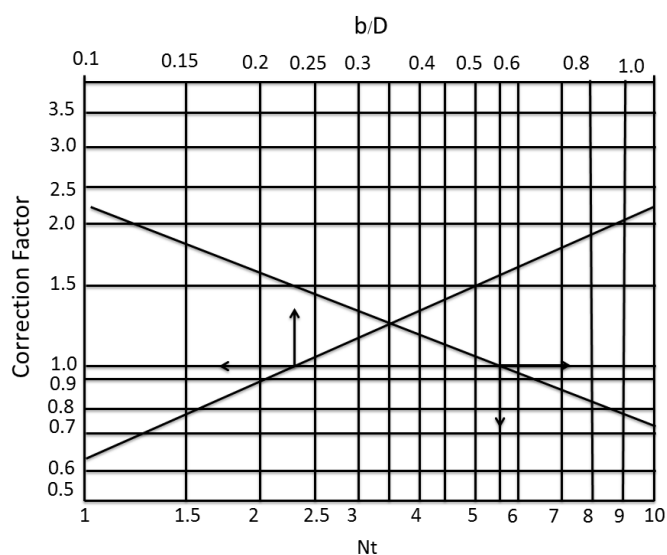
ประสิทธิภาพไซโคลน

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{d}{d + d_c} \quad (2.22)$$

โดยที่

η_{eff} คือ ประสิทธิภาพไซโคลน

d คือ ขนาดของวัสดุ



ภาพประกอบ 12 การหาค่า N_t

2.9 อุปกรณ์ลำเลียงวัสดุ

2.9.1 Screw Conveyor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับขนถ่ายวัสดุปริมาณมวล ที่สามารถขนถ่ายได้ทั้งในแนวระนาบหรือแนวลาดเอียง ลักษณะสร้างของสกรูเป็นได้ทั้งแผ่นเกลียวสกรูตัวเต็มหรือแผ่นเส้นเกลียวข้อหรือแกนทวนก็ได้สร้างได้ง่ายเพราะมีองค์ประกอบเพียง 3 ชิ้น คือ รางตัวถังเกลียวสกรูขนถ่าย และต้นกำลังขับ ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 13 องค์ประกอบ Screw Conveyor

กำลังขับ

$$HP_{total} = (HP_f + HP_m) F_o / e_d \quad (2.23)$$

$$HP_f = 3.28 L N F_d F_b / 10^6 \quad (2.24)$$

โดยที่

HP_{total}	คือ กำลังขับ (HP)
HP_f	คือ กำลังขับตัวเปล่า (HP)
L	คือ ความยาวทั้งหมดของเกลียวลำเลียง (m)
N	คือ ความเร็วรอบเกลียวลำเลียง m
F_d	คือ แฟคเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง
F_b	คือ แฟคเตอร์เบี่ยงเบน

$$HP_m = 7.23 FCR \times L F_f F_m F_p / 10^6 \quad (2.25)$$

โดยที่

HP_m	คือ กำลังขับวัสดุ (HP)
FCR	คือ อัตราการไหลเชื้อเพลิง (kg/hr)
F_f	คือ แฟคเตอร์ใบเกลียว
F_m	คือ สัมประสิทธิ์กำลังม้า
F_p	คือ แฟคเตอร์พายุวน
F_o	คือ แฟคเตอร์ภาระเกิน
e_d	คือ ประสิทธิภาพการส่งกำลัง

ตาราง 9 แฟคเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง(F_d)

เส้นผ่านศูนย์กลาง(นิ้ว)	(F_d)
3	13.76
6	18
9	31
12	55
14	78
16	106
18	135
20	165
24	235

ตาราง 10 แฟคเตอร์เบริงแชน (F_b)

ชนิดของเบริงแชน	(F _b)
บอล	1
แบบบิท	1.7
บรอนซ์	1.7
ไม้	1.7
พลาสติก	2.0
ไนลอน	2.0
เหล็กเหนียว	4.4

ตาราง 11 แฟคเตอร์ไบกเกลียว (F_f)

ชนิดไบกเกลียว	ปริมาณการป้อนวัสดุ			
	15%	30%	45%	90%
มาตรฐาน	1	1	1	1
ใบตัด	1.1	1.15	1.2	1.3
ใบตัดและม้วน	ไม่แนะนำ	1.5	1.7	2.2
รีว	1.05	1.15	1.2	-

ตาราง 12 สมบัติวัสดุที่สามารถใช้เกลียวลำเลียงระดับปริมาณการป้อนกลุ่มเกลียวและสัมประสิทธิ์กำลังม้า(F_m)

วัสดุ	ความหนาแน่น(lb/ft^3)	สัมประสิทธิ์กำลังม้า(F_m)
เม็ดโกโก้	35	0.6
ผงคาร์บอน	4-6	0.4
ซอล์กปูน	70-75	0.7
ถ่าน	15-34	1.2
ถ่านหิน	40	1.8

ตาราง 13 แฟคเตอร์พายกวน(F_p)

พายกวนต่อ 1 ระยะพิช					
จำนวนพายกวน	ไม่มี	1	2	3	4
	1.0	1.3	1.6	1.9	2.2

ตาราง 14 ประสิทธิภาพการส่งกำลัง(e)

อุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังและทดรอบ	ประสิทธิภาพ
ชุดลดรอบระดับต่ำแบบเฟืองหนอนมีเรือนปิด(ถึง20:1)	0.9
ชุดลดรอบระดับปานกลางแบบเฟืองหนอนมีเรือนปิด(20:1ถึง 60:1)	0.7
ชุดลดรอบระดับสูงแบบเฟืองหนอนมีเรือนปิด(60:1ถึง100:1)	0.5
โซ่ลูกกลิ้งเรือนโซ่เปิด(Open guard)	0.93

2.10 ค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ ๑๖ แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ ๒ (พ.ศ. ๒๕๓๕) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. ๒๕๓๕ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม จึงได้ออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ ๑ ให้ยกเลิกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องกำหนดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน พ.ศ. ๒๕๔๘ ลงวันที่ ๔ กุมภาพันธ์ พ.ศ. ๒๕๔๘

ข้อ ๒ ในประกาศนี้

“อากาศที่ระบายออกจากโรงงาน” หมายความว่า อากาศที่ระบายออกจากปล่องหรือช่องหรือ ท่อระบายอากาศของโรงงานไม่ว่าจะผ่านระบบบำบัดหรือไม่ก็ตาม

“น้ำมันหรือน้ำมันเตา” ให้ความหมายรวมถึง ผลพลอยได้ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้

“ถ่านหิน” ให้ความหมายรวมถึงผลพลอยได้ที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ด้วย “เชื้อเพลิงชีวมวล” หมายความว่า เชื้อเพลิงที่ได้มาจากอินทรีย์สารหรือสิ่งมีชีวิตรวมทั้ง

ผลผลิตจากการเกษตร การปศุสัตว์และการทำป่าไม้เช่น ไม้ฟืน เศษไม้เกลบ ฟาง ชานอ้อย ต้นและใบอ้อย ใบปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม กะลามะพร้าว ใบมะพร้าว เศษ

พืช มูลสัตว์ ก๊าซชีวภาพ กากตะกอน หรือของเสียจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นต้น

“เชื้อเพลิงอื่น ๆ” หมายความว่า เชื้อเพลิงอื่นใดนอกเหนือจากที่ระบุไว้ในประกาศนี้ แต่ไม่รวมถึงเชื้อเพลิงที่ได้ กำหนดค่าการระบายปริมาณสารเจือปนในอากาศไว้เป็นการเฉพาะ

“ระบบปิด” หมายความว่า ระบบการเผาไหม้ เชื้อเพลิงและหรือวัตถุดิบที่มีการออกแบบให้มีการควบคุมปริมาตรอากาศและสภาวะแวดล้อมในการเผาไหม้ เช่น หม้อเผาปูนซีเมนต์ หม้อน้ำ เป็นต้น

“ระบบเปิด” หมายความว่า ระบบการเผาไหม้ เชื้อเพลิงและหรือวัตถุดิบที่ไม่มีการออกแบบ เพื่อควบคุมปริมาตรอากาศและสภาวะแวดล้อมในการเผาไหม้ เช่น เตาเผาปูนขาว เตาหลอมโลหะ แบบคิวโปลา (Cupola) เป็นต้น ข้อ ๓ อากาศที่ระบายออกจากโรงงาน ต้องมีค่าปริมาณของสารเจือปนแต่ละชนิดไม่เกินที่ กำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปนใน อากาศที่	
		ไม่มีการเผา ไหม้เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
1. ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้		
	- น้ำมันหรือน้ำมันเตา	-	240
	- ถ่านหิน	-	320
	- เชื้อเพลิงชีวมวล	-	320
	- เชื้อเพลิงอื่น ๆ	-	320
	ข. การถลุง หล่อหลอม รีดดิ่งหรือ การผลิต อลูมิเนียม	300	240
	ค. การผลิตทั่วไป	400	320

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปนใน อากาศที่	
		ไม่มีการเผา ไหม้เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
2. พลวง (Antimony) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	20	16
3. สารหนู (Arsenic) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	20	16
4. ทองแดง (Copper) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	30	24
5. ตะกั่ว (Lead) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	30	24
6. ปรอท (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	3	2.4
7. คลอรีน (Chlorine) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	30	24
8. ไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen chloride) (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	การผลิตทั่วไป	200	160

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปนใน อากาศที่	
		ไม่มีการเผา ไหม้เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
9. กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	25	-
10. ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	100	80
11. คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	870	690
12. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) (ส่วนในล้านส่วน)	ก. แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ - น้ำมันหรือน้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่นๆ ข. การผลิตทั่วไป	- - - - 500	950 700 60 60 -

ชนิดของสารเจือปน (หน่วยวัด)	แหล่งที่มาของสารเจือปน	ค่าปริมาณของสารเจือปน ใน อากาศที่	
		ไม่มีการเผา ไหม้เชื้อเพลิง	มีการเผาไหม้ เชื้อเพลิง
13. ออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxides of nitrogen) (ส่วนในล้านส่วน)	แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ - น้ำมันหรือน้ำมันเตา - ถ่านหิน - เชื้อเพลิงชีวมวล - เชื้อเพลิงอื่นๆ	- - - -	200 400 200 200
14. ไซลีน (Xylene) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	200	-
15. ครีซอล (Cresol) (ส่วนในล้านส่วน)	การผลิตทั่วไป	5	-

ข้อ ๔ กรณีโรงงานใช้เชื้อเพลิงร่วมกันตั้งแต่ ๒ ประเภทขึ้นไป อากาศที่ระบายออกจาก โรงงาน ต้องมีค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศไม่เกินค่าที่กำหนด สำหรับเชื้อเพลิงประเภทที่มี สัดส่วน การใช่มากที่สุด

ข้อ ๕ การตรวจวัดค่าปริมาณของสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน แต่ ละชนิดให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

(๑) การตรวจวัดค่าปริมาณฝุ่นละออง ให้ใช้ วิธี Determination of Particulate Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้ วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๒) การตรวจวัดค่าปริมาณพลวง สารหนู ทองแดง ตะกั่ว และสารปรอท ให้ใช้ วิธี Determination of Metals Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่ง ประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้ วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๓) การตรวจวัดค่าปริมาณคลอรีน และไฮโดรเจนคลอไรด์ ให้ใช้ วิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Non-Isokinetic หรือวิธี Determination of Hydrogen Halide and Halogen Emissions from Stationary Sources Isokinetic ที่องค์การพิทักษ์ สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้ วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๔) การตรวจวัดค่าปริมาณกรดกำมะถัน ให้ใช้ วิธี Determination of Sulfuric Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศ สหรััฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้ วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๕) การตรวจวัดค่าปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ ให้ใช้ วิธี Determination of Hydrogen Sulfuric, Carbonyl Sulfide and Carbon Disulfide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์ สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA)กำหนดไว้ หรือใช้ วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

(๖) การตรวจวัดค่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ให้ใช้ วิธี Determination of Carbon Monoxide Emissions from Stationary Sources ที่องค์การพิทักษ์ สิ่งแวดล้อมแห่ง ประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA)กำหนดไว้ หรือใช้ วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า (๗) การตรวจวัดค่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ให้ใช้ วิธี Determination of Sulfur Dioxide Emissions from Stationary Sources หรือวิธี Determination of Sulfuric Acid Mist and Sulfur Dioxide Emissions from Stationary ที่ องค์การพิทักษ์

สิ่งแวดล้อมแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency : U.S. EPA) กำหนดไว้ หรือใช้วิธีตามมาตรฐานอื่นที่เทียบเท่า

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฐิติกร บุญชูวงศ์ ได้ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นโดยใช้เชื้อเพลิงต่างกันสองชนิด คือ เศษผักแห้ง และแกลบ และนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ไปเผาทำลายกลีเซอรินเพื่อนำความร้อนที่ได้ไปใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา เตาผลิตแก๊สที่ใช้ทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 cm สูง 60 cm ฐานสำหรับนำเชื้อเพลิงออกขนาด 30×15 cm เตาสามารถบรรจุเชื้อเพลิงเศษผัก และแกลบได้ 0.9 kg และ 1.2 kg ตามลำดับ ในงานวิจัยเป็นการทดลองผลของอัตราการไหลอากาศ 3 ระดับ คือ 0.738×10^{-3} 2.026×10^{-3} และ 2.435×10^{-3} m^3/s ที่มีต่อปริมาณแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สมีเทน และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ในส่วนของการเผา กลีเซอรินเพื่อผลิตเครื่องปั้นดินเผา เป็นการศึกษาลักษณะการติดไฟของกลีเซอริน และแนวโน้มความ เป็นไปได้ในการนำความร้อนมาผลิตเครื่องปั้นดินเผา จากผลการทดลองหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง จากเศษผักแห้ง และแกลบ พบว่ามีค่าความร้อน 12.39 MJ/kg และ 14.4 MJ/kg ที่ความชื้น 2.24 % และ 1.38 % มาตรฐานเปียก ตามลำดับ เมื่อนำมาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ เศษผักมี แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 15.64 % แก๊สมีเทน 0.29 % และมีค่าความร้อน 1911.92 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ 2.026×10^{-3} m^3/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดของเชื้อเพลิงเศษผัก ในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้แกลบมี แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 16.34 % แก๊สมีเทน 1.14 % และมีค่าความร้อน 2305.44 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ 2.026×10^{-3} m^3/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมที่สุดของเชื้อเพลิงแกลบ

วิรัช อรุณลักษดำรง ศึกษาเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นเพื่อผลิตแก๊สเป็นเชื้อเพลิงในการการเผาไหม้ ให้ความร้อนโดยตรง เตาผลิตแก๊สขนาดสูง 175 cm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 65 cm ใช้เชื้อเพลิง เป็นไม้โก่งาง พบว่าเชื้อเพลิงที่มีขนาดยาวมีอัตราการไหลของอากาศสูง จะทำให้อุณหภูมิภายในชั้น ต่างๆ สูง ในขณะที่เชื้อเพลิงที่มีขนาดสั้นมีอุณหภูมิในเตาต่ำกว่า แต่ให้อัตราส่วนของแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูงกว่า นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศก็มีผลต่อการเกิด แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศจะขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิง จากการศึกษา พบว่าขนาดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมมีความยาวอยู่ที่ 2-3 cm โดยมีปริมาณอากาศที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.440.51 kg/min ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนของแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ไม่ต่ำกว่า 28.7 %

สุรพงษ์ คล้ายมุข ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นและไหลลง โดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง การทดลองมีการปรับอัตราการไหลอากาศต่างกับ 3 ระดับ คือ 3.59×10^{-3} 4.31×10^{-3} และ $5.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นและ 2.33×10^{-3} 3.42×10^{-3} และ $4.66 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง เพื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสูงของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ โดยผลการทดลองนั้นพบว่า เตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น ให้ค่าความร้อนสูง 4545.9 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ $4.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ และแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงได้ค่าความร้อนสูง 2135.76 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศ $3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งจากผลการทดลองเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลอากาศ $4.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ของเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้นมีความเหมาะสมที่จะนำเอาแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากปฏิกิริยาต่างๆ ทางทฤษฎีของเตาชนิดไหลขึ้น เกิดได้ดีกว่าเตาชนิดอื่นจึงทำให้เกิดค่าความร้อนสูงมากที่สุด

อนวรรตน์ เกตุคง ศึกษาวิธีการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลคือไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือผลิตภัณฑ์แก๊ส ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งโดยศึกษาหา ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนโดโลไมต์เพื่อช่วยการ แตกตัวน้ำมันทาร์และรีฟอร์มมีเทน โดยจะศึกษาตัวแปรคือ อุณหภูมิ 500-800 °C และอัตราการป้อน ไอน้ำต่อชีวมวล 0.01-0.07 g/min/g biomass สัดส่วนของนิกเกิลบนโดโลไมต์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ชีวมวล โดยปริมาณไม้ยูคาลิปตัสที่ป้อนคือ 15 g จากผลการทดลองพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการทดลองเมื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ คือที่อัตราการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล 0.01 g/min/g biomass, อุณหภูมิ 700 °C, สัดส่วนนิกเกิล/โดโลไมต์ คือ 9.32 % ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 g โดยแก๊สผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบเมื่อ ทาการแก๊สซิฟิเคชันเปรียบเทียบระหว่างไม้ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ พบว่าหลังเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์พบองค์ประกอบของ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 42.75 % เป็น 56.45 % และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 41.23 % เป็น 45.26 % อัตราส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่า 0.58

อรรถพล โกละกะ ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินในเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นโดยใช้ ไอน้ำเข้าช่วย โดยการจำลองบริเวณชั้น รีดักชันจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นเพื่อศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันถ่านหิน ที่มีอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแปรศึกษา จากการหาภาวะที่เหมาะสมพบว่า ที่อุณหภูมิ 875 °C อัตราการไหลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 121.25 cm³/min เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันถ่านหิน โดยมีสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นองค์ประกอบสูงสุด 91.26 % มีค่า

ความร้อนสูงเฉลี่ย 9551.81 kJ/m^3 และนำภาวะดังกล่าวมาทำปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ พบว่าที่อัตราการไหลไอน้ำที่ $20 \text{ cm}^3/\text{min}$ เป็นภาวะที่องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสูงสุด โดยเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงเฉลี่ย 10551.86 kJ/m^3

Plis และ Wilk ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล ด้วยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น โดยศึกษาผลของความชื้นของชีวมวล ปริมาณอากาศ ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงพบว่า เตาผลิตแก๊สมี อัตราการใช้เชื้อเพลิง $4.1\text{-}16.0 \text{ kg/h}$ มีค่าความร้อนต่ำระหว่าง $3.84\text{-}5.47 \text{ MJ/Nm}^3$ ขึ้นอยู่กับความชื้น ในเชื้อเพลิง โดยปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงจะมากที่สุด ในกรณีที่เชื้อเพลิงมี ความชื้นน้อย ในขณะที่ความชื้นในเชื้อเพลิงเพิ่ม จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และลดปริมาณแก๊สที่เผาไหม้ได้ในแก๊สเชื้อเพลิง ส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงลดลง

Ponzio และคณะ ศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคการใช้อากาศและไอน้ำ อุณหภูมิสูง (High Temperature Air/Steam Gasification) โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ ผสมกับพลาสติก ใช้เตาผลิตแก๊ส ชนิดไหลขึ้น ป้อนอากาศผสมกับไอน้ำด้วยอุณหภูมิ 1400°C อัตราการไหล $102 \text{ Nm}^3/\text{h}$ และเปลี่ยน ส่วนผสมไอน้ำ ระหว่าง $4\text{-}82 \%$ จากผลการทดลองพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีค่าความร้อนต่ำ ประมาณ 9.5 MJ/Nm^3 ได้ปริมาณแก๊สมากที่สุด $3.4 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ซึ่งปริมาณค่าความร้อนที่มากขึ้น เป็นผล มาจากส่วนผสมพลาสติกในเชื้อเพลิง ที่มีปริมาณคาร์บอนสูง และพบว่าการผสมไอน้ำในปริมาณที่ มากขึ้น (จาก $5\text{-}53 \%$ และ 82%) จะทำให้ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ลดลง

Gordillo และ Annamalai ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงด้วยเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น จาก กากถ่านหิน โดยใช้ไอน้ำเข้าช่วย ในการทดลองเป็นการศึกษาผลของ Equivalence Ratio (ER) สัดส่วน ไอน้ำต่ออากาศ ค่าความร้อนสูง และองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าการเพิ่ม ER และสัดส่วน ไอน้ำต่ออากาศ เป็นการลดอุณหภูมิภายในเตา เพิ่มสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน และแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ แต่จะลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยค่าความร้อนสูงของแก๊ส เชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับ ER เป็นหลัก ซึ่งการเพิ่มค่าER จะทำให้ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น แต่จะมีสัดส่วนน้ำมันดินในแก๊สเชื้อเพลิงมากขึ้นด้วย

Saravanakumar และคณะ ได้จำลองศึกษาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากไม้ท่อนยาว ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 6 cm ยาว 68 cm มีความชื้นของไม้ 25% ใช้เครื่องเป่าลมขนาด 180 W และจำลองการปรับอัตราการไหลของอากาศ ระหว่าง $25\text{-}45 \text{ m}^3/\text{h}$ พบว่าภายในเตาผลิตแก๊ส มีช่วงชั้นไพโรไลซิส และชั้นรีดักชันสูง 37 cm และ 36 cm ตามลำดับ มีสัดส่วนการผลิตแก๊สมากที่สุดต่อ

น้อยที่สุด (Turn Down Ratio) ประมาณ 2 มีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 9-10 kg/h และมีอุณหภูมิภายในเตาจากชั้นเผาไหม้ 1185 K จนถึงชั้นอบแห้งที่ 400 K

Sharma และคณะ ได้ศึกษาการนำถ่านหินชนิดที่มีซัลเฟอร์ต่ำมาผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์ โดยใช้ เทคนิคการผลิตแก๊สแบบใช้น้ำเข้าช่วย (Steam Gasification) โดยในการทดลองใช้ถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าน้อยกว่า 0.05 %wt และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 650-775 °C เพื่อให้ได้องค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ปริมาณมาก ซึ่งผลการทดลองพบว่า ในแก๊ส สังเคราะห์มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ 63 % คาร์บอนมอนอกไซด์ 6 % และคาร์บอนไดออกไซด์ 30 % โดยปริมาตร โดยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ และผล การทดลองเปลี่ยนความดันย่อยของไอน้ำพบว่า ความดันย่อยไอน้ำ 0.05 atm ให้ค่าอัตราส่วน H_2/CO เป็น 1.9 และเมื่อเปลี่ยนความดันย่อยของไอน้ำเป็น 0.5 atm ค่าอัตราส่วน H_2/CO เพิ่มขึ้นเป็น 9.5

Tanthansakun ได้ศึกษากระบวนการกำเนิดแก๊สเชื้อเพลิง จากเตาผลิตแก๊สชนิดไหลขึ้น โดยใช้ ไอน้ำเข้าช่วย ในการทดลองมีการใช้ไอน้ำที่ค่าต่างๆ ผสมกับอากาศป้อนเข้าไปในเตาผลิตแก๊สที่ใช้ เชื้อเพลิงเป็นถ่าน และไม้สน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆ ที่มีต่อการกำเนิดแก๊ส ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิอากาศขาเข้า และผลของการหุ้มฉนวนพบว่า การป้อนไอน้ำเข้าช่วย มีผลให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ป้อนไอน้ำมากเกินไป แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผลิตได้จะมีปริมาณน้อยลง ในการกำเนิดแก๊สที่ใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงแบบหุ้มฉนวน และไม่หุ้มฉนวน พบว่าการหุ้มฉนวนเตาผลิตแก๊สจะทำให้ได้แก๊สที่มีค่าความร้อนสูงสุด เพิ่มขึ้นจาก 800 kJ/min เป็น 860 kJ/min และมีอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงที่ทางออกระหว่าง 100-120 °C นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราการไหลอากาศ 222.5 g/min เป็นภาวะที่เหมาะสมที่จะผลิตแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ การเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าจะทำให้ปริมาณการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง

บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบสำหรับการทดลอง

ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตจากบริษัท ศิริโรจน์รุ่งเรือง จำกัด ในพื้นที่จังหวัดลพบุรี เม็ดเชื้อเพลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 10-20 mm มีค่าความหนาแน่น (bulk density) สูง อยู่ในช่วงระหว่าง 600-700 kg/m³ มีค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยถ้ำในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดประมาณ 1.93 % ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เหว้ามัน ลำปะหูลัง ช้างข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง และเศษไม้เหลือใช้ ปีกไม้



ภาพประกอบ 14 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดบริษัท ศิริโรจน์รุ่งเรือง

ตาราง 15 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบ %
Fixed carbon	16.62
Volatile Matter	73.12
Ash	1.93
Carbon : C	45.40
Hydrogen : H	6.18

ตาราง 15 (ต่อ)

องค์ประกอบ	ปริมาณองค์ประกอบ %
Oxygen : O	46.35
Nitrogen : N	0.14
Sulfur : S	0.0
Moisture: M	8.33
HHV	17,489 kJ/kg
LHV	16,192 kJ/kg
Air Biomass Ratio: ABR_T	$4.78 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

3.2 การออกแบบเตาแก๊สชีฟเฟอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น

เตาแก๊สชีฟเฟอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น (fixed bed updraft gasifier) เป็นอุปกรณ์แปรสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยใช้อากาศเป็นตัวทำปฏิกิริยา (gasifying agent) ในการออกแบบเตาแก๊สชีฟเฟอร์จำเป็นต้องพิจารณาถึงอัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (specific gasification rate, SGR) ซึ่งมักอยู่ในช่วง 100-250 $\text{kg}/\text{m}^2\text{-h}$ (S.J. Ojolo, S.M. Abolarin and O. Adegbenro, 2012) เมื่อกำหนดให้พลังงานจากชีวมวลป้อนเข้าสู่เตาแก๊สชีฟเฟอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นสูงสุดที่ 80 kW

พลังงานจากชีวมวลอัดเม็ดป้อนเข้าเตาแก๊สชีฟเฟอร์

อัตราการป้อนพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่เครื่องผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีความสัมพันธ์กับอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดและค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ดซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

$$E_{b,in} = \frac{BFR \times LHV_b}{3600} \quad (3.1)$$

โดยที่ $E_{b,in}$ คือ พลังงานจากชีวมวลป้อนเข้าเตา (kW)
 BFR คือ อัตราการป้อนชีวมวล (kg/h)
 LHV_b คือ ค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ด (kJ/kg)

จากสมการที่ 3.1 และค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ด (LHV) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 จึงสามารถหาอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซิไฟเออร์สูงสุดได้

$$BFR = \frac{E_{b,in} \times 3600}{LHV_b} = \frac{80 \frac{kJ}{s} \times 3,600s/h}{16,192 kJ/kg} = 17.78 kg/h$$

อัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ

อัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (SGR) ด้วยเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น (Fixed Bed Updraft Gasifier) ซึ่งมักมีค่าอยู่ในช่วง 100-250 kg/m²-h เมื่อค่า SGR ยิ่งสูงส่งผลให้อัตราการป้อนชีวมวลและอัตราการป้อนอากาศสูงขึ้นและผลที่ตามมาคือความเร็วในการไหลของอากาศผ่านตะแกรงเตามีค่าเพิ่มขึ้นและความเร็วของแก๊สผ่านหน้าตัดของแก๊สซิไฟเออร์สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้อนุภาคของฝุ่นคาร์บอนและเถ้าลอยตามกระแสแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้มากขึ้น ในการออกแบบเตาแก๊สซิไฟเออร์นี้กำหนดให้ค่าอัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (Specific Gasification Rate, SGR) มีค่าสูงสุดที่ 250 kg/m²-h และอัตราการป้อนชีวมวล (BFR) ที่ 17.78 kg/h ซึ่งได้จากสมการที่ 3.1 จึงสามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัดเตาแก๊สซิไฟเออร์ได้จากสมการที่ 3.2

$$SGR = \frac{BFR}{A} \quad (3.2)$$

โดยที่ SGR คือ Specific Gasification Rate (kg/m²-h)
 BFR คือ อัตราการป้อนชีวมวล (kg/h)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดเตาแก๊สซิไฟเออร์ (m²)

จากสมการที่ 3.2 และค่าอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาสูงสุดที่ 17.78 kg/h จึงสามารถหาพื้นที่หน้าตัดของเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบสูงสุดได้

$$A = \frac{BFR}{SGR} = \frac{17.78}{250} = 0.07112 \text{ m}^2$$

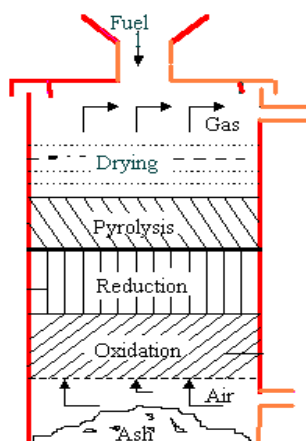
และสามารถหาเส้นผ่านศูนย์กลางเตาแก๊สซิไฟเออร์ได้จาก

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.07112}{3.14}} = 0.303 \text{ m (303 mm)}$$

ดังนั้นจึงกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเตา (D_i) มีค่า 0.305 mm และพื้นที่หน้าตัดของเตา (A) มีค่า 0.073 m²

ความสูงของห้องปฏิกิริยาในเตาแก๊สซิไฟเออร์

ความสูงของห้องปฏิกิริยาในเตาแก๊สซิไฟเออร์ (H) ต้องกำหนดให้เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งมีขั้นตอนปฏิกิริยา 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการอบแห้ง (drying) ขั้นตอนไพโรไลซิส (Pyrolysis) ขั้นรีดักชัน (Reduction) และขั้นตอนการเผาไหม้แบบบางส่วน (Partial oxidation) ในขณะที่ความสูงของ gasifier หมายถึงระยะทางทั้งหมดจากด้านบนและด้านล่างสุดของ gasifier ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรหลายตัว เช่น อัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (SGR) ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวล (ρ) และเวลาที่ต้องการให้แก๊สซิไฟเออร์ทำงานได้เมื่อการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ดังที่แสดงไว้ในสมการ 3.3 (Belonio, 2005; Panwar and Rathore, 2008): ซึ่งโดยทั่วไปความสูงของแก๊สซิไฟเออร์มักมีค่ามากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเตา (Chakraverty et al., 2003).



ภาพประกอบ 15 ชั้นปฏิกิริยาในเตาแก๊สชีฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น

ที่มา: <http://gasification.ueuo.com/technologies.html>

ความสูงของเตาแก๊สชีฟเออร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$H = \frac{SGR \times T}{\rho} \quad (3.3)$$

เมื่อ

H = ความสูงของเตาแก๊สชีฟเออร์

SGR = อัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ

T = เวลาที่ต้องการให้แก๊สชีฟเออร์ทำงานได้เมื่อการป้อนชีวมวล

เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง

$$= \frac{250 \frac{kg}{m^2 \cdot h} \times 1 h}{650 \frac{kg}{m^3}} = 0.38 m$$

จากผลการคำนวณที่ได้จึงกำหนดความสูงของแก๊สชีฟเออร์เท่ากับ 0.4 m

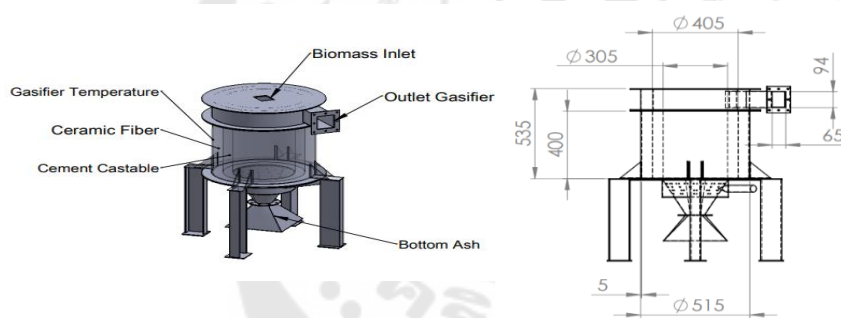
3.2.1 การสร้างเตาแก๊สชีฟเออร์

เตาแก๊สชีฟเออร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเตาแก๊สชีฟเออร์ 305 mm และพื้นที่หน้าตัด $0.073 m^2$ ด้านนอกสร้างจาก SUS304 (Stainless Steel) หนา 3 mm สูง 535 mm

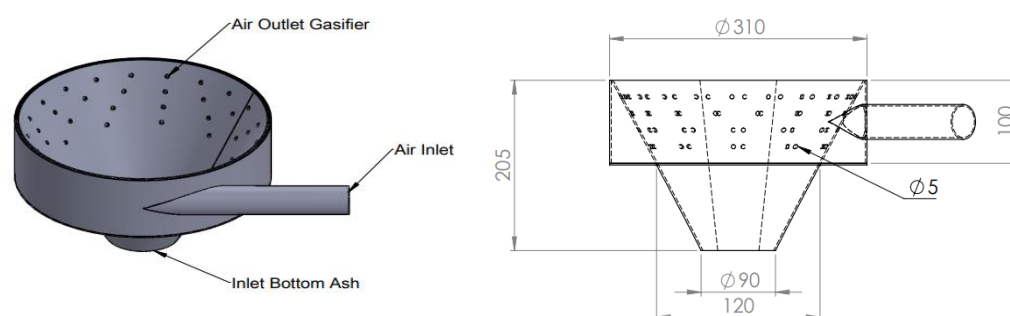
เส้นผ่านศูนย์กลาง 515 mm โดยด้านในมีการกรุณนวนและเทหล่อปูนคอนกรีตทนไฟ ซึ่งฉนวนเซรามิคไฟเบอร์ (Ceramic Fiber) มีความหนา 50 mm สามารถทนความร้อนได้ 1260 °C กรูรอบเตาแก๊สซีริไฟเออร์ หลังจากนั้นเทหล่อคอนกรีตทนไฟด้วย C60A หนา 50 mm สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 1500 °C สูง 400 mm และติดตั้งโพรบวัดอุณหภูมิ (Thermocouple K-Type) ย่านการวัด 0-1260 °C ที่ระดับความสูงจากพื้นของเตาแก๊สซีไฟเออร์ 355 mm ด้านบนของเตาแก๊สซีไฟเออร์จะมีช่องรับชีวมวลอัดเม็ดขนาดกว้าง 70 mm ยาว 95 mm ที่มาจากโรตารีแอร์ลอค โดยมีตะแกรงรองด้านล่าง ด้านข้างมีทางออกของแก๊สซีไฟเออร์ ขนาดกว้าง 64 mm ยาว 94 mm เพื่อส่งแก๊สเชื้อเพลิงส่งเคราะห์ไปเผาไหม้

3.2.2 ก่อหลอม

ก่อกหลอมจะติดตั้งอยู่ใต้เตาแก๊สซีไฟเออร์ โดยได้รับลมจากชุดควบคุมอัตราการป้อนอากาศและเป็นที่เก็บเถ้าหนัก หลังจากอากาศทำปฏิกิริยากับชีวมวลอัดเม็ดแล้วจะเหลือเถ้าหนักโดยก่อกหลอมจะแบ่งเป็น 2 ห้อง



ภาพประกอบ 16 เตาแก๊สซีไฟเออร์

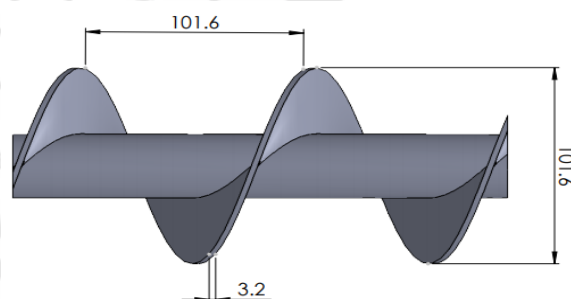


ภาพประกอบ 17 ก่อกหลอม

การแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นหรือเรียกว่าเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น (fixed bed updraft gasifier) ซึ่งเป็นแก๊สซิไฟเออร์อย่างง่ายโดยมีหลักการทำงานแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนคือ การอบแห้ง (drying) การไพโรไลซิส (Pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และการเผาไหม้แบบบางส่วน (Partial oxidation) ได้ผลผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ขึ้นที่มีการปนเปื้อนด้วยเถ้าลอย และน้ำมันดินโดยเถ้าลอยที่มีฝุ่นคาร์บอนซึ่งไม่ถูกแปรสภาพให้เป็นแก๊สผสมอยู่มักจะจับตัวกับน้ำมันดินเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีอุณหภูมิลดต่ำ ลงในท่อส่งแก๊สเป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันในท่อส่งแก๊สและพลังงานจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ลดลง

3.3 สกรูลำเลียงและโรตารีแอร์ล็คควาล์วป้อนชีวมวลอัดเม็ด

ชีวมวลอัดเม็ดถูกลำเลียงจากถังเก็บและถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยเกลิวลำเลียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ระยะพิท 4 นิ้ว มีความเร็วรอบสูงสุดที่ 1.75 rpm และสามารถปรับความเร็วรอบลดลงได้ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดไหลเข้าสู่โรตารีแอร์ล็คควาล์วและถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ตามลำดับ



ภาพประกอบ 18 ชุดควบคุมอัตราการป้อนของชีวมวลอัดเม็ด

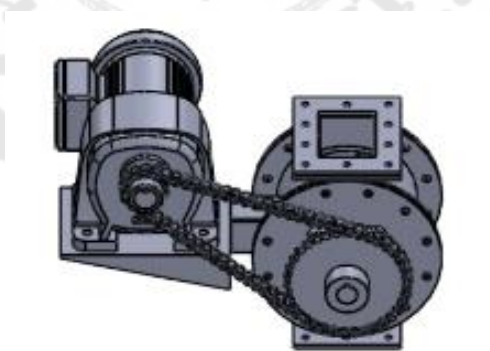
3.3.1 สกรูลำเลียง

สกรูลำเลียงถูกสร้างขึ้นโดยให้มีอัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดสูงสุดที่ 23 kg/h ซึ่งใบสกรูเป็นแบบสกรูใบเต็มระยะพิทมาตรฐาน (Single Flight Standard Pitch) ยาว 2500 mm ความหนาของใบสกรู 3.20 mm สร้างจากวัสดุ SS400 Steel Plate เพลากลางขับใบ สกรูใช้ท่อเหล็กดำขนาด 25.40 mm ปลายทั้งสองด้านเชื่อมด้วยเหล็กเพลาดันขนาด 25.40 mm และใช้แบริ่ง UCF205 เพื่อทำให้เกิดการหมุนของใบสกรู ส่วนเพลาดันด้านขับใช้ Sprocket RS25-13TH มอเตอร์เกียร์ใช้ Sprocket RS25-50TH และโซ่ RS25 ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุปริมาตรมวลชนิด

ต่างๆ นั้นได้ถูกจำแนกประเภทเอาไว้ตามมาตรฐานของ CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) และใช้รางสกรูลำเลียงแบบท่อกลมซึ่งสามารถไม่ให้ชีวมวลอัดเม็ดไหลย้อนกลับตามแรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นท่อเหล็กดำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 114.30 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 107.90 mm ความหนา 3.20 mm ซึ่งส่งกำลังด้วยมอเตอร์เกียร์ขนาด 0.1 kW 220 V อัตราทด 1 : 200

3.3.2 โรตารีแอร์ล็อคควาล์ว

โรตารีแอร์ล็อคควาล์วเป็นอุปกรณ์หมุนจ่ายวัสดุจากด้านบนลงสู่ล่างและสามารถรักษาแรงดันระหว่างด้านบนกับด้านล่างระหว่างหมุนจ่าย เพื่อลดปริมาณการรั่วไหลของแก๊สในขณะกำลังผลิตแก๊ส ซึ่งมีอัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดสูงสุดที่ 23 kg/h โดยที่ Rotor สร้างจากวัสดุ SS400 Steel Plate แบ่งออกเป็น 6 ช่อง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 154.10 mm เชื่อมติดกับเพลาดันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm ลดขนาดปลายเพลาเพลาทั้ง 2 ข้าง เหลือ 25 mm เพื่อประกอบแบริ่ง UCF205 body ทำจากท่อ SCH40 หนา 7 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน 168.30 mm ยาว 120 mm ส่วนเพลาชั้ใช้ Sprocket RS25-13TH ซึ่งส่งกำลังด้วยมอเตอร์เกียร์ขนาด 0.1 kW 220 V อัตราทด 1 : 200 ใช้ Sprocket RS25-50TH และโซ่ RS25 โดยมีความเร็วรอบสูงสุดที่ 1.75 rpm สามารถปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่ความถี่สูงสุด 50 Hz และช่องทางเข้า-ออกของชีวมวลอัดเม็ดมีขนาดกว้าง 65 mm ยาว 90 mm

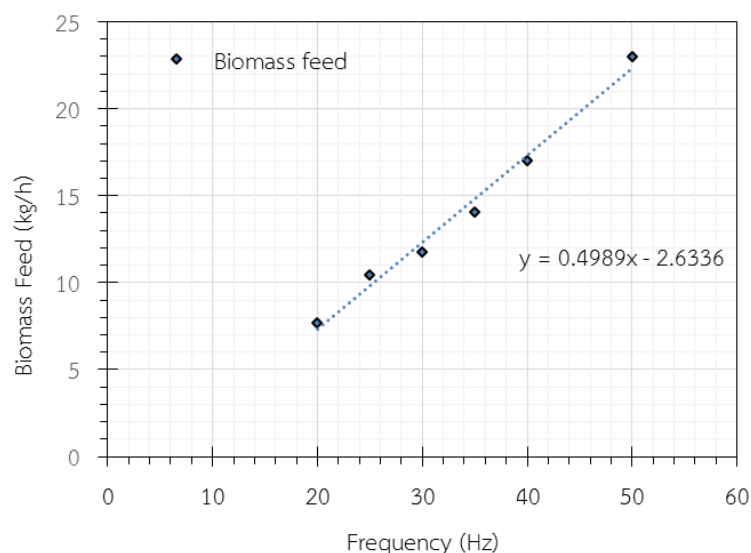


ภาพประกอบ 19 โรตารีแอร์ล็อคควาล์ว

3.3.3 ผลการสอบเทียบชุดลำเลียงเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่เตาผลิตแก๊ส

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดถูกลำเลียงด้วยสกรูลำเลียง (screw conveyor) ผลการสอบเทียบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดแสดงในภาพประกอบ 21 ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของการหมุนของชุดสกรูลำเลียงชีวมวลกับอัตราการไหลของชีวมวล เมื่อสกรู

ลำเลียงหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุดและต่ำสุดที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 50 และ 20 Hz ส่งผลให้อัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดมีค่า 25 และ 7 kg/h ตามลำดับ ซึ่งอัตราการไหลของชีวมวลจริงต่ำกว่าอัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดที่คำนวณได้ประมาณ 20-25 %



ภาพประกอบ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการหมุนของชุดบ้อนชีวมวล
กับอัตราการบ้อนชีวมวล

3.4 ชุดบ้อนอากาศสำหรับชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

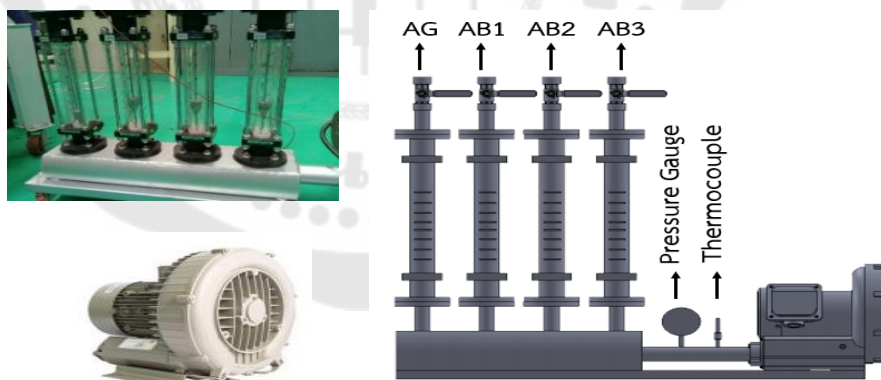
อากาศถูกบ้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเครื่องเป่า (Norvax NVT-150, 1.6 kW) อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบการหมุนของเครื่องเป่าและความเร็วรอบการหมุนถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Delta FVD-MS300) อุณหภูมิอากาศถูกวัดด้วยโพรบวัดอุณหภูมิ (Thermocouple K-Type) ความดันอากาศถูกวัดด้วยเกจวัดความดัน (Bourdon, 0-10 kPa) อากาศถูกแยกเป็น 4 ส่วน และถูกวัดอัตราการไหลแต่ละส่วนด้วยโรตาริเตอร์ (Double Ring LZB-25, 5-50 m³/h) และสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศแต่ละส่วนถูกปรับแบ่งด้วยวาล์วขนาด 1 นิ้ว (KITZ-316, 600 UTKM) ที่ติดตั้งอยู่เหนือโรตาริเตอร์ โดยอากาศส่วนแรกใช้สำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และอีก 3 ส่วนใช้สำหรับเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อากาศส่วนที่ 1 (AG) ถูกบ้อนเข้าสู่ส่วนล่างโดยรอบห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยอากาศส่วนนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดได้ผลผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

- อากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้าบริเวณด้านบนของห้องผลิตแก๊สในตำแหน่งปลายท่อป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องผลิตแก๊สเพื่อทำหน้าที่ 2 อย่างคือ 1. เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกจากท่อป้อนชีวมวล 2. เพื่อช่วยเผาทำลายน้ำมันดิน, สารระเหย และฝุ่นคาร์บอนซึ่งทำให้อุณหภูมิในห้องสังเคราะห์แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงขึ้นและช่วยให้เกิดเสถียรภาพในการติดไฟในหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์อีกทั้งยังช่วยลดคาร์บอนในถ้ำลอย

- อากาศส่วนที่ 3 (AB2) เป็นอากาศที่ใช้สำหรับเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่หัวเผานำร่อง (Pilot burner) ซึ่งถูกเปิดให้ทำงานตั้งแต่เริ่มการเดินเครื่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่ปลายหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงกว่า 700°C หัวเผานำร่องนี้จะหยุดการทำงานโดยการหยุดจ่ายแก๊ส LPG โดยอัตโนมัติ ในขณะที่อากาศส่วนนี้ยังคงไหลเข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องภายในห้องเผาไหม้ส่วนต้นของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน ที่บริเวณนี้ถ้ำลอยที่ไหลมากับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จะถูกเหวี่ยงและตกลงสู่ถังเก็บถ้ำลอย

- อากาศส่วนที่ 4 (AB3) เป็นอากาศที่ป้อนเข้าสู่ท่อเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนเพื่อทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ซึ่งส่งผลให้ได้แก๊สร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงและมีความลพิษต่ำ

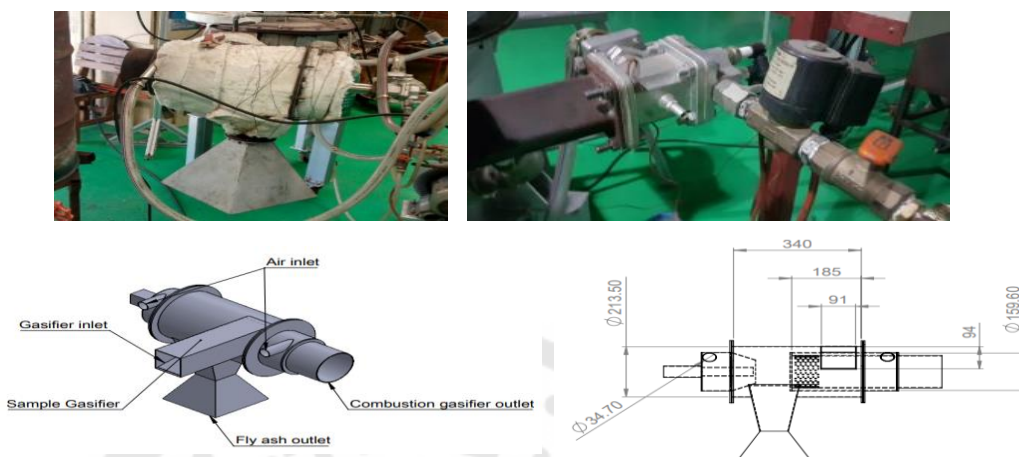


ภาพประกอบ 21 ชุดป้อนอากาศสำหรับชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

3.5 หัวเผาแบบไซโคลน

หัวเผาแบบไซโคลนได้นำหลักการของไซโคลนดักฝุ่นมาประยุกต์ใช้งาน เพื่อดักถ้ำลอยในแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ส่งมาจากเตาแก๊สซิฟิเคอร์ และติดตั้ง Pilot Burner ที่ด้านท้ายของหัว

เผาแบบไซโคลน เพื่อจุดนำร่อง ก่อนที่จะผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดย Pilot Burner จะใช้โซลินอยด์วาล์วควบคุมการปิดเปิดแก๊ส LPG ภาพประกอบ 23



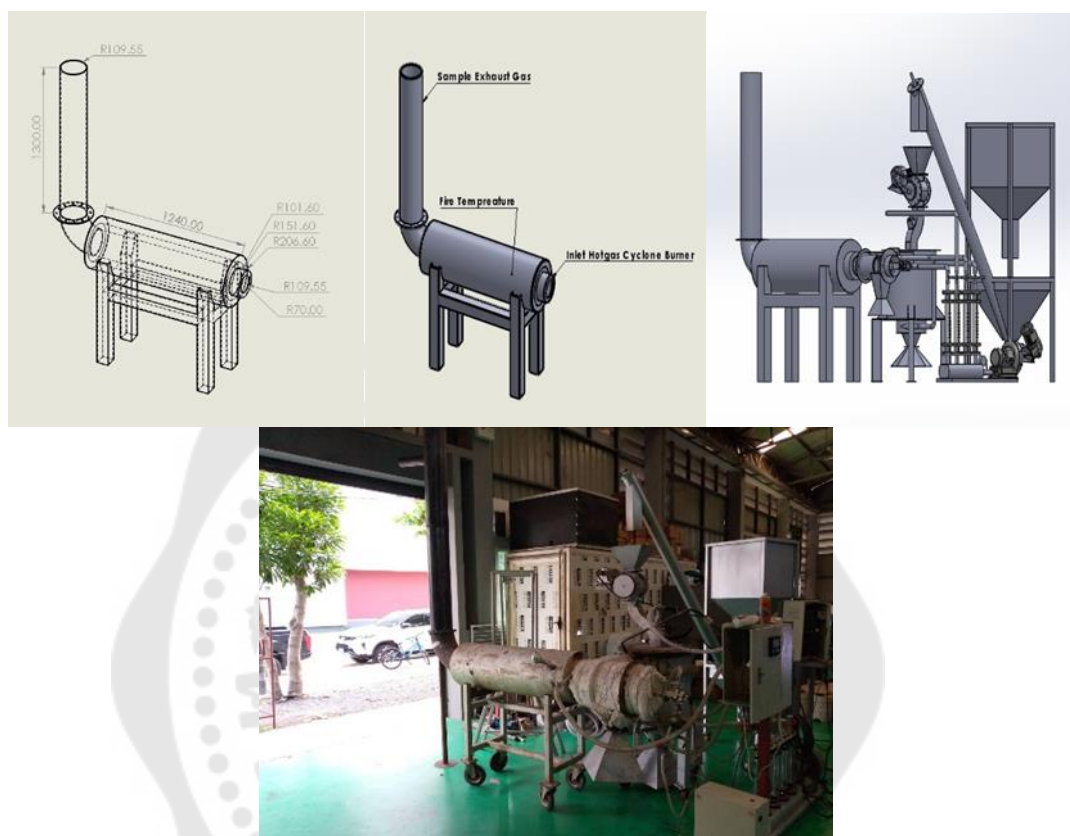
ภาพประกอบ 22 หัวเผาแบบไซโคลนและ Pilot Burner

หัวเผาแบบไซโคลน มีขนาดทางเข้าที่ต่อกับเตาผลิตแก๊สซิไฟเออร์กว้าง 94 mm ยาว 91 mm ความยาวของช่องทางออกแก๊ส 185 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออก 159.60 mm ความสูงของไซโคลนช่วงที่เป็นทรงกระบอก 340 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวเรือนไซโคลน 213.50 mm ด้านท้ายและด้านหัวไซโคลนใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34.70 mm ฉายอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ด้านนอกของหัวเผาแบบไซโคลนหุ้มฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic Fiber) มีความหนา 50 mm

3.6 ห้องรับเปลวไฟ

ห้องรับเปลวไฟต่อกับส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน ห้องรับเปลวไฟทำจากท่อคอนกรีตทนไฟมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 200 mm ยาว 1240 mm ทำจากคอนกรีตทนไฟทนไฟ Cast 18 หนา 50 mm และมีการกรุทับด้วยฉนวนเซรามิกไฟเบอร์ (1,260 °C) หนา 50 mm และปิดทับด้วยเหล็กแผ่นหนา 5 mm เป็นผนังชั้นนอก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 310 mm ซึ่งห้องรับเปลวไฟออกแบบมาเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนผ่านผนังสู่ภายนอกทำให้ได้อุณหภูมิเปลวไฟสูงเข้าใกล้อุณหภูมิเปลวไฟแอดิแบติก และเพื่อวัดอุณหภูมิเปลวไฟจึงมีการติดตั้งโพรบวัดอุณหภูมิจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K ช่วงอุณหภูมิใช้งาน -270 ถึง + 1370 °C และช่วงอุณหภูมิที่ควรใช้งาน -270

ถึง $+ 1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยส่วนปลายของห้องรับเปลวไฟเป็นปล่องไอเสียที่ทำด้วยวัสดุเหล็ก และมีช่องสำหรับวัดองค์ประกอบของไอเสียและวัดฝุ่นละออง

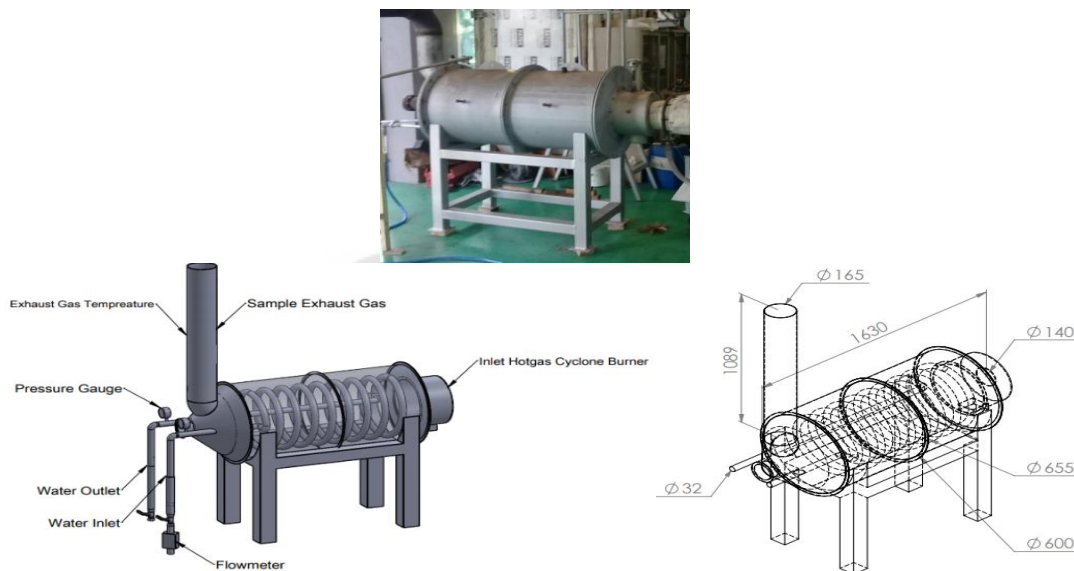


ภาพประกอบ 23 ห้องรับเปลวไฟ

3.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อมีลักษณะคล้ายเซลล์และท่อ โดยมีแก๊สร้อนจากหัวเผาแบบไซโคลนไหลออกสู่บรรยากาศและน้ำไหลเข้าเป็นแบบสวนทางกัน โดยส่วนหัวจะต่อกับหัวเผาแบบไซโคลน ซึ่งเจาะรูมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 140 mm และติดตั้งโพรบวัดอุณหภูมิของการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ซึ่งความยาวทั้งหมดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1630 mm ส่วนท้ายด้านบนจะติดตั้งท่อระบายแก๊สเสียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 165 mm สูง 1089 mm ซึ่งมีจุดเก็บตัวอย่างแก๊สเสียและโพรบวัดอุณหภูมิรวมอยู่ด้วย ท้ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนปิดด้วยฝาเหล็กหล่อคอนกรีตทนไฟ โดยมีกระจกทดไฟหนา 15 mm เพื่อให้สามารถมองเห็นเปลวไฟได้เซลล์ ทำจาก SS400 Steel Plate หนา 5 mm ม้วนเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 655 mm เทหหล่อด้วยคอนกรีตทนไฟ C60A หนา 50 mm และเส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายใน 600 mm ขดท่อใช้ท่อ SUS304 แบบไม่มีตะเข็บขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 mm
 ม้วนเป็นขดยาว 18 ขด ทางเข้าของน้ำเข้าติดตั้งมิเตอร์วัดขนาด 1.5 m³/h และติดตั้งโพรบวัด
 อุณหภูมิทั้งน้ำเข้าและออก ภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 24 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ

ความร้อนที่ได้จากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกถ่ายเทให้น้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนและไอน้ำ โดยอัตราการรับความร้อนโดยน้ำและประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ของการนำพลังงานจากชีวมวลไปใช้ในการต้มน้ำแสดงในสมการที่ 3.7 และ 3.8

$$Q_u = \dot{m}_w \times ((h_{f,out} + xh_{fg,out}) - h_{f,in}) \quad (3.4)$$

$$Thermal\ Efficiency = \frac{Q_u}{E_{b,in}} \quad (3.5)$$

เมื่อ Q_u = ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kw)
 $\dot{m}_w$ = อัตราการไหลของน้ำป้อน (kg/h)
 $h_{f,in}$ = เอนทัลปีของน้ำป้อน (kJ/kg)

$h_{f,out}, h_{fg,out}$ = เอนทัลปีของน้ำอิ่มตัว และเอนทัลปีในการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่อุณหภูมิ ทางออกของไอน้ำ (kJ/kg)

x = คุณภาพไอน้ำที่ทางออกของไอน้ำ

3.8 การวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาแก๊สซิไฟเออร์ถูกชักตัวอย่างเพื่อวัดและวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์(Syngas) ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus ซึ่งแก๊สที่วิเคราะห์ประกอบด้วย CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , O_2 และค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ดิบก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์จะถูกกำจัดน้ำและฝุ่นออกจากแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ก่อน อีกทั้งภายในตัวเครื่องวิเคราะห์ยังมีชุดอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อควบแน่นน้ำก่อนเข้าสู่หน่วยวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส

ตาราง 16 รายละเอียดของเซนเซอร์ที่ติดตั้งในเครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas) ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus

ชนิดก๊าซ	ช่วงในการวัด	ความละเอียดในการวัด	วิธีการวัด
ออกซิเจน, O_2	0 ถึง 25 %	0.01 %	Electrochemical Cell
คาร์บอนมอนอกไซด์, CO	0 –100%	0.01 %	NDIR multi-Gas bench
คาร์บอนไดออกไซด์, CO_2	0 –100%	0.01 %	NDIR multi-Gas bench
มีเทน, CH_4	0 –100%	0.01 %	NDIR multi-Gas bench
ไฮโดรเจน, H_2	0 –100%	0.01 %	TCD Thermal conductivity



ภาพประกอบ 25 เครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas)
ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus

3.9 การวัดองค์ประกอบของแก๊สเสียจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

แก๊สไอเสียจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนถูกชักตัวอย่างเพื่อวัดและวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สไอเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส TESTO (Flue Gas Analyzer 350XL) ซึ่งแก๊สที่วิเคราะห์ประกอบด้วย CO , NO_x , SO_x , O_2 , CO_2



ภาพประกอบ 26 เครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียจากปล่องอุตสาหกรรม
ยี่ห้อ TESTO รุ่น 350 XL

3.10 การวัดฝุ่นละอองจากปล่องไอเสีย

ฝุ่นละออง (Total Suspended Particulate) ชักตัวอย่างแก๊สไอเสียด้วยวิธีไอโซไคเนติก (Isokinetic Method) ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างแก๊สไอเสียประมาณ 1.0 ลูกบาศก์เมตร โดยการสูบลตัวอย่างแก๊สไอเสียเข้ามาด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของกระแสแก๊สไอเสียภายในปล่องผ่าน Glass Fiber Filter โดยที่ Glass Fiber Filter ที่ใช้ถูกควบคุมความชื้นตลอด 24 ชั่วโมงและชั่งน้ำหนักก่อนนำมาใช้ชักฝุ่น เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองนำกระดาศกรองมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณฝุ่นละอองด้วยวิธี Pre and Post Weigh Difference ตามวิธีมาตรฐานของ U.S. EPA Method 5 “Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources”



ภาพประกอบ 27 ชุดอุปกรณ์เก็บตัวอย่างแก๊สไอเสียเพื่อหาปริมาณฝุ่นละออง

3.11 การออกแบบการทดลองของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์คือแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น (fixed bed updraft gasifier) รูปทรงกระบอกตั้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.305 m พื้นที่หน้าตัดคงที่ที่ 0.073 m^2 สร้างด้วยปูนทนไฟและถูกห่อด้วยฉนวนเซรามิคและฉนวนโลหะ เมื่อกำหนดค่าอัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (specific gasification rate, SGR) อยู่ในช่วง $100\text{--}250 \text{ kg/m}^2\text{-h}$ จึงสามารถคำนวณหาอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด (Biomass Feed Rate : BFR)

ได้ในช่วง 7.30-18.25 kg/h และจากค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่า 16,192 kJ/kg จึงคำนวณหาค่าพลังงานจากชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ในช่วง 33-82 kW ตามลำดับ และอากาศส่วนแรก (AG) ถูกป้อนเข้า สู่แก๊สซิไฟเออร์ที่อัตราการไหลในช่วง 11.67-29.18 kg/h เมื่อกำหนดให้ ER มีค่าเท่ากับ 0.29 ในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์กำลังไหลออกจากแก๊สซิไฟเออร์มีอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้ามาผ่านท่อลำเลียงเม็ดเชื้อเพลิงจากด้านบน ของแก๊สซิไฟเออร์ซึ่งอากาศส่วนนี้ช่วยป้องกันแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ย้อนออกช่องทางป้อนเม็ดเชื้อเพลิงและช่วยเผา ทำลายฝุ่นคาร์บอน น้ำมันดิน และแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์บางส่วน ทำให้อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงขึ้นขณะไหลเข้าสู่หัวเผาทำให้หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีเสถียรภาพในการติดไฟดีขึ้น หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนที่พัฒนาขึ้นใหม่มีหลักการทำงานคือแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ร้อนที่มี ฝุ่น และเถ้าลอยเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนและผสมกับอากาศส่วนที่ 3 (AB2) แล้วเกิดการเผาไหม้ เถ้าลอยถูกเหวี่ยงตก ลงสู่ถังเก็บในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่กำลังเกิดการเผาไหม้ไหลเข้าสู่ท่อเผาไหม้ซึ่งเป็นห้องเผาไหม้ส่วนปลายของ หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กับอากาศส่วนที่ 4 (AB3)

3.11.1 อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อากาศส่วนที่ 1 (AG) ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างโดยรอบห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยอากาศส่วนนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดได้ผลผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยอากาศส่วนที่ 1 หาได้จากอัตราส่วนอากาศสมมูล (equivalence ratio:ER)

อัตราส่วนอากาศสมมูล

อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio, ER) คือ อัตราส่วนระหว่างสัดส่วนผสมระหว่างอากาศกับชีวมวลสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเทียบกับสัดส่วนผสมระหว่างอากาศกับชีวมวลสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎีโดยทั่วไป ค่า ER มีค่าอยู่ในช่วง 0.25-0.45 ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.3 และอัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหาได้จากสมการที่ 3.4

$$ER = \frac{\frac{AFR_G}{BFR}}{\frac{AFR_{th}}{BFR}} = \frac{ABR_G}{ABR_{th}} \quad (3.6)$$

โดยที่ AFR_G คือ อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (kg/h)

AFR_{th} คือ อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี (kg/h)

ABR_G คือ อัตราส่วนอากาศต่อชีวมวลสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

ABR_{th} คือ อัตราส่วนอากาศต่อชีวมวลสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี

BFR คือ อัตราการป้อนชีวมวล (kg/h)

ดังนั้นอัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ด้วยเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$AG = AFR_G = ER \times AFR_{th} = ER \times ABR_{th} \times BFR \quad (3.7)$$

เมื่อ AG = อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

3.11.2 อัตราการป้อนอากาศเพื่อเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อัตราการป้อนอากาศสำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ($AFR_{C,syngas}$) หาได้จากสมการที่ 3.5 ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างอัตราส่วนอากาศส่วนเกินกับผลต่างระหว่างอัตราการป้อนอากาศทางทฤษฎีและอัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยสัดส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess Air, EA) มีค่าประมาณ 10-20 % ของอากาศทางทฤษฎี สำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และอากาศทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้แบบสมบูรณ์หาได้จากสมการที่ 3.6

$$AFR_{C,syngas} = EA \times (AFR_{th} - AFR_G) = EA \times (1 - ER) \times AFR_{th} \quad (3.8)$$

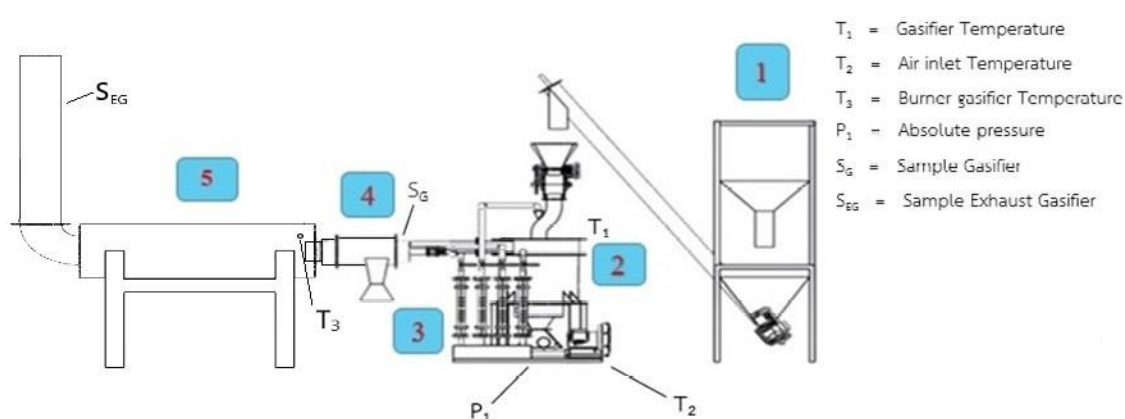
$$AFR_{th} = BFR \times ABR_{th} \quad (3.9)$$

อัตราการป้อนอากาศสำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ($AFR_{C,syngas}$) ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ อากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้ามาผ่านท่อลำเลียงเม็ดเชื้อเพลิงจากด้านบนของแก๊สซิไฟเออร์ซึ่งอากาศส่วนนี้ช่วยป้องกันแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ย้อนออกช่องทางป้อนเม็ดเชื้อเพลิงและช่วยเผาทำลายฝุ่นคาร์บอน น้ำมันดิน และแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์บางส่วน อากาศส่วนที่ 3 (AB2) ถูกป้อนเข้าเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในห้องเผา

ไหม้แบบไซโคลนส่วนต้น และอากาศส่วนที่ 4 (AB3) ถูกป้อนเข้าหัวเผาแบบไซโคลนเพื่อเผาไหม้กับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในห้องเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

3.12 การทดลองผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ชีวมวลอัดเม็ดถูกแปรสภาพเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น มีการวัดอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์และที่ช่องทางออกจากเตาแก๊สซีไฟเออร์ อีกทั้งมีการวัดค่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Syngas) ยี่ห้อ MRU รุ่น VARIO Plus RMU จากนั้นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกเผาไหม้ภายในหัวเผาแบบไซโคลนและส่วนปลายของเปลวไฟผ่านห้องรับเปลวไฟ ณ จุดนี้มีการวัดอุณหภูมิเปลวไฟ จากนั้นแก๊สไอเสียจะไหลออกสู่ปล่องไอเสีย โดยที่ปล่องไอเสียจะมีการชักตัวอย่างไอเสียเพื่อตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส TESTO (Flue Gas Analyzer 350XL) และมีการวัดปริมาณฝุ่นตามวิธีมาตรฐานของ U.S. EPA Method 5 “Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources”



ภาพประกอบ 28 แผนภาพของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
ต่อกับห้องรับเปลวไฟ

3.12.1 เงื่อนไขการทดลอง

ข้อกำหนดเงื่อนไขการทดลองผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ คือ 10.9 , 14.04 และ 17.04 kg/h เพื่อให้สอดคล้องกับค่า SGR 3 ระดับคือ 150, 192 และ 233 kg/m²-h

ขั้นตอนการคำนวณหา Specific Gasification Rate ที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ โดยพื้นที่หน้าตัดเตาเท่ากับ 0.073 m²

$$\text{ที่อัตราการป้อนชีวมวล } 10.9 \text{ kg/h} \quad SGR = \frac{10.9 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0.073 \text{ m}^2}$$

$$SGR = 150 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2-\text{h}}$$

$$\text{ที่อัตราการป้อนชีวมวล } 14.04 \text{ kg/h} \quad SGR = \frac{14.04 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0.073 \text{ m}^2}$$

$$SGR = 192 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2-\text{h}}$$

$$\text{ที่อัตราการป้อนชีวมวล } 17.04 \text{ kg/h} \quad SGR = \frac{17.04 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0.073 \text{ m}^2}$$

$$SGR = 233 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2-\text{h}}$$

คำนวณหาพลังงานจากชีวมวล (kW)

$$\begin{aligned} \text{การะความร้อนต่ำ} &= \frac{10.9 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 16,192 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3600 \text{ s}} \\ &= 49 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{การะความร้อนปานกลาง} &= \frac{14.04 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 16,192 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3600 \text{ s}} \\ &= 63 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{การะความร้อนสูง} &= \frac{17.04 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 16,192 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3600 \text{ s}} \\ &= 77 \text{ kW} \end{aligned}$$

หาอัตราการปล่อยอากาศผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยค่า ER มีค่าอยู่ในช่วง 0.25-0.45

คำนวณหาอัตราการปล่อยอากาศ $AG = \text{อัตราการปล่อยอากาศเชิงมวลรวม} \times ER$

ที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.9 kg/h $AG = 63.25 \frac{kg}{h} \times 0.29$

$$AG = 18.40 \frac{kg}{h}$$

ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h $AG = 81.65 \frac{kg}{h} \times 0.296$

$$AG = 24.15 \frac{kg}{h}$$

ที่อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h $AG = 97.75 \frac{kg}{h} \times 0.29$

$$AG = 28.75 \frac{kg}{h}$$

คำนวณหาอัตราการปล่อยอากาศ $AB1 = EA \times \text{อัตราการปล่อยอากาศรวมเชิงมวล} \times (1-ER)$ โดย EA มีค่าประมาณ 10-20 % ของอากาศทางทฤษฎี

ที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.9 kg/h $AB1 = 0.18 \times 63.25 \frac{kg}{h} \times (1 - 0.29)$

$$AB1 = 8.05 \frac{kg}{h}$$

ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h $AB1 = 0.16 \times 81.65 \frac{kg}{h} \times (1 - 0.296)$

$$AB1 = 9.2 \frac{kg}{h}$$

ที่อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h $AB1 = 0.165 \times 97.75 \frac{kg}{h} \times (1 - 0.29)$

$$AB1 = 11.5 \frac{kg}{h}$$

$$\text{คำนวณหาอัตราการป้อนอากาศ } AB2,3 = \frac{\text{อัตราการป้อนอากาศรวมเชิงมวล} - (AG + AB1)}{2}$$

$$\text{ที่อัตราการป้อนชีวมวล } 10.9 \text{ kg/h} \quad AB2,3 = \frac{63.25 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \left(18.40 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 8.05 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)}{2}$$

$$AB2,3 = 18.40 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{ที่อัตราการป้อนชีวมวล } 14.04 \text{ kg/h} \quad AB2,3 = \frac{81.65 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \left(24.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 9.2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)}{2}$$

$$AB2,3 = 24.15 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{ที่อัตราการป้อนชีวมวล } 17.04 \text{ kg/h} \quad AB2,3 = \frac{97.75 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - \left(28.75 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 11.5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)}{2}$$

$$AB2,3 = 28.75 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

3.12.2 การปรับอัตราการไหลของอากาศที่สัมพันธ์กับอัตราการป้อนชีวมวล

การปรับอัตราการไหลของอากาศที่สัมพันธ์กับอัตราการป้อนชีวมวลที่เข้าสู่ชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อากาศที่ป้อนเข้าสู่ชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกออกแบบให้แบ่งเป็น 4 ส่วน ตามแนวคิดการผลิตแก๊สร้อนสะอาด โดยอากาศ 2 ส่วนแรกใช้สำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยป้อนเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์และอากาศ 2 ส่วนหลังใช้สำหรับเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (syngas) โดยป้อนเข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนมีรายละเอียดดังนี้

- อากาศส่วนที่ 1 (AG) ถูกป้อนเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์ส่วนล่างเพื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ห้องปฏิกิริยาที่ซึ่งชีวมวลจะเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันทำให้ได้ผลผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจะไหลขึ้นด้านบนสวนทางกับการตกลงของเม็ดเชื้อเพลิง

- อากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้าบริเวณด้านบนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ในตำแหน่งปลายท่อป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องผลิตแก๊สเพื่อทำหน้าที่ 2 อย่างคือ 1. เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกทางท่อป้อนชีวมวล 2. เพื่อช่วยเผาทำลายน้ำมันดิน, สารระเหย

และฝุ่นคาร์บอนซึ่งทำให้อุณหภูมิในท่อส่งแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงขึ้นและช่วยให้เกิดเสถียรภาพในการติดไฟในหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์อีกทั้งยังช่วยลดคาร์บอนในถ้ำลอย

- อากาศส่วนที่ 3 (AB2) เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่หัวเผานำร่อง (Pilot burner) ซึ่งถูกเปิดให้ทำงานตั้งแต่เริ่มการเดินเครื่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่ปลายหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงกว่า 700 °C หัวเผานำร่องนี้จะหยุดการทำงานโดยการหยุดจ่ายแก๊ส LPG โดยอัตโนมัติในขณะที่อากาศส่วนนี้ยังคงไหลเข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องภายในห้องเผาไหม้ส่วนต้นของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนที่บริเวณนี้ ถ้ำลอยที่ไหลมากับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จะถูกเหวี่ยงและตกลงสู่ถังเก็บถ้ำลอย

- อากาศส่วนที่ 4 (AB3) เป็นอากาศที่ป้อนเข้าสู่ท่อเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนเพื่อทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้ได้แก๊สร้อนระดับอุณหภูมิสูงและมีค่ามลพิษต่ำ

ผลการคำนวณหาอัตราการป้อนอากาศโดยมวลและโดยปริมาตรทั้งสี่ส่วนซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหลโดยมวลของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ 3 ระดับคือ 10.9 , 14.04 และ 17.04 kg/h ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 17 และ 18

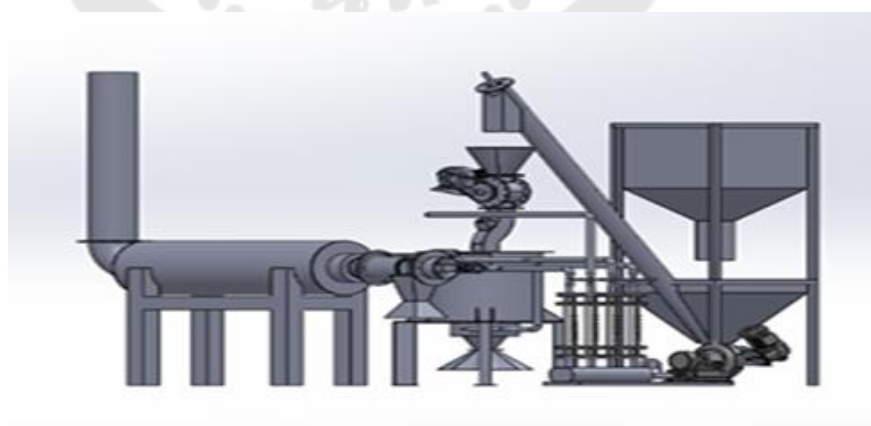
ตาราง 17 อัตราการป้อนอากาศเชิงมวลที่สอดคล้องกับอัตราการป้อนชีวมวล

อัตราการป้อน ชีวมวลอัดเม็ด (BFR) (kg/h)	อัตราการป้อน พลังงานจาก ชีวมวล (kW)	Specific Gasification Rate (kg/m ² -h)	อัตราการป้อน อากาศเชิงมวล (kg/h)				อัตราการป้อน อากาศรวม เชิงมวล (kg/h)
			AG	AB1	AB2	AB3	
10.90	49	150	18.40	8.05	18.40	18.40	63.25
14.04	63	192	24.15	9.20	24.15	24.15	81.65
17.04	77	233	28.75	11.5	28.75	28.75	97.75

ตาราง 18 การทดลองผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลที่อัตราการป้อนอากาศเชิงปริมาณ

อัตราการป้อน ชีวมวลอัดเม็ด (BRF) (kg/h)	อัตราการป้อน พลังงานจาก ชีวมวล (kW)	อัตราการป้อน อากาศเชิงปริมาณ (m ³ /h)				อัตราการป้อนอากาศรวม เชิงปริมาณ (m ³ /h)
		AG	AB1	AB2	AB3	
10.90	49	16	7	16	16	55
14.04	63	21	8	21	21	71
17.04	77	25	10	26	26	85

หมายเหตุ อากาศที่เข้าสู่โรตารี่เตามีความหนาแน่นระหว่าง 1.151-1.155 kg/m³



ภาพประกอบ 29 ชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่อกับห้องรับเปลวไฟ

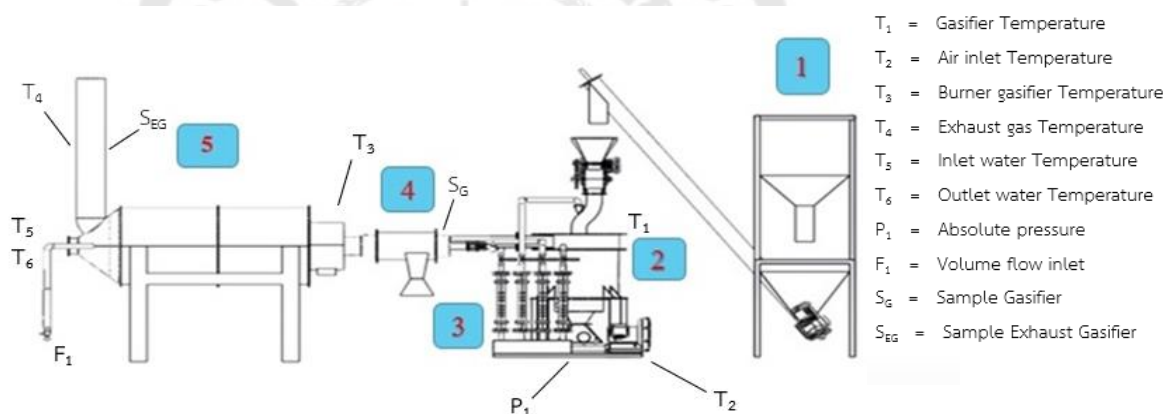
3.13 การทดลองนำความร้อนจากหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

เตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และถูกเผาด้วยหัวแบบไซโคลนซึ่งส่งผลให้ได้แก๊สร้อนสะอาดที่ระดับอุณหภูมิสูงและมีความลพิษต่ำ โดยแก๊สร้อนสะอาดจะไหลเข้าสู่เครื่องต้มน้ำเพื่อนำความร้อนที่ได้ไปใช้ประโยชน์

3.15.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ

1. ชุดควบคุมอัตราการป้อนของชีวมวลอัดเม็ด
2. เตาแก๊สซีฟเฮอร์
3. ชุดควบคุมอัตราการป้อนอากาศ
4. หัวเผาแบบไซโคลน
5. ท่อคอนกรีตทนไฟเผาแก๊สเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงสังเคราะห์และ เครื่องแลกเปลี่ยน

ความร้อนแบบชุดท่อ



ภาพประกอบ 30 หลักการทำงานของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
ต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพประกอบ 31 การทำงานของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
ต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.13.1 ขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จากชีวมวลอัดเม็ด

ตรวจสอบความพร้อมของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ 1. ระบบไฟฟ้า สายไฟ มอเตอร์เกียร์ สายไฟพัดลมบ่อนอากาศ สายไฟพัดลมดูดแก๊สไอเสีย สายไฟอินเวอร์เตอร์ สายสัญญาณวัดอุณหภูมิ (อินสทรูเมนต์) สายไฟชุดควบคุมการเปิด-ปิดแก๊ส LPG (หัวเผานำร่องโซลินอยด์วาล์วของหัวเผานำร่อง) 2. ระบบลำเลียงสกรู โรตารีแอร์ล็อก 3. ระบบน้ำป้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มิเตอร์วัดอัตราการไหลเมื่อตรวจสอบความพร้อมเรียบร้อยแล้ว ทำการชั่งชีวมวลอัดเม็ดครั้งละ 25 กิโลกรัมและเติมไว้ในhopperจากนั้นทำการ start สกรูลำเลียงที่ 50 Hz เป็นเวลา 15 นาที เพื่อป้อนชีวมวลอัดเม็ดรองพื้นเตาแก๊สซีไฟเออร์จากนั้นชั่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 2 กิโลกรัมใส่ถาดทำการจุดไฟด้วยโบลเวอร์ลมร้อนและใส่ในตำแหน่งโรตารีแอร์ล็อก start พัดลมดูดแก๊สไอเสียและพัดลมบ่อนอากาศ เปิดวาล์ว AG 100 % เพื่อป้อนอากาศเข้าใต้เตาแก๊สซีไฟเออร์ และ เปิดวาล์ว AB1 10 % เพื่อป้อนอากาศเข้าด้านบนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ พร้อมกับเปิดวาล์ว AB2 เพื่อป้อนอากาศเข้าส่วนต้นของหัวเผาแบบไซโคลนที่ใช้ในการเผาไหม้แก๊สไพโตรเลียมเหลวที่หัวเผานำร่อง (Pilot burner) เพื่อรอแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาแก๊สซีไฟเออร์ เมื่อภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์อุณหภูมิได้ 400°C เป็นการเสร็จขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

3.13.2 ขั้นตอนการเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

เมื่อภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์อุณหภูมิได้ 400°C ทำการปรับอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดด้วย อินเวอร์เตอร์ของสกรูลำเลียงและโรตารีแอร์ล็อก เพื่อให้ได้อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h ทำการปรับอัตราการอากาศด้วยอินเวอร์เตอร์ของพัดลมป้อนอากาศ จากนั้นทำการปรับวาล์ว AG ที่อัตราการป้อนอากาศ 16,21 และ 25 m³/h เข้าใต้เตาแก๊สซีไฟเออร์เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ตามด้วยการปรับวาล์ว AB 1 อัตราการป้อนอากาศ 7,8 และ 10 m³/h เพื่อป้อนอากาศเข้าด้านบนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ช่วยเผาทำลายน้ำมันดิน, สารระเหย และฝุ่นคาร์บอน เมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้มีปริมาณเพียงพอและสามารถติดไฟได้ Pilot burner ซึ่งถูกเปิดให้ทำงานตั้งแต่เริ่มการเดินเครื่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่ปลายหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงกว่า 700°C หัวเผานำร่องนี้จะหยุดการทำงานโดยการหยุดจ่ายแก๊ส LPG โดยอัตโนมัติในขณะที่ยังวาล์ว AB2 ที่อัตราการป้อนอากาศ 16,21 และ 26 m³/h ยังคงไหลเข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องภายในห้องเผาไหม้ส่วนต้นของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน จากนั้นเปิดวาล์ว AB3 ที่อัตราการป้อนอากาศ 16,21 และ 26 m³/h เป็นอากาศที่ป้อนเข้าสู่ท่อเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน เมื่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เข้าสู่สภาวะคงที่ทำการจดบันทึก อุณหภูมิเตาแก๊สซีไฟเออร์ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อุณหภูมิหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน อุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์ อัตราการป้อนอากาศของวาล์ว AG, AB1, AB2, AB3 ความดันอากาศ อัตราการไหลของน้ำเข้าและออก อุณหภูมิน้ำเข้าและออก ตรวจวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และแก๊สไอเสีย ทุกๆ 10 นาที ซึ่งทุกการทดลองใช้เวลาหนึ่งชั่วโมง

3.13.3 ขั้นตอนการหยุดเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

การหยุดเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด ดำเนินการโดยหยุดการทำงานของสกรูลำเลียงชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์ จากนั้นปิดวาล์ว AG และ AB1 และรอจนกระทั่งเปลวไฟที่หัวเผาแบบไซโคลนดับ จากนั้นให้ปิดวาล์ว AB2 และ AB3 ปิดการทำงานของหัวเผานำร่อง (Pilot burner) และปิดแก๊ส LPG ที่ป้อนให้ Pilot burner ปิดวาล์วน้ำที่ป้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลักจากอุณหภูมิน้ำออกอยู่ประมาณ 40°C และทำการปิดพัดลมดูดและพัดลมป้อนอากาศเมื่ออุณหภูมิเตาต่ำกว่า 300°C หลังจากนั้นทำการเก็บเก้าอี้เมื่ออุณหภูมิเตาเย็นตัวลง

3.14 การประเมินสมรรถนะของเตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบไหลขึ้น

การประเมินสมรรถนะของเตาแก๊สซีฟเฮอร์ที่อัตราการป้อน 10.90 , 14.04 และ 17.04 kg/h นั้นจะพิจารณาจาก ประสิทธิภาพความร้อนระบบแก๊สซีฟเฮอร์คืออัตราส่วนของพลังงานจากแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ระบบผลิตได้ต่อพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ป้อนให้กับระบบผลิตแก๊ส

3.11.1 ค่าความร้อนทางสูงของแก๊สเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงสังเคราะห์

จากส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถนำค่า CO , H_2 , และ CH_4 มาคำนวณค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงสังเคราะห์

$$HHV_{\text{syngas}} = (\% \text{CO} \times 12.63 \text{ MJ/Nm}^3) + (\% \text{H}_2 \times 12.74 \text{ MJ/Nm}^3) + (\% \text{CH}_4 \times 39.82 \text{ MJ/Nm}^3) \quad (3.10)$$

$$LHV_{\text{syngas}} = (\% \text{CO} \times 12.63 \text{ MJ/Nm}^3) + (\% \text{H}_2 \times 10.78 \text{ MJ/Nm}^3) + (\% \text{CH}_4 \times 35.88 \text{ MJ/Nm}^3) \quad (3.11)$$

3.11.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพ Cold gas Efficiency และ Hot gas Efficiency สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Cold gas Efficiency} = \frac{LHV_g \times \dot{V}_g}{LHV_f \times \dot{M}_f} \quad (3.12)$$

$$\text{Hot gas Efficiency} = \frac{LHV_g V_g + M_g C_p (T_o - T_i)}{LHV_f \times M_f} \quad (3.13)$$

เมื่อ LHV_g คือ ค่าความร้อนทางต่ำของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (MJ/Nm^3)

V_g คือ อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Nm^3/h)

M_g คือ น้ำหนักของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (kg/h)

C_p คือ ความจุความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (MJ/kg-k)

T_o คือ อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทางออก (k)

T_i คือ อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทางเข้า (k)

LHV_f คือ ค่าความร้อนทางต่ำของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/kg)

M_f คือ น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg/h)

$\dot{V}_{\text{syngas}}$ Producer gas flow rate (Nm³/h) คืออัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง
สังเคราะห์ คำนวณจากสมดุลของไนโตรเจน (N₂)

$$\dot{V}_g \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Total } N_2 \left(\frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right)}{\text{Ratio of } N_2 \text{ in gas}} \times 22.4 \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Kmol}} \right) \quad (3.14)$$

3.15 การประเมินอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงและประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

เพื่อให้ได้มาซึ่งอัตราการป้อนอากาศจริงเข้าสู่หัวเผาและใช้ประเมินค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AFRA) ในขณะที่จะถูกเก็บจากไซโคลนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนของคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (X_{cr}) โดยสมมติให้เป็นค่าเดียวกับค่า Loss On Ignition (LOI) ซึ่งหาตามวิธี ASTM D7348-13 และสามารถนำไปหาค่าสัดส่วนของคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ (X_{cb}) แล้วนำผลที่ได้ไปประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (Carbon Conversion Efficiency: CCE) เมื่อ y คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สองค์ประกอบ x คือสัดส่วนโดยมวลของธาตุ

$$y_{N_2} = 1 - y_{CO_2} - y_{O_2} - y_{CO} - y_{NO_x} - y_{SO_2} \quad (3.15)$$

$$x_{cb} = x_{C,ar} - \frac{x_{Cr} x_{ash,ar}}{1 - x_{Cr}} \quad (3.16)$$

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \left(\frac{28 y_{N_2} x_{cb}}{12 (y_{co} + y_{co_2})} - x_{N,ar} \right) \quad (3.17)$$

$$CCE = \frac{x_{cb}}{x_c} \quad (3.18)$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและผลการวิเคราะห์การผลิตและการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้จากการแปรสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดด้วยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นโดยตัวแปรที่มีผลต่อการทดลองในครั้งนี้คือ อัตราการป้อนเข้าจากชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ คือ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 ที่กำหนดให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อัตราส่วนอากาศผสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ที่ 0.29 และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 2 ที่ใช้เพื่อป้องกันการรั่วออกของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ผ่านช่องทางป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์ โดยแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ได้จะถูกเผาไหม้ในหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนกับอากาศส่วนที่ 3 และ 4 โดยมีผลการทดลองเรียงตามลำดับดังนี้

ผลของอุณหภูมิในเตาแก๊สซีไฟเออร์แสดงในหัวข้อ 4.1 เมื่ออัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์มี 3 ระดับ คือ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เพื่อเข้าทำปฏิกิริยาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่กำหนดให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อัตราส่วนอากาศผสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ที่ 0.29

ผลของอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ออกจากเตาแก๊สซีไฟเออร์แสดงในหัวข้อ 4.2 เมื่อป้อนอากาศส่วนที่ 2 เข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์ เมื่ออากาศส่วนที่ 2 ถูกป้อนเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์บริเวณส่วนปลายท่อป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกจากเตาแก๊สซีไฟเออร์ผ่านช่องทางป้อนชีวมวลอัดเม็ดออกสู่ภายนอกได้

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง และผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ แสดงในหัวข้อ 4.3 - 4.5

ผลของอุณหภูมิเปลวไฟและแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกแปรสภาพมาจากชีวมวลอัดเม็ดที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์ 3 ระดับแสดงในหัวข้อ 4.6

ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละอองจากปล่องไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกแปรสภาพมาจากชีวมวลอัดเม็ดที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์ 3 ระดับแสดงในหัวข้อ 4.7 ผลของปริมาณฝุ่นที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานการปล่อยมลพิษตามเกณฑ์มาตรฐานตาม

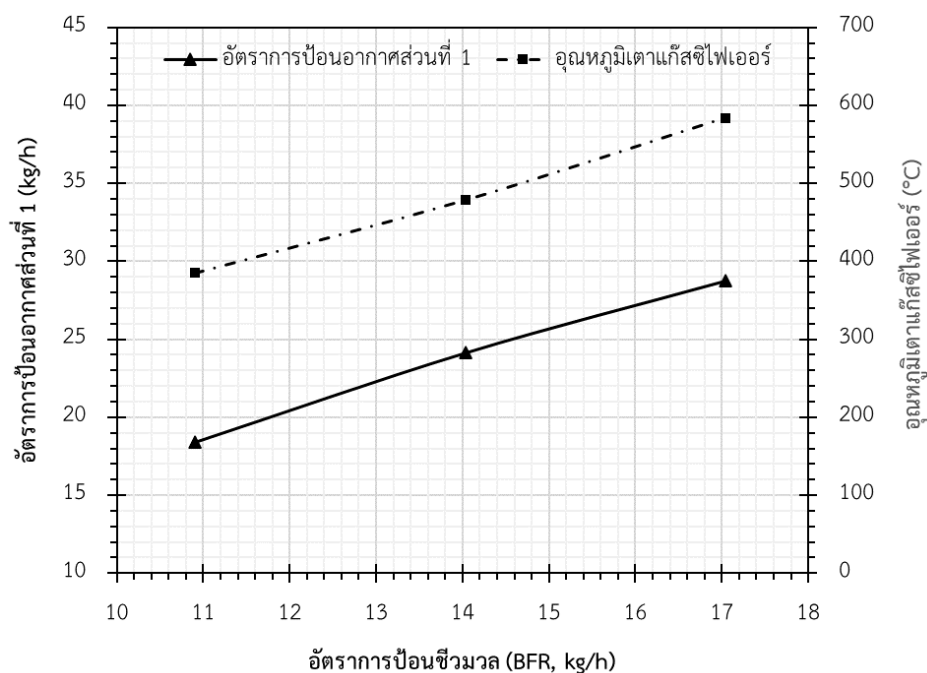
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องกำหนดค่าปริมาณสารเจือปนในอากาศที่ระบายออกจากโรงงาน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณและลักษณะของเถ้าหนักและเถ้าลอยที่เก็บได้จากชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด เมื่อเถ้าหนักเก็บได้จากถังเก็บเถ้าหนักจากเตาแก๊สซีไฟเออร์ในขณะที่เถ้าลอยถูกดักจับที่หัวเผาแบบไซโคลน และประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน โดยผลวิเคราะห์ดำเนินการที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์ 3 ระดับแสดงในหัวข้อ 4.9

ผลการวิเคราะห์การนำความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนไปใช้ประโยชน์ในการต้มน้ำ เมื่อความร้อนได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนเมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกแปรสภาพมาจากชีวมวลอัดเม็ดที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์ 3 ระดับแสดงในหัวข้อ 4.10

4.1 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในเตาแก๊สซีไฟเออร์

เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (wood pellet) ที่อัตราการไหล 3 ระดับ (10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h) ถูกป้อนเข้าสู่เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และทำปฏิกิริยากับอากาศส่วนที่ 1 (AG1) โดยกำหนดให้อัตราส่วนอากาศสมมูล (Equivalence Ratio: ER) มีค่าคงที่ที่ 0.29 ผลการประเมินหาอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 ที่สัมพันธ์กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับคือ 18.40, 24.15 และ 28.75 kg/h ตามลำดับ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดและอากาศทำปฏิกิริยากันในเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น (Fixed bed updraft gasifier) จนมีสภาวะคงตัว ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์มีค่าเฉลี่ยประมาณ 385 °C ที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดที่ 10.9 kg/h และอัตราการป้อนอากาศที่ 18.40 kg/h เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเป็น 14.04 kg/h และเพิ่มอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เป็น 24.15 kg/h ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 479 °C และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเป็น 17.04 kg/h และเพิ่มอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 เป็น 28.75 kg/h ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 584 °C เมื่อพิจารณาแนวโน้มอุณหภูมิภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาแก๊สซีไฟเออร์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อกำหนดให้ค่าอัตราส่วนอากาศสมมูลมีค่าคงที่ดังแสดงในภาพประกอบ 33



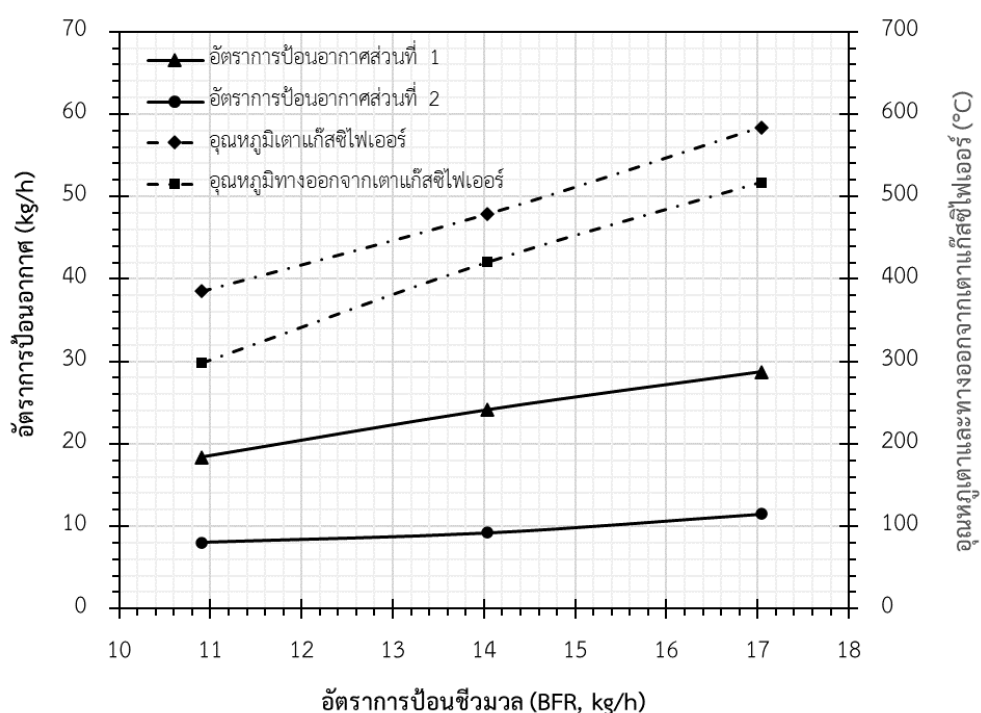
ภาพประกอบ 32 แสดงผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศต่ออุณหภูมิในเตาแก๊สซีฟเฮอร์

4.2 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ถูกแปรสภาพจากชีวมวลอัดเม็ดโดยใช้อากาศส่วนที่ 1 (AG) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) โดยอากาศส่วนที่ 2 ถูกป้อนเข้าบริเวณด้านบนของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่มาจากแก๊สซีฟเฮอร์เคชั่นโซน ผลของอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่ 1 และ 2 ต่ออุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ไหลออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์พบว่า เมื่ออัตราการป้อนชีวมวล 10.90 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG1) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ที่อัตราการไหล 18.40 และ 8.05 kg/h พบว่าอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ทางออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 298 °C เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนชีวมวลเป็น 14.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG1) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ที่อัตราการไหล 24.15 และ 9.20 kg/h พบว่าอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทางออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์อยู่ที่ 420 °C และเมื่ออัตราการป้อนชีวมวลที่ 17.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG1) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ที่อัตราการไหล 28.75 และ 11.5 kg/h พบว่าอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ทางออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์อยู่ที่ 517 °C

ผลจากการทดลองพบว่าอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้าสู่เตาแก๊สซีฟเฮอร์บริเวณส่วนปลายท่อป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซีฟเฮอร์สามารถป้องกันแก๊สเชื้อเพลิง

สังเคราะห์หรือออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์ผ่านช่องทางบ้อนชีวมวลอัดเม็ดออกสู่ภายนอกได้ อากาศส่วนนี้ยังไหลเข้าไปผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และไหลออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์ไปพร้อมกัน ส่งผลให้อุณหภูมิแก๊สที่ไหลออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายในแก๊สซีฟเฮอร์อยู่ในช่วง 58-87 °C โดยผลของการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 และ 2 ที่มีต่ออุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในเตาและทางออกเตาแก๊สซีฟเฮอร์มีค่าดังแสดงในภาพประกอบ 34

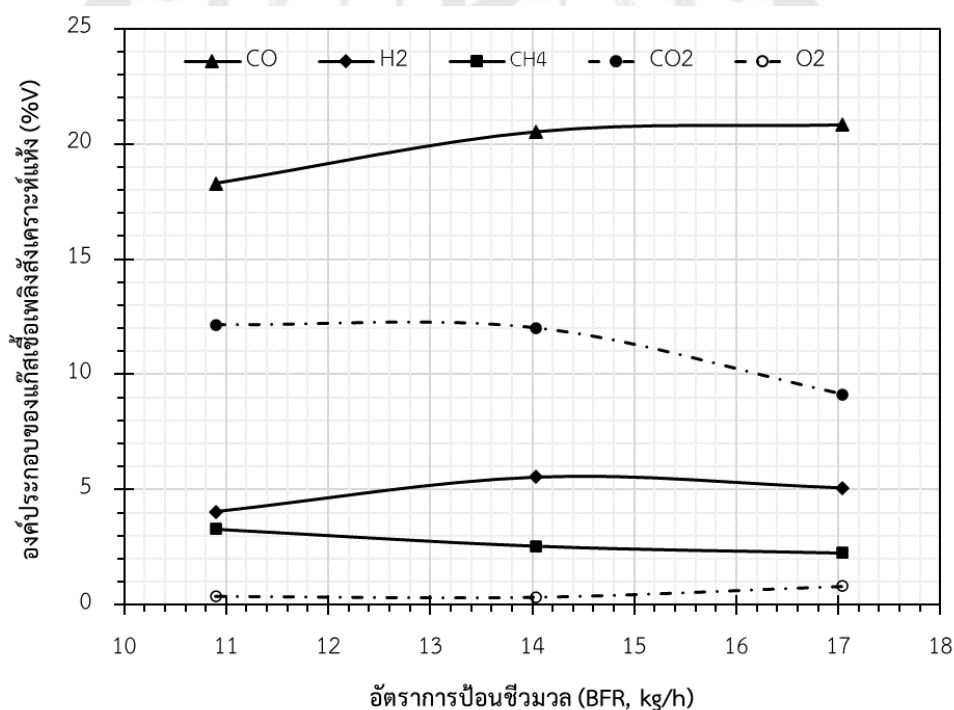


ภาพประกอบ 33 แสดงผลของอัตราการบ้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่ 1 และ 2 ต่ออุณหภูมิทางออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์

4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง

ผลการวัดองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งที่ไหลออกจากเตาแก๊สซีฟเฮอร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นก่อนเข้าสู่หัวเผาแก๊สแบบไซโคลน โดยตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในท่อส่งถูกดึงออกมาวัดและวิเคราะห์แบบต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งมีค่าดังแสดงในภาพประกอบ 36 โดย ที่อัตราการบ้อนชีวมวล 10.90 kg/h และอัตราการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ที่ 18.40 และ 8.05 kg/h ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งที่ติดไฟได้พบว่า มีค่า CO 18.27, H₂ 4.04, CH₄ 3.29 % องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ติดไฟไม่ได้

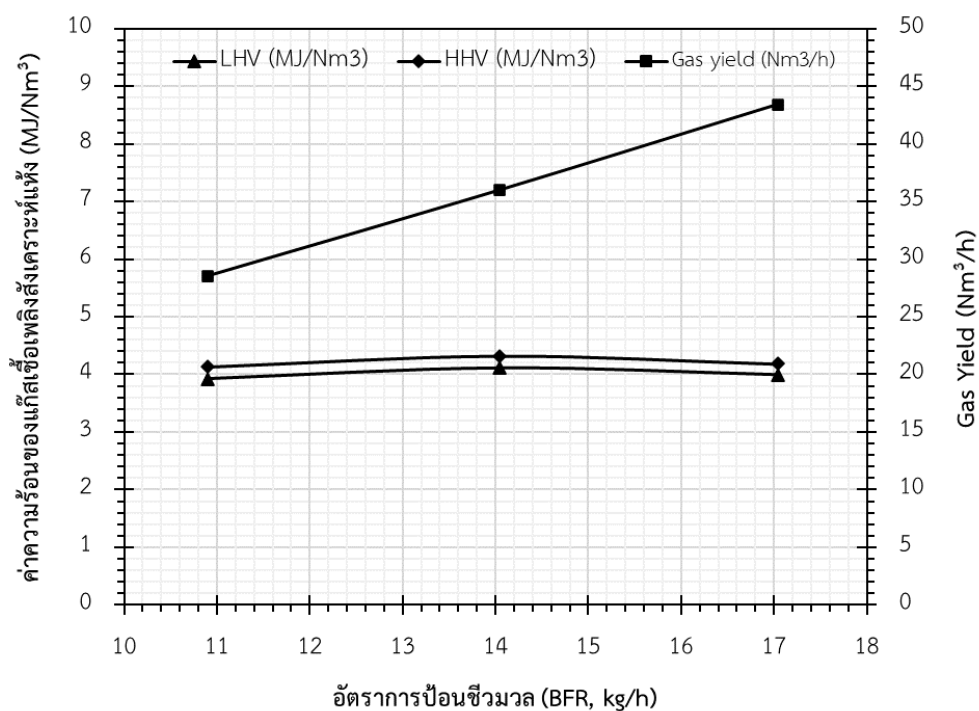
พบว่ามีความ CO_2 12.14 %, O_2 0.39% ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ที่ 24.15 และ 9.20 kg/h ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห่งที่ติดไฟได้พบว่ามีค่า CO 20.53 %, H_2 5.54 %, CH_4 2.56 % องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ติดไฟไม่ได้พบว่ามีค่า CO_2 12.00 %, O_2 0.35 % และที่อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG) และอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ที่ 28.75 และ 11.5 kg/h ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห่งที่ติดไฟได้พบว่ามีค่า CO 20.83 %, H_2 5.07 %, CH_4 2.26 % และองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ติดไฟไม่ได้พบว่ามีค่า CO_2 9.12 %, O_2 0.82 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ CO มีค่าต่ำที่ 18.27% H_2 มีค่าต่ำที่ 4.04% และ CH_4 2.26 % อย่างไรก็ตามในแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ออกจากแก๊สซิฟิเคอร์ยังมีส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ส่วนอื่นปะปนอยู่ด้วยซึ่งประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ น้ำมันดิน สารอินทรีย์ระเหยง่าย และฝุ่นคาร์บอน เป็นต้น



ภาพประกอบ 34 แสดงผลการวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห่ง

4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง

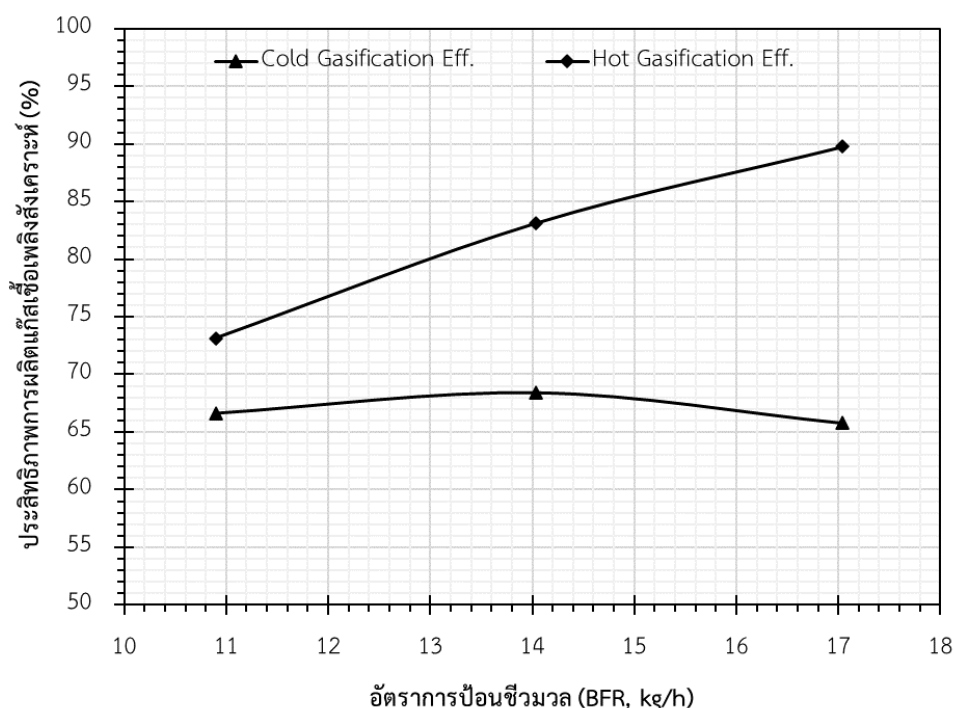
ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง ที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.90 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1(AG)18.40 kg/h อากาศส่วนที่ 2(AB1) 8.05 kg/h ได้องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งที่ติดไฟได้มีค่า CO 18.27, H₂ 4.04, CH₄ 3.29 % ผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนทางสูง(HHV) 4.13 MJ/Nm³ ค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 3.92 MJ/Nm³ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง 28.55 Nm³/h ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1(AG)/24.15 kg/hอากาศส่วนที่ 2(AB1) 9.20 kg/h ได้องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งที่ติดไฟได้มีค่า CO 20.53, H₂ 5.54, CH₄ 2.56 % ผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนทางสูง(HHV) 4.32 MJ/Nm³ ค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 4.11 MJ/Nm³ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง 35.99 Nm³/h ที่อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1(AG)28.75 kg/hอากาศส่วนที่ 2(AB1) 11.5 kg/h CO 20.83, H₂ 5.07, CH₄ 2.26 % และแก๊สที่ไม่ติดไฟคือ CO₂ 9.12, O₂ 0.82 % ผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนทางสูง(HHV) 4.18 MJ/Nm³ ค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 3.99 MJ/Nm³ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง 43.42 Nm³/h เมื่อพิจารณาค่าความร้อนพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศยังมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเกิด CO, H₂ และประสิทธิภาพโดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดได้ดีขึ้น ส่วนปริมาณ CH₄ นั้นไม่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดแก๊ส CH₄ จะเกิดได้ภายใต้ความดันสูง



ภาพประกอบ 35 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและอัตราการไหลเชิงปริมาตร
ของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง

4.5 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

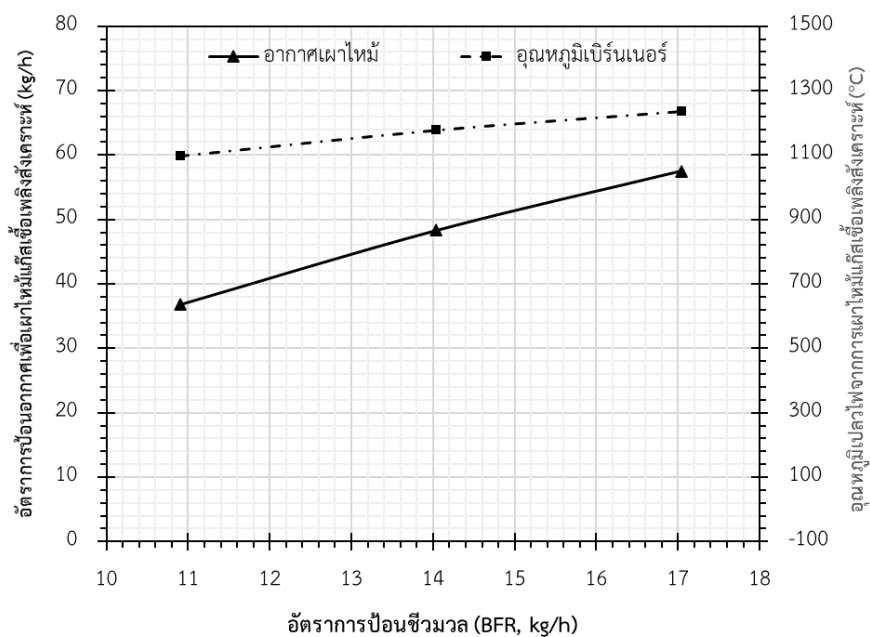
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.90 kg/h มีค่าความร้อนทางต่ำของ (LHV) 3.92 MJ/Nm³ ความร้อนทางสูง(HHV) 4.13 MJ/Nm³ ผลการคำนวณประสิทธิภาพ Cold gas Efficiency มีค่า 66.63% ประสิทธิภาพ Hot gas Efficiency มีค่า 73.13% ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h มีค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 4.11 MJ/Nm³ ความร้อนทางสูง(HHV) 4.32 MJ/Nm³ ผลการคำนวณประสิทธิภาพ Cold gas Efficiency มีค่า 68.39% ประสิทธิภาพ Hot gas Efficiency มีค่า 82.12% และที่อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h มีค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 3.99 MJ/Nm³ ความร้อนทางสูง(HHV) 4.18 MJ/Nm³ ผลการคำนวณประสิทธิภาพ Cold gas Efficiency มีค่า 65.78% ประสิทธิภาพ Hot gas Efficiency มีค่า 89.74%



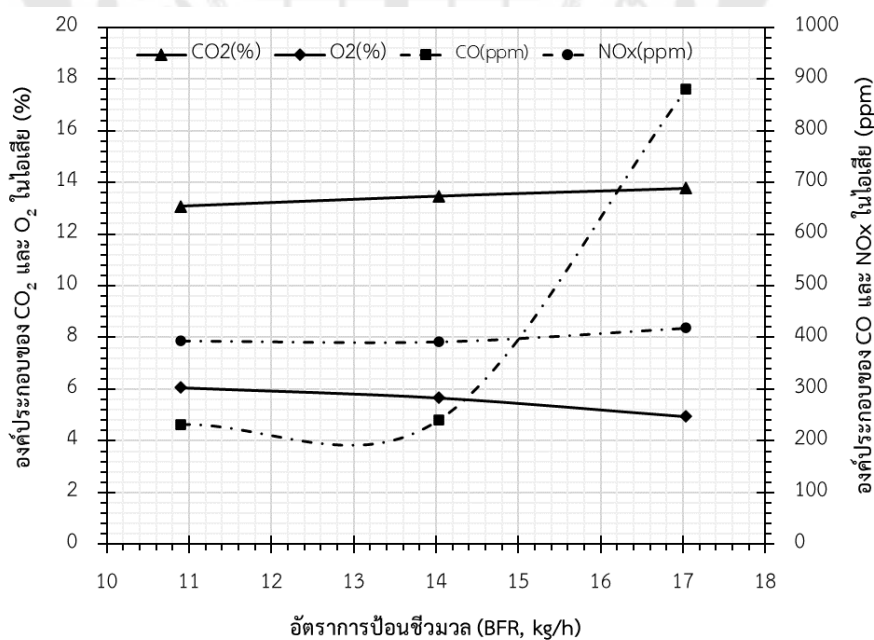
ภาพประกอบ 36 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

4.6 ผลการวิเคราะห์การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.9 kg/h โดยให้อัตราป้อนอากาศรวมของ BA2 และ BA3 คือ 44.85 kg/h พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สไอเสีย คือ CO₂ 13.08 % CO 230 % และ NO_x 393 ppm ซึ่งมีออกซิเจนส่วนเกินอยู่ที่ 6.07 % อุณหภูมิเปลวไฟที่วัดได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนมีค่า 1098 °C ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h โดยให้อัตราป้อนอากาศรวมของ BA2 และ BA3 คือ 57.50 kg/h พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สไอเสีย คือ CO₂ 13.47 % CO 241 % และ NO_x 391 ppm ซึ่งมีออกซิเจนส่วนเกินอยู่ที่ 5.67 % อุณหภูมิเปลวไฟที่วัดได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนมีค่า 1178 °C อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h โดยให้อัตราป้อนอากาศรวมของ BA2 และ BA3 คือ 69.00 kg/h พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สไอเสีย คือ CO₂ 13.77 % CO 880 % และ NO_x 418 ppm ซึ่งมีออกซิเจนส่วนเกินอยู่ที่ 4.94 % อุณหภูมิเปลวไฟที่วัดได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลนมีค่า 1236 °C เมื่ออัตราส่วนอากาศผสม (EA(1-ER)) สำหรับเผาแก๊สมีค่าอยู่ในช่วง 0.710, 0.715 โดยพบว่ามีปริมาณ O₂ มีแนวโน้มต่ำลงและทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนชีวมวลที่เพิ่มขึ้น



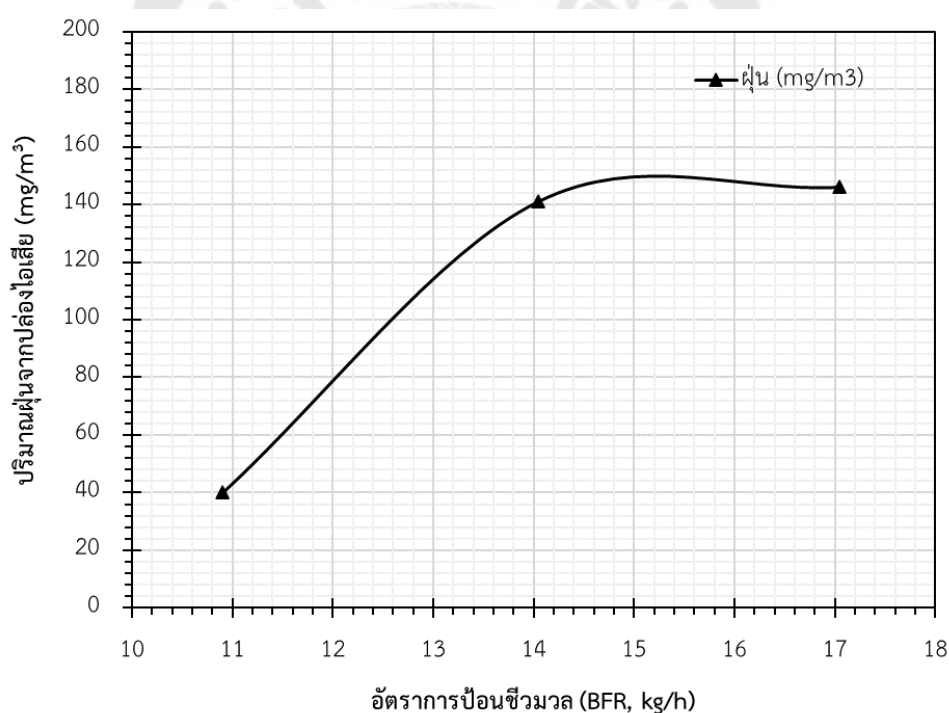
ภาพประกอบ 37 แสดงผลอากาศเผาไหม้และอุณหภูมิเบิร์นเนอร์



ภาพประกอบ 38 แสดงผลการวิเคราะห์การเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

4.7 ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละออง

ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละออง ในการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.90, 14.04. และ 17.04 kg/h ก่อนที่จะปลดปล่อยสู่บรรยากาศตามค่ามาตรฐานการปลดปล่อยฝุ่นละอองจากปล่องอุตสาหกรรมตามที่กฎหมายกำหนดที่ 320 mg/m^3 พบว่าที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.90 kg/h ปริมาณการปลดปล่อยฝุ่นละอองอยู่ที่ 40 mg/m^3 โดยที่องค์ประกอบของแก๊สไอเสียแห้ง O_2 6.07%, CO_2 13.08%, CO 232 ppm และ NO_x 393 ppm ที่อัตราการป้อนชีวมวล 14.04 kg/h ปริมาณการปลดปล่อยฝุ่นละอองอยู่ที่ 141 mg/m^3 โดยที่องค์ประกอบของแก๊สไอเสียแห้ง O_2 5.67%, CO_2 13.47%, CO 241 ppm และ NO_x 391 ppm และที่อัตราการป้อนชีวมวล 17.04 kg/h พบว่า ปริมาณการปลดปล่อยฝุ่นละอองอยู่ที่ 146 mg/m^3 โดยที่องค์ประกอบของแก๊สไอเสียแห้ง O_2 4.94%, CO_2 13.77%, CO 880 ppm และ NO_x 418 ppm ปริมาณฝุ่นละอองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเพิ่มขึ้น

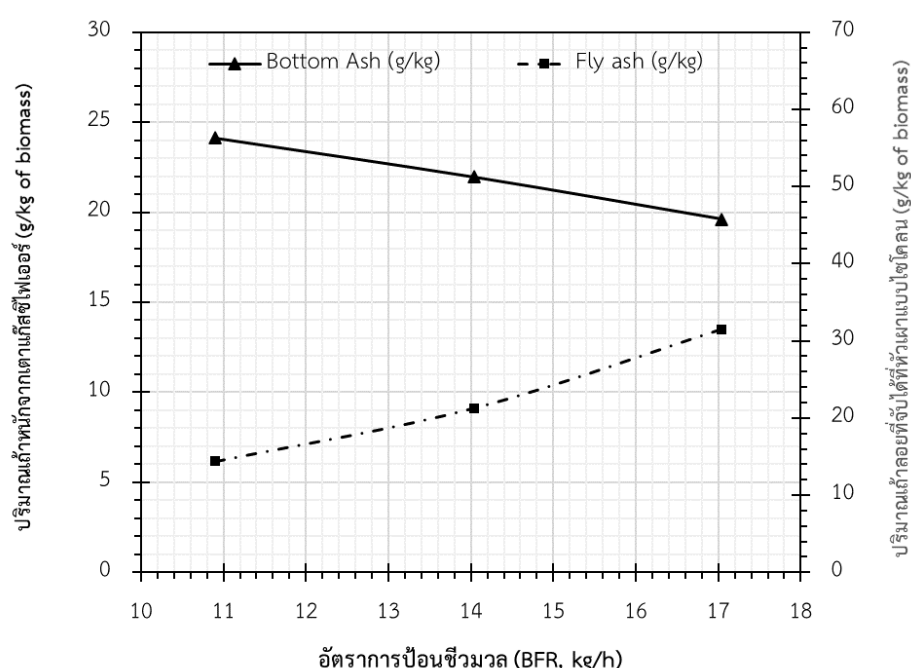


ภาพประกอบ 39 ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละออง

4.8 ปริมาณเถ้าหนักและเถ้าลอยที่ดักจับได้

จากการเก็บรวบรวมเถ้าหนักและเถ้าลอยจากถังเก็บที่แก๊สซีไฟเออร์และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนที่อัตราการป้อนชีวมวล 10.90, 14.04. และ 17.04 kg/h พบว่าเถ้าหนักมีปริมาณ 24.12, 21.95 และ 19.62 g ซึ่งลดลงเมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเพิ่มขึ้น ในขณะที่

ที่ถ้ำลอยที่เก็บได้มีปริมาณ 14.4, 21.3 และ 31.5g ซึ่งมากขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มากขึ้น และตามอัตราการป้อนอากาศที่มากขึ้นทำให้เกิดความเร็วผ่านพื้นที่หน้าตัดของเตาซึ่งผลทำให้ผงคาร์บอนที่อยู่ในเตาแก๊สซิไฟเออร์สามารถหลุดไปผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยจะปลิวปนไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควันซึ่งถ้ามีปริมาณเถ้าปลิวมากในชั้นบรรยากาศ ก็อาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะของอากาศได้ โดยผลรวมมวลเถ้าหนักและเถ้าเบาที่เก็บได้มีค่ามากกว่ามวลชี้เถ้า เนื่องจากมีคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ผสมในเถ้าทั้ง 2 ส่วน



ภาพประกอบ 40 ผลของสภาวะการทำงานของชุดอุปกรณ์ต่อปริมาณเถ้าหนัก และเถ้าลอยที่ดักจับได้

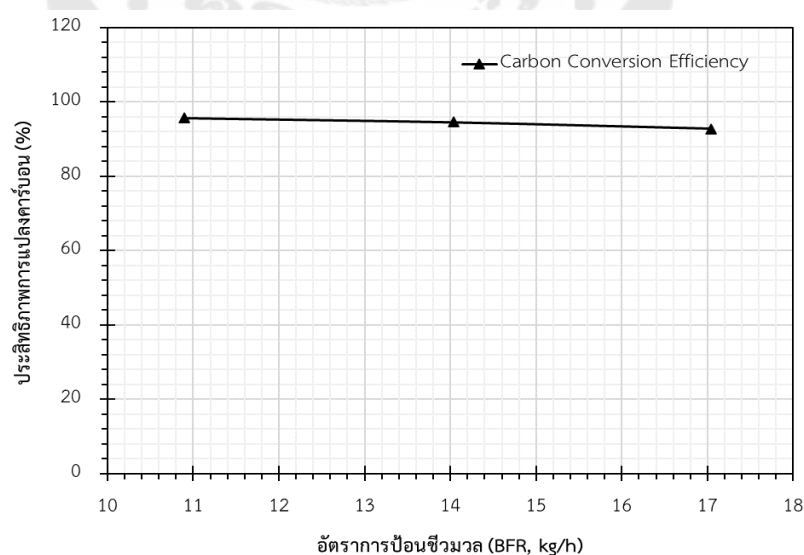
4.9 ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน

จากการเก็บรวบรวมสิ่งที่เหลือจากเตาแก๊สซิไฟเออร์ (Gasifier bottom ash) เถ้าลอยที่เกิดได้จากหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน (Cyclone fly ash) และฝุ่นละอองรวมในปล่องไอเสีย (Total suspended particulate: TSP) และวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้พบว่าปริมาณคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 38.8, 44.1 และ 52.0 g/kg ของชีวมวล เมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเข้าเตาแก๊สซิไฟเออร์ที่ 10.90, 14.04. และ 17.04 kg/h ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน (Carbon Conversion Efficiency: CCE) พบว่าค่าประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงจาก 95.71, 94.54 และ 92.80 %

เมื่อการทำงานของเตาที่อัตราการป้อนชีวมวลเข้าเตาแก๊สซีฟเฮอร์ที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h ตามลำดับ

ตาราง 19 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนจากคาร์บอนที่ไม่ถูกเผาไหม้

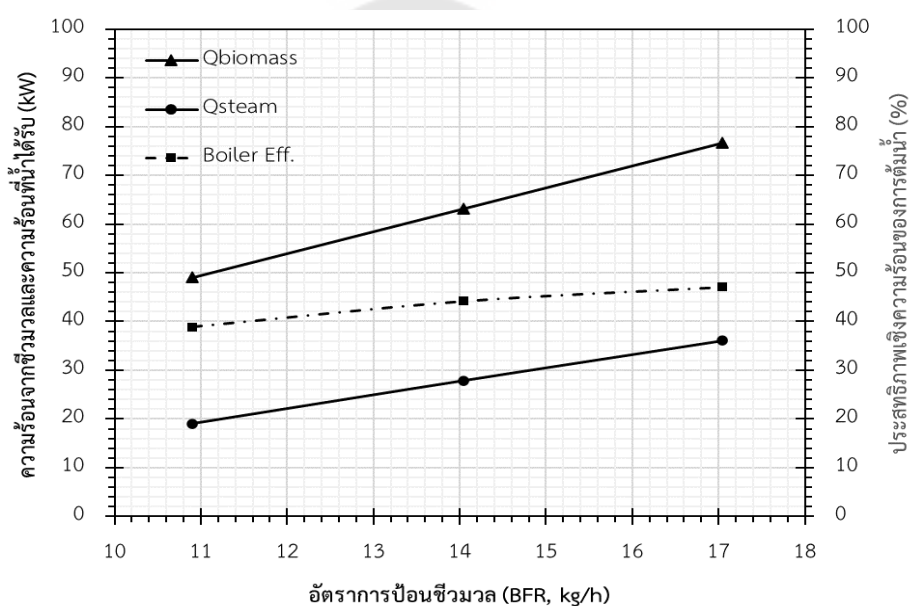
อัตราการป้อนชีวมวล (BFR) (kg/h)	ถ่านหินจากแก๊สซีฟเฮอร์ (g/kg of biomass)	ถ่านล่อยที่จับได้โดยไซโคลน (g/kg of biomass)	ฝุ่นละอองจากปล่องไอเสีย (g/kg of biomass)	ปริมาณถ่านในชีวมวล (g/kg of biomass)	ปริมาณคาร์บอนในชีวมวล (g/kg of biomass)	ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน (%)
10.90	24.12	14.40	0.24	19.30	19.46	95.71
14.04	21.95	21.30	0.85	19.30	24.80	94.54
17.04	19.62	31.50	0.88	19.30	32.70	92.80



ภาพประกอบ 41 ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ

4.10 ผลการวิเคราะห์การนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์

ความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไซโคลน โดยแก๊สร้อนสะอาดไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อและถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำ เพื่อผลิตน้ำร้อนที่มีไอน้ำผสม จากนั้นไอน้ำเสียถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ซึ่งผลการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ แสดงดังตาราง 25 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงความร้อนยังเห็นได้ว่าถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพได้อีก



ภาพประกอบ 42 ผลการวิเคราะห์การนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์

ตาราง 20 ผลการนำความร้อนจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

อัตราการป้อนชีวมวล (BFR) (kg/h)	พลังงานป้อนเข้าจากชีวมวลอัดเม็ด (kW)	อุณหภูมิปลายหัวเผา (°C)	อัตราการไหลของน้ำป้อน (kg/h)	คุณภาพไอน้ำที่ทางออก (%)	ความร้อนที่น้ำได้รับ (kW)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
10.90	49.03	815	173	4.6	19.08	38.91
14.04	63.15	903	172	12.2	27.89	44.16
17.04	76.64	949	169	20.1	36.06	47.05

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด สามารถสรุปได้ว่าแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากแก๊สซิฟิเคชันแบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น เมื่ออัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับในช่วง 10.9 -17.04 kg/h และอัตราการป้อนอากาศส่วนที่ 1 ที่กำหนดให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้อัตราส่วนอากาศผสมมูล (Equivalence Ratio: ER) ที่ 0.29 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ในเตาแก๊สซิฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 385-584 °C อุณหภูมิทางออกจากเตาแก๊สซิฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 298-420 °C โดยทั้งอุณหภูมิในเตาแก๊สซิฟิเคชันและในท่อส่งแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีส่วนประกอบที่ติดไฟได้ประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) และมีเทน (CH_4) และส่วนประกอบที่ติดไฟไม่ได้ประกอบด้วยไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากส่วนประกอบดังกล่าวแล้วยังมีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ (C_mH_n) น้ำมันมันดิน (Tar) ฝุ่นคาร์บอน และเถ้าลอยผสมอยู่เล็กน้อย จากการชักตัวอย่างแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อวัดค่าองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งพบว่า แก๊สที่ติดไฟได้คือ CO มีค่าอยู่ในช่วง 18.27– 20.83 % , H_2 มีค่าอยู่ในช่วง 4.04 – 5.07 % และ CH_4 มีค่าอยู่ในช่วง 13.08 -13.77 % ในขณะที่แก๊สที่ไม่ติดไฟคือ CO_2 มีค่าอยู่ในช่วง 12.14-9.12 % และ O_2 มีค่าอยู่ในช่วง 0.39-0.82 % ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์พบว่า ค่าความร้อนทางสูง (HHV) และค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) มีค่าอยู่ในช่วง 4.13-4.32 MJ/Nm³ และ 3.92-4.11 MJ/Nm³ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 28.55 Nm³/h เป็น 43.42 Nm³/h ตามค่าอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เย็น (cold gasification efficiency) มีค่าอยู่ในช่วง 65.78 - 68.39 % ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ihvo (Hot gasification efficiency) มีค่าอยู่ในช่วง 73.13-89.74 %

เมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนส่วนต้น แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยแก๊สส่วนที่เผาไหม้ได้ และสารปนเปื้อนที่สามารถเผาไหม้

ได้ เช่นน้ำมันดิน ผุนคาร์บอน ก็ถูกเผาไหม้กับอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ส่วนต้นของหัวเผา แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไฮโดรเจนจากนั้นถ้าปล่อยส่วนใหญ่จะถูกดักจับไว้ที่ถังเก็บถ้าปล่อย ในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ยังคงเผาไหม้ต่อกับอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และได้อุณหภูมิ การเผาไหม้สูงสุด

จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สไอเสียออกมาโดย มีออกซิเจนส่วนเกินอยู่ในช่วง 4.94 และ 6.07 % มีองค์ประกอบของ CO_2 , CO และ NO_x ในช่วง 13.08-13.77 %, 230-880 ppm และ 391-418 ppm ตามลำดับ โดยปริมาณแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเพิ่มขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิที่ปลาย หัวเผามีค่าอยู่ในช่วง $1,098 - 1,236^\circ\text{C}$ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง สังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยฝุ่นละออง ในการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ก่อนที่จะ ปลดปล่อยสู่บรรยากาศตามค่ามาตรฐาน การปลดปล่อยฝุ่นละอองจากปล่องอุตสาหกรรมตามที่ กฎหมายกำหนดที่ 320 mg/m^3 พบว่าปริมาณการปลดปล่อยฝุ่นละอองอยู่ในช่วง $40 - 146 \text{ mg/m}^3$ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามภาระการทำงานของเตาแก๊สซีไฟเออร์และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิง สังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น จากการเก็บรวบรวมถ่านหินและถ่านลอยจากถังเก็บที่แก๊สซีไฟเออร์และหัวเผา แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไฮโดรเจน พบว่าถ่านหินมีปริมาณ $24.12, 21.95$ และ 19.62 g ซึ่งลดลง เมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ่านลอยที่เก็บได้มีปริมาณ $14.4, 21.3$ และ 31.5 g ซึ่งมาก ขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน (Carbon Conversion Efficiency: CCE) พบว่าค่าประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนมีแนวโน้ม ลดลงจาก 95.71, 94.54 และ 92.80 % เมื่อเตาชีวมวลทำงานที่อัตราการป้อนชีวมวลเข้าเตาแก๊สซี ไฟเออร์ที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h ตามลำดับ

จากการนำความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบไฮโดรเจนไป ใช้ประโยชน์ โดยแก๊สร้อนสะอาดไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนที่มีไอน้ำผสมจากนั้นไอเสียถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ซึ่งผลการวิเคราะห์เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ ความร้อนที่ได้จากชุดอุปกรณ์ผลิต และเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดถ่ายเทให้กับน้ำที่ไหลภายในชุดท่อแลกเปลี่ยน ความร้อนและสามารถหาปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก $19.08 - 36.06 \text{ kW}$ และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 38.91 – 47.05 ตามค่าพลังงานจาก

ชีวมวลอัดเม็ดบ้อนเข้าเตาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนอาจมีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากคุณภาพไอน้ำที่ทางออกหาโดยการปล่อยไอน้ำเปียกเข้าสู่ถังแยกไอน้ำที่เปิดสู่บรรยากาศทำให้ไอน้ำบางส่วนอาจเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวมากขึ้น

5.2 อภิปรายผล

5.2.1 ผลการทดลองผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด โดยการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ใช้เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น ที่อัตราการไหล 3 ระดับคือ 10.9, 14.04 และ 17.04 kg/h อัตราส่วนอากาศผสมมูล (Equivalence Ratio: ER) มีค่าคงที่ที่ 0.29 ผลการประเมินหาอัตราการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 ที่สัมพันธ์กับอัตราการบ้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับคือ 18.40, 24.15 และ 28.75 kg/h อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาแก๊สซิฟิเคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 479 °C และเมื่อเพิ่มอัตราการบ้อนชีวมวลอัดเม็ดเป็น 17.04 kg/h และเพิ่มอัตราการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 เป็น 28.75 kg/h ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาแก๊สซิฟิเคชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 584 °C องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งที่ติดไฟได้มีค่า CO 18.27, H₂ 4.04, CH₄ 3.29 % ผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนทางสูง (HHV) 4.13 MJ/Nm³ ค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 3.92 MJ/Nm³ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง 28.55 Nm³/h ที่อัตราการบ้อนชีวมวล 14.04 kg/h และอัตราการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG)/24.15 kg/h อัตราส่วนที่ 2 (AB1) 9.20 kg/h ได้องค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งที่ติดไฟได้มีค่า CO 20.53, H₂ 5.54, CH₄ 2.56 % ผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนทางสูง (HHV) 4.32 MJ/Nm³ ค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) 4.11 MJ/Nm³ และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง 35.99 Nm³/h ที่อัตราการบ้อนชีวมวล 17.04 kg/h และอัตราการบ้อนอากาศส่วนที่ 1 (AG) 28.75 kg/h อัตราส่วนที่ 2 (AB1) 11.5 kg/h CO 20.83, H₂ 5.07, CH₄ 2.26 % และแก๊สที่ไม่ติดไฟคือ CO₂ 9.12, O₂ 0.82 % ผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนทางสูง (HHV) 4.18 MJ/Nm³ ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียมีค่า 4.94-6.07 % พบว่าแก๊สมลพิษมีค่า CO อยู่ในช่วง 232–880 ppm, NO_x 393–418 ppm CO₂ 13.08–13.77 % ตามลำดับ อัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (Specific Gasification Rate, SGR) มีค่าสูงสุดที่ 250 kg/m²-h ในขณะที่ถ้ำลอยที่เก็บได้มีปริมาณ 14.4, 21.3 และ 31.5g ซึ่งมากขึ้นตามอัตราการบ้อนเชื้อเพลิงที่มากขึ้นและตามอัตราการบ้อนอากาศที่มากขึ้นทำให้เกิดความเร็วผ่านพื้นที่หน้าตัดของเตาซึ่งผลทำให้ผงคาร์บอนที่อยู่ในเตาแก๊สซิฟิเคชันสามารถหลุดไปผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดยจะปลิวปนไปกับแก๊สร้อนออกจากปล่องควันซึ่งถ้ามีปริมาณถ้ำปลิวมากในชั้นบรรยากาศ ก็อาจก่อให้เกิดปัญหามลภาวะของอากาศได้ โดยผลรวมมวลถ้ำหนักและถ้ำ

เบาที่เก็บได้มีค่ามากกว่ามวลเชื้อเพลิงเนื่องจากมีคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ผสมในเชื้อเพลิงทั้ง 2 ส่วนผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอน (Carbon Conversion Efficiency: CCE) พบว่าค่าประสิทธิภาพการแปลงคาร์บอนมีแนวโน้มลดลงจาก 95.71, 94.54 และ 92.80 % ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ (จักรวาล เมตตา และ คณะ 2560) โดยทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดด้วยชุดหัวเผา มีการป้อนชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่ห้องปฏิกิริยาที่อัตราการไหล 3 ระดับคือ 5, 7 และ 9 kg/h ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีค่าอยู่ในช่วง 10-13 % ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสียมีค่า 8-10 % แก๊สมลพิษพบว่ามีค่าแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในช่วง 62-160 ppm ไนโตรเจนออกไซด์มีค่าอยู่ในช่วง 295 ถึง 358 ppm และอุณหภูมิเปลวไฟมีค่าอยู่ในช่วง 860 ถึง 1030 °C โดยมีอัตราการแปลงเชื้อเพลิงแข็งเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (Specific Gasification Rate -SGR) ที่ห้องปฏิกิริยาที่ค่าอยู่ในช่วง 247-434 kg/h/m² ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนที่ 95% ที่ภาวะความร้อนสูงสุดเมื่อปริมาณการป้อนอากาศส่วนเกินที่ 50% มีอัตราการเกิดเชื้อเพลิงในช่อง 3.9-5.1% เมื่อเทียบกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและมีค่าคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ในเชื้อเพลิงในช่อง 56-67% โดยมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอากาศส่วนเกินที่ลดลงและการทดลองของ (กิตติพงศ์ เย็นประเสริฐวงศ์ และ คณะ 2020) อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ 7.34, 8.73 และ 10.23 kg/h พบว่าแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากแก๊สซิฟิเคชันมีค่า CO ประมาณ 28-22% มีค่า H₂ ประมาณ 5-6 % มีค่า CH₄ ประมาณ 2-3% อุณหภูมิเหนือเตาแก๊สซิฟิเคชันมีค่าอยู่ในช่วง 693 - 719 °C ทางออกจากหัวเผามีค่าอยู่ในช่วง 879 - 1,014 °C ค่าเฉลี่ยออกซิเจนในไอเสียตลอดการทดลองพบว่ามีค่าลดลงจาก 7.04, 5.82 และ 3.65% ขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อภาวะความร้อนเพิ่มขึ้นและการทดลองของ (นิกราน หอมดวงและ คณะ 2558) องค์ประกอบของแก๊สที่ติดไฟได้เฉลี่ยคือ ไฮโดรเจน 18.67% คาร์บอนมอนอกไซด์ 21.67% และมีเทน 1.70% มีค่าความร้อนเฉลี่ย 5308 kJ/Nm³ ประสิทธิภาพความร้อนของระบบแก๊สซิฟิเคชันเฉลี่ยอยู่ในช่วง 56.72-68.09 % การทดลองของ (M. A. Chawdhury 2011) ได้ทำการออกแบบและ พัฒนาแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กขนาดกำลัง 6-7 กิโลวัตต์ เพื่อใช้สำหรับชุมชนในประเทศบังคลาเทศ ทำการ ทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงไม้สับและไม้อัดเม็ด คุมอุณหภูมิ ในช่วงรีแอกชันได้ 950-1150 °C ผลการทดสอบพบว่ามี องค์ประกอบของแก๊ส ไฮโดรเจน 50-56 % คาร์บอนมอนอกไซด์ 19-22% ไฮโดรเจน 12-19% คาร์บอนไดออกไซด์ 10-12% มีเทน 1-2 % ค่าความร้อน ขั้นต่ำ 4,424-5,007 kJ/m³ โดยมีประสิทธิภาพ (Cold gas efficiency) 62.5-69.4% การทดลองของ (จิระพงษ์กวนกระโทกและคณะ 2557) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สจากเศษชีวมวลขนาดเล็กชนิดไหลลงโดยใช้ เตาผลิตแก๊สชนิดไหลลงขนาดเล็ก

ทำการศึกษาผลของ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ และค่าความร้อนของแก๊ส สังเคราะห์โดยทำการเปรียบเทียบเชื้อเพลิง 3 ชนิดคือ กะลามะพร้าว ไม้กระถินยักษ์และไม้ยูคาลิปตัส ค่าความร้อนที่ได้ตามลำดับคือ 6,480, 5,800, 5,650 kJ/m³ โดย อุณหภูมิในช่วงเผาไหม้มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 876- 1,062 °C

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 จากการทดลองใช้ความร้อนจากการผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อุณหภูมิแก๊สไอเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกโดยเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหรือนำความร้อนที่เหลือไปใช้งานในรูปแบบอื่นๆ และสามารถต่อยอดในงานวิจัยครั้งต่อไปได้

5.3.2 ในระบบการผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้มีการติดตั้งชุดพัดลมดูดแก๊สไว้หลังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ พบว่าเมื่อมีการสะสมความร้อนเป็นเวลานานจะทำให้พัดลมเกิดความชำรุดเสียหาย เนื่องจากอุณหภูมิแก๊สไอเสียสูง

5.3.3 จากการทดลองเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ มีขั้นตอนในการดำเนินการหลายขั้นตอน ซึ่งสามารถทำคู่มือการใช้งานระบบผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ เพื่อประโยชน์ในงานวิจัยครั้งต่อไป และความปลอดภัยในการเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

บรรณานุกรม

- Kaewluan, S and Pipatmanomai, S. (2007) Preliminary Study of Rubber Wood Chips Gasification in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor: Effect of Air to Fuel Ratio, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, May10-11, 2007, Phuket, Thailand,
- Kluska, Jacek & Ochnio, Mateusz & Kazimierski, Pawer & Kardas, Dariusz. (2018). Comparison of downdraft and updraft gasification of biomass in a fixed bed reactor. Archives of Thermodynamics. 39. 59-69. 10.1515/aoter-2018-0029.
- R. P. Devi and S. Kamaraj, "Design and development of updraft gasifier using solid biomass," International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, vol. 6, no. 4, pp. 182-189, 201
- M. A. Chawdhury " Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries" JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH 2011
- N. Tippayawong, "Gasification of cashew nut shells for thermal application in local food processing factory" International Energy Initiative, 2010
- Stephen R. Turns (2000) "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications 3rd Edition", Second Edition
- Lin Wei and Lester O. Pordesimo "COgasification of hardwood chip and crude glycerol in a pilot scale downdraft gasifier" Elsevier Ltd, 2011
- S. Nurhadi, Y. S. Utomo, I. Djunaedi, A. Santosa, Y. Hidayat, "Design Calculation of a 100 kWe Refuse Derived Fuel Gasifier" Vol. 9, No. 03, 2020.
- S.J.Ojolo S.M. Abolarin and ²O.Adegbenro Development of a Laboratory Scale Updraft Gasifier 2012
- กิตติพงศ์ เย็นประเสริฐวงศ์ และ คณะ (2020) การพัฒนาหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไฮโดรเจนที่ทำงานร่วมกับแก๊สซิฟิเคชันขนาด 50 kWth การประชุมวิชาการระดับชาติสู่การพัฒนาชุมชนฉลาดในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ครั้งที่ 1 (nSCAP2020) 10 ปี adiCET กับการพัฒนาพลังงานเพื่อท้องถิ่น

จิระพงษ์กวนกระโทก (2557) “การศึกษาการผลิต แก๊สจากเศษชีวมวลโดยใช้เตาผลิตแก๊สชนิดไหล
ลงขนาด เล็ก ”,การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28
จักรวาล เมตตา และ คณะ (2560) การศึกษาสมรรถนะเบื้องต้นของหัวเผาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

ฐิติกร บุญชูวงศ์. การผลิตแก๊สโปรดิวเซอร์จากเศษผักเพื่อใช้เผาของเสียทางเคมี และนำความร้อน
มาใช้ ผลิตเครื่องปั้นดินเผา. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้

จาก : <http://www.sci.nu.ac.th/sciencejournal/index.php/journal/article/view/189/pdf>

บริสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. [ออนไลน์].

เข้าถึงได้ จาก : <http://www.jgsee.kmutt.ac.th/v2/uploads/images/files/pellet.pdf>.

พินิตา เจริญสุข (2557) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการร้องเรียนด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและ
สุขภาพจากการดำเนินการโรงไฟฟ้าชีวมวล

[http://hia.anamai.moph.go.th/download/hia/km/61/hia_km12-1.pdf

ภาณุพงศ์ตันติตันย (2557) “การวิเคราะห์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สซีฟเอร์โดยใช้ขัง
ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง”,การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครัง
ที่ 28

วิรัช อรุณลักษณ์ดำรง (2531). เตาเผาแก๊สแบบไหลขึ้นเพื่อการเผาไหม้โดยตรง. ภาควิชาเทคโนโลยี
พลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
หน้า 66-67

สมชาติ ฉันทศิริวรรณ. “การเผาไหม้” วิศวกรรมโรงไฟฟ้า. หน้า 43-46. 2558 พิมพ์เพื่อ

พรเฉลิมพงศ์. Moisture content / ความชื้น . Moisture content / ความชื้น. [online]. Available
from : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0830/moisture-content-ความชื้น>

สุรพงษ์ คล้ายมุข (2545). การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแบบไหลขึ้น
และไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง. ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อรรถพล โกละกะ (2542). การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหินในเตาปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นโดยใช้
ไอน้ำ เข้าช่วย. ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อนวรรตน์ เกตุคง (2547). การศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการเคลือบฝังโลหะบนตัว

รองรับโดโลไมต์ต่อการลดลงของน้ำมันจากยุคาลิปต์ส. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อริศรา เหล็กคำ (2561)พลังงานชีวมวลในประเทศไทย นโยบาย กฎหมายและการเปลี่ยนผ่าน
Bioenergyin Thailand, Policies, Laws and Transnational





ภาคผนวก ก
ขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่อง,เดินเครื่องและหยุดเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง
สังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

ขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

ตรวจสอบความพร้อมของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ 1.ระบบไฟฟ้า สายไฟ มอเตอร์เกียร์ สายไฟพัดลมป้อนอากาศ สายไฟพัดลมดูดแก๊สไอเสีย สายไฟอินเวอร์เตอร์ สายสัญญาณวัดอุณหภูมิ (อินสทรูเมนต์) สายไฟชุดควบคุมการเปิด-ปิดแก๊ส LPG (หัวเผานำร่อง โซลินอยด์วาล์วของหัวเผานำร่อง) 2.ระบบลำเลียงสกรู โรตารีแอร์ล็อก 3.ระบบน้ำป้อนเข้าเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน มิเตอร์วัดอัตราการไหลเมื่อตรวจสอบความพร้อมเรียบร้อยแล้ว ทำการชั่งชีวมวลอัดเม็ดครั้งละ 25 กิโลกรัมและเติมไว้ในhopperจากนั้นทำการ start สกรูลำเลียงที่ 50 Hz เป็นเวลา 15 นาที เพื่อป้อนชีวมวลอัดเม็ดรองพื้นเตาแก๊สซีไฟเออร์จากนั้นซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 2 กิโลกรัมใส่ถาดทำการจุดไฟด้วยโบลเวอร์ลมร้อนและใส่ในตำแหน่งโรตารีแอร์ล็อก start พัดลมดูดแก๊สไอเสียและพัดลมป้อนอากาศ เปิดวาล์ว AG 100 % เพื่อป้อนอากาศเข้าใต้เตาแก๊สซีไฟเออร์ และ เปิดวาล์ว AB1 10 % เพื่อป้อนอากาศเข้าด้านบนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ พร้อมกับเปิดวาล์ว AB2 เพื่อป้อนอากาศเข้าส่วนต้นของหัวเผาแบบไซโคลนที่ใช้ในการเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่หัวเผานำร่อง (Pilot burner)เพื่อรอแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากเตาแก๊สซีไฟเออร์ เมื่อภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์อุณหภูมิได้ 400 °C เป็นการเสร็จขั้นตอนการเริ่มเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

ขั้นตอนการเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

เมื่อภายในเตาแก๊สซีไฟเออร์อุณหภูมิได้ 400 °C ทำการปรับอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดด้วย อินเวอร์เตอร์ของสกรูลำเลียงและโรตารีแอร์ล็อก เพื่อให้ได้อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h ทำการปรับอัตราการอากาศด้วยอินเวอร์เตอร์ของพัดลมป้อนอากาศจากนั้นทำการปรับวาล์ว AG ที่อัตราการป้อนอากาศ 16,21และ25 m³/h เข้าใต้เตาแก๊สซีไฟเออร์เพื่อผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ตามด้วยการปรับวาล์ว AB 1อัตราการป้อนอากาศ 7,8และ10 m³/h เพื่อป้อนอากาศเข้าด้านบนของเตาแก๊สซีไฟเออร์ช่วยเผาทำลายน้ำมันดิน, สารระเหย และฝุ่นคาร์บอน เมื่อแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตได้มีปริมาณเพียงพอและสามารถติดไฟได้ Pilot burner ซึ่งถูกเปิดให้ทำงานตั้งแต่เริ่มการเดินเครื่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่ปลายหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงกว่า 700 °Cหัวเผานำร่องนี้จะหยุดการทำงานโดยการหยุดจ่ายแก๊ส LPG โดยอัตโนมัติในขณะที่วาล์ว AB2 ที่อัตราการป้อนอากาศ 16,21และ26 m³/h ยังคงไหลเข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องภายในห้องเผาไหม้ส่วนต้นของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน จากนั้นเปิดวาล์ว AB3ที่อัตราการป้อนอากาศ 16,21และ26 m³/h เป็นอากาศที่ป้อนเข้าสู่ท่อเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน

เมื่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เข้าสู่สภาวะคงทำการจดบันทึก อุณหภูมิเตาแก๊สซีฟเฮอร์ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ อุณหภูมิหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลน อุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าเตาแก๊สซีฟเฮอร์ อัตราการป้อนอากาศของวาร์ว AG, AB1, AB2, AB3 ความดันอากาศ อัตราการไหลของน้ำเข้าและออก อุณหภูมิน้ำเข้าและออก ตรวจวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และแก๊สไอเสีย ทุกๆ 10 นาที ซึ่งทุกการทดลองใช้เวลาหนึ่งชั่วโมง

ขั้นตอนการหยุดเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

การหยุดเดินเครื่องผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด ดำเนินการโดยหยุดการทำงานของสกรูลำเลียงชีวมวลอัดเม็ดเข้าสู่เตาแก๊สซีฟเฮอร์ จากนั้นปิดวาล์ว AG และ AB1 และรอจนกระทั่งเปลวไฟที่หัวเผาแบบไซโคลนดับ จากนั้นให้ปิดวาล์ว AB2 และ AB3 ปิดการทำงานของหัวเผานำร่อง (Pilot burner) และปิดแก๊ส LPG ที่ป้อนให้ Pilot burner ปิดวาล์ว น้ำที่ป้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลักจากอุณหภูมิน้ำออกอยู่ประมาณ 40 °c และทำการปิดพัดลมดูดและพัดลมป้อนอากาศเมื่ออุณหภูมิเตาดำว่า 300 °c หลังจากนั้นทำการเก็บเก้าอี้เมื่ออุณหภูมิเตาเย็นตัวลง



ภาคผนวก ข
ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง ข.1 ผลการทดลองที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 10.9(kg/h)ความร้อนที่น้ำ
ได้รับ 25.16 kW ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 51.32%

time	gasifier °C	burner °C	hot air °C	อุณหภูมิ น้ำเข้า °C	อุณหภูมิ น้ำออก °C	อัตราการป้อนอากาศ (m3/h)			
						AG	AB1	AB2	AB3
15.00	429.8	819.3	493.8	32	102	16	7	16	16
15.10	451	826	514	32	102	16	7	16	16
15.20	467.7	805.6	504.3	32	102	16	7	16	16
15.30	484.9	816.6	510.4	32	102	16	7	16	16
15.40	492	813.9	501.6	32	102	16	7	16	16
15.50	472	813.6	500.2	32	102	16	7	16	16
16.00	480.9	813.9	501.5	32	102	16	7	16	16

ตาราง ข.2 ผลการทดลองที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 14.04(kg/h)ความร้อนที่น้ำ
ได้รับ 33.19 kW ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 52.56%

time	gasifier °C	burner °C	hot air °C	อุณหภูมิ น้ำเข้า °C	อุณหภูมิ น้ำออก °C	อัตราการป้อนอากาศ (m3/h)			
						AG	AB1	AB2	AB3
16.00	429.8	819.3	493.8	32	106	21	8	21	21
16.10	451	826	514	32	106	21	8	21	21
16.20	467.7	805.6	504.3	32	106	21	8	21	21
16.30	484.9	816.6	510.4	32	106	21	8	21	21
16.40	492	813.9	501.6	32	106	21	8	21	21
16.50	472	813.6	500.2	32	106	21	8	21	21
17.00	480.9	813.9	501.5	32	106	21	8	21	21

ตาราง ข.3 ผลการทดลองที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 17.04(kg/h)ความร้อนที่น้ำ
ได้รับ 40.99 kW ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 53.48%

time	gasifier °C	burner °C	hot air °C	อุณหภูมิ น้ำเข้า °C	อุณหภูมิ น้ำออก °C	อัตราการป้อนอากาศ (m ³ /h)			
						AG	AB1	AB2	AB3
17.00	529.8	849	560.4	32	108	25	10	26	26
17.10	529.8	848.6	560.7	32	108	25	10	26	26
17.20	529.7	848.7	560.4	32	108	25	10	26	26
17.30	529.7	848.5	560.6	32	108	25	10	26	26
17.40	529.7	848.4	560.7	32	108	25	10	26	26
17.50	529.7	848	560.6	32	108	25	10	26	26
18.00	529.6	848	561	32	108	25	10	26	26

ตาราง ข.4 ผลการทดลองวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห่งที่อัตราการป้อนชีวมวล
อัดเม็ด 10.9(kg/h)

% O ₂	ppm CO	ppm NO	% CO ₂
5.99	329	390	13
5.93	285	392	13
6.00	273	392	13
6.10	273	390	13
6.16	273	389	13
6.09	265	390	13
6.03	252	392	13
6.04	239	393	13
6.08	231	393	13
6.11	227	393	13
6.14	228	393	13
6.10	229	394	13
6.03	232	395	13
5.96	238	396	13
5.80	246	397	13
5.71	259	400	13
5.69	285	401	13
5.58	310	403	13
5.51	325	405	14
5.45	335	407	14
5.42	337	409	14
5.45	344	409	14
5.48	354	407	14

ตาราง ข.5 ผลการทดลองวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์หนึ่งที่อัตราการป้อนชีวมวล
อัดเม็ด 14.04(kg/h)

% O₂	ppm CO	ppm NO	% CO₂
6.07	219	348	13
5.89	264	366	13
5.94	295	373	13
5.95	290	377	13
5.92	259	379	13
5.84	235	383	13
5.65	230	390	14
5.55	238	394	13
5.62	261	398	13
5.72	276	400	13
5.75	263	400	13
5.78	233	400	13
5.84	202	399	13
5.77	183	400	14
5.53	172	401	15
4.18	171	395	15
3.58	226	388	15
5.64	276	403	13
5.76	244	400	13
5.84	214	397	13
5.94	190	393	13
6.04	176	391	13
6.09	165	390	13

ตาราง ข.6 ผลการทดลองวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห่งที่อัตราการป้อนชีวมวล
อัดเม็ด 17.04(kg/h)

% O₂	ppm CO	ppm NO	% CO₂
4.03	1406	278	11
4.88	1146	357	13
4.72	1090	394	14
4.78	1025	409	14
4.84	949	412	14
4.87	926	416	14
4.84	877	417	14
4.76	881	417	14
4.84	840	418	14
4.97	904	419	14
5.13	910	420	14
5.16	824	420	14
5.44	615	409	14
5.46	675	413	14
5.53	732	416	14
5.42	667	417	14
5.24	654	418	14
5.15	648	418	14
5.29	777	419	14
5.30	761	418	14
5.27	576	418	14
5.36	648	417	14



ภาคผนวก ค
ตารางบันทึกผลการวัดมลพิษ

ตาราง ค.1 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากชีวมวล
ที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 10.4 kg/h

% O ₂	ppm CO	ppm NO	% CO ₂
5.99	329	390	13
5.93	285	392	13
6.00	273	392	13
6.10	273	390	13
6.16	273	389	13
6.09	265	390	13
6.03	252	392	13
6.04	239	393	13
6.08	231	393	13
6.11	227	393	13
6.14	228	393	13
6.10	229	394	13
6.03	232	395	13

ตาราง ค.2 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากชีว
มวลที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 14.04 kg/h

% O ₂	ppm CO	ppm NO	% CO ₂
9.98	3	215	10
9.20	44	246	11
8.12	111	277	12
6.92	169	316	13
6.07	219	348	13
5.89	264	366	13
5.94	295	373	13
5.95	290	377	13
5.92	259	379	13
5.84	235	383	13
5.65	230	390	14
5.55	238	394	13
5.62	261	398	13

ตาราง ค.3 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากชีว
มวลที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 17.04 kg/h

% O₂	ppm CO	ppm NO	% CO₂
4.03	1406	278	11.46/12
4.88	1146	357	13
4.72	1090	394	14
4.78	1025	409	14
4.84	949	412	14
4.87	926	416	14
4.84	877	417	14
4.76	881	417	14
4.84	840	418	14
4.97	904	419	14
5.13	910	420	14
5.16	824	420	14
4.45	906		13



ภาคผนวก ง
ตัวอย่างการคำนวณ

ตาราง ง.1 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์หนึ่งที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

อัตรา การ ป้อน ชีวมวล (BFR) (kg/h)	อัตรา การ ป้อน อากาศ (AFR _G) (kg/h)	อัตราส่วน อากาศ ผสม (ER)	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง (% Vol.)					ค่าความ ร้อน HHV (MJ/Nm ³)
			CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	
10.90	18.40	0.290	18.27	4.04	3.29	12.14	0.39	4.13
14.04	24.15	0.296	20.53	5.54	2.56	12.00	0.35	4.32
17.04	28.75	0.290	20.83	5.07	2.26	9.12	0.82	4.18

ตาราง ง.2 อัตราการป้อนอากาศที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

อัตราการป้อน ชีวมวลอัดเม็ด (BFR) (kg/h)	อัตราการป้อน อากาศ A _G (m ³ /h)	อากาศที่ใช้ใน การเผาไหม้ (kg _{air} /kg _{fuel})	อัตราการป้อน อากาศ (AFR _G) (kg/h)	อัตราการป้อน อากาศ (AFR _{th}) (kg/h)
10.90	16	5.8	18.40	63.25
14.04	21	5.8	24.15	81.43
17.04	25	5.8	28.75	98.83

*หมายเหตุ อากาศที่เข้าสู่โรตารี่มีความหนาแน่นระหว่าง 1.151-1.155 kg/m

การคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

ตัวอย่างการคำนวณ

$$AFR_T = [(11.44 \times 0.454) + (34.32 \times 0.0618) + (4.29 \times 0) - (4.29 \times 0.4635)] \times (1 - 0.0833 - 0.0193)$$

$$= [(5.194) + (2.121) + (0) - (1.988)] \times (0.897)$$

$$= 5.33 \times 0.897$$

$$= 4.78 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

การคำนวณหาอัตราอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น

ตัวอย่างการคำนวณ

$$AFR_G = \text{ความหนาแน่นของอากาศที่ความดันสัมบูรณ์} \times A_{G1}$$

$$AFR_G = 1.15 \frac{kg}{m^3} \times 16 \frac{m^3}{h}$$

$$AFR_G = 18.40 \frac{kg}{h}$$

การคำนวณหาค่าอัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี

ตัวอย่างการคำนวณ

$$AFR_{th} = BFR \times \text{อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้}$$

$$AFR_{th} = 10.90 \frac{kg_{fuel}}{h} \times 5.8 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

$$AFR_{th} = 63.25 \frac{kg}{h}$$

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศผสม

ตัวอย่างการคำนวณ

$$ER = \frac{AFR_G}{AFR_{th}}$$

$$ER = \frac{18.40}{63.25}$$

$$ER = 0.290$$

ตาราง ค.3 ค่าความร้อนมาตรฐานของแก๊สที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สเชื้อเพลิง Basu, P., 2010

Gases	H ₂	CO	CH ₄
HHV (MJ/Nm ³)	12.74	12.63	39.82
LHV (MJ/Nm ³)	10.78	12.63	35.88
Specific Heat (kJ/kg)	3.467	1.05	2.226

การคำนวณหาค่าความร้อน

ตัวอย่างการคำนวณ

$$HHV = [\%Producer\ Gas \times HHV]$$

$$HHV = [(4.04 \times 12.74) + (18.27 \times 12.63) + (3.29 \times 39.82)]$$

$$HHV = 4.13 \frac{MJ}{Nm^3}$$

ตาราง ง.4 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากชีวมวลที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

แก๊สเชื้อเพลิง สังเคราะห์จากชีวมวลที่อัตราการป้อนชีวมวล (BFR) (kg/h)	อัตราการป้อน อากาศสำหรับ เผาแก๊ส (AFR _G) (kg/h)	อัตราส่วนอากาศ สมมูลสำหรับเผา แก๊ส EA(1-ER)	องค์ประกอบของแก๊สไอเสียแห้ง			
			O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
10.90	44.85	0.710	6.07	13.08	232	393
14.04	57.50	0.705	5.67	13.47	241	391
17.04	71.30	0.715	4.94	13.77	880	418

*หมายเหตุ สัดส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air, EA) มีค่าประมาณ 10% ของอากาศทางทฤษฎี

การคำนวณหาค่าอัตราการป้อนอากาศสำหรับเผาแก๊ส

ตัวอย่างการคำนวณ

$$AFR_{c,syngas} = EA \times (1 - ER) \times AFR_{th}$$

$$AFR_{c,syngas} = 1 \times (1 - 0.29) \times 63.25 \frac{kg}{h}$$

$$AFR_{c,syngas} = 44.85 \frac{kg}{h}$$

การคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศผสมมูลสำหรับเผาแก๊ส

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\text{อัตราส่วนอากาศผสมมูลสำหรับเผาแก๊ส} = EA \times (1 - ER)$$

$$\text{อัตราส่วนอากาศผสมมูลสำหรับเผาแก๊ส} = 1 \times (1 - 0.29)$$

$$\text{อัตราส่วนอากาศผสมมูลสำหรับเผาแก๊ส} = 0.710$$

ตาราง ง.5 ผลการเก็บรวบรวมเจ้าหน้าที่และถ้ำลอยของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิง
สังเคราะห์เมื่อ ป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

อัตราการ ป้อนชีวมวล (BFR) (kg/h)	อัตราการ ป้อน อากาศ สำหรับ ผลิตแก๊ส (AFR _G) (m ³ /h)	ความเร็ว อากาศเย็น ที่หน้าตัด แก๊สซีไฟ เออร์ (m/s)	อุณหภูมิใน แก๊สซีไฟ เออร์ (°C)	อุณหภูมิ ปลายหัว เผา (°C)	องค์ประกอบของแก๊สไอ เสียแห้ง	
					เจ้าหน้าที่ g/50kgBF	ถ้ำลอย g/kg _{BF}
10.90	16	0.061	468	815	1206.1	14.4
14.04	21	0.080	470	903	1097.7	21.3
17.04	25	0.095	530	949	981.1	31.5

การคำนวณหาความเร็วของอากาศเย็นที่หน้าตัดแก๊สซีไฟเออร์

เมื่อพื้นที่หน้าตัดเตาแก๊สซีไฟเออร์คงที่ที่ 0.073 m²

ตัวอย่างการคำนวณ

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{16 \frac{m^3}{h} \times \frac{1 h}{3600 s}}{0.073 m^2}$$

$$v = 0.061 \frac{m}{s}$$

ตาราง ง.6 ผลการการนำความร้อนจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

อัตราการ ป้อนชีวมวล (BFR) (kg/h)	พลังงาน ป้อนเข้า จากชีวมวล อัดเม็ด (kW)	อุณหภูมิ ปลายหัว เผา ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราการ ไหลของ น้ำป้อน (kg/h)	คุณภาพไอน้ำที่ ทางออก %	ความร้อน ที่น้ำได้รับ (kW)	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน %
10.90	49.03	815	173	4.6	25.16	51.32
14.04	63.15	903	172	12.2	33.19	52.56
17.04	76.64	949	169	20.1	40.99	53.48

ตาราง ง.7 อุณหภูมิน้ำเข้าและออกที่ค่าอัตราการไหลน้ำต่างกัน

อัตราการไหลน้ำ (L/h)	เหลือ	ระเหย	T_{in}	T_{out}
173	165	8	25	100
172	151	21	25	100
169	135	34	25	100

การคำนวณหาคุณภาพไอน้ำที่ทางออก

ตัวอย่างการคำนวณ

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$

$$x = \frac{7.958}{7.958 + 165.042}$$

$$x = 0.046 \text{ หรือ } 4.6\%$$

การคำนวณหาความร้อนที่น้ำได้รับ

หาค่าเอนทัลปีโดยใช้ข้อมูลจากตารางไอน้ำ (Steam table)

$$T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_f = 419.17 \text{ kJ/kg} , h_{fg} = 2256.4 \text{ kJ/kg}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$Q_u = \dot{m}_w \times (h_f + x h_{fg})$$

$$Q_u = \frac{173 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{3600 \text{ s}} \times \left(419.17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.046 \left(2256.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right)$$

$$Q_u = 25.16 \text{ kW}$$

การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\eta_{th} = \frac{25.16 \text{ kW}}{49.03 \text{ kW}}$$

$$\eta_{th} = 0.5132 \text{ หรือ } 51.32\%$$

การคำนวณหาสัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ และสัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้

ตาราง ง.8 สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ และสัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้

สัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ (X_{cr})	สัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ (X_{cb})
0.250	0.4468
0.140	0.4505
0.016	0.4530

การคำนวณหาสัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้

ในการทดลองแต่ละครั้งนำซีเมนต์ที่ได้จากการเผาไหม้มาชั่งน้ำหนักเพื่อหาสัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$X_{cr} = \frac{0.251 - (10.9 \times 0.0193)}{10.9 \times 0.0193}$$

$$X_{cr} = 0.25$$

การคำนวณหาสัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้

เมื่อทราบสัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้แล้ว สามารถนำมาหาสัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$X_{cb} = 0.454 - \frac{0.251 \times 0.0193}{(1 - 0.0251)(1 - 0.0833 - 0.0193)}$$

$$X_{cb} = 0.4468$$

ตาราง ง.9 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริง

สัดส่วนโดยโมลของไนโตรเจน ในไอเสีย (Y_{N_2})	อัตราส่วนอากาศต่อ เชื้อเพลิงจากการวัดไอเสีย (kg_{air}/kg_{fuel})	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากการป้อนอากาศ (kg_{air}/kg_{fuel})
0.8079	8.2	6.4
0.808	8.2	6.4
0.812	8.09	6.4

การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริงที่ได้จากการวัดไอเสีย

เมื่อทราบสัดส่วนคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้และค่าองค์ประกอบไอเสียที่ได้จากการวัด ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), แก๊สออกซิเจน (O_2), แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สามารถนำค่าที่ได้มาหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริงที่ได้จากการวัดไอเสีย

ตัวอย่างการคำนวณ

$$Y_{N_2} = 1 - 0.131 - 0.0607 - 0.0004$$

$$Y_{N_2} = 0.8079$$

$$AFR_A = \frac{1}{0.767} \times \left(\frac{28 \times 0.4468 \times 0.8079}{12(0.000232 + 0.1308)} \right) - 0.0014$$

$$AFR_A = 8.2 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริงที่ได้จากการป้อนอากาศ

เมื่อทราบอัตราการไหลของอากาศรวมสัดส่วนโดยโมลของความชื้นและสัดส่วนโดยโมลของซีไธ้สามารถนำมาหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริงที่ได้จากการป้อนอากาศได้ ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$AFR_A = \frac{63.25}{10.9 \times (1 - 0.0833 - 0.0193)}$$

$$AFR_A = 6.4 \frac{kg_{air}}{kg_{fuel}}$$

การคำนวณประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

ตาราง ง.10 ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน

สัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ (X_{cb})	ประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอน (CCE)
0.4468	0.98
0.4505	0.99
0.4530	0.99

เมื่อทราบสัดส่วนคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้และสัดส่วนคาร์บอนในเชื้อเพลิงสามารถหาประสิทธิภาพการเผาไหม้คาร์บอนได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

$$CCE = \frac{0.4468}{0.454}$$

$$CCE = 0.98$$

การคำนวณอัตราส่วนอากาศเกิน

ตาราง ง.11 อัตราส่วนอากาศเกิน

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริง (kg_{air}/kg_{fuel})	อัตราส่วนอากาศเกิน (%)
8.2	58.29
8.2	58.29
8.09	59.08

เมื่อทราบค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริงที่ได้จากการวัดไอเสียและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี สามารถหาค่าอัตราส่วนอากาศเกินได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

อัตราส่วนอากาศเกิน (%) = (อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี / อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางจริงที่ได้จากการวัดไอเสีย) $\times 100$ %

$$Excess\ Air = \frac{4.78}{8.2} \times 100$$

$$Excess\ Air = 58.29\ %$$





ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

พิชญ แก้วคุณงาม, ภาควิชา ตรีวิทย์, และ สมนาส แก้วล้วน

บทความเรื่อง

"การศึกษาระบบสุขภาพเชิงความยั่งยืนและบทบาทของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สที่ไร้มลพิษสะอาด"

ได้เข้าร่วมการนำเสนอบทความ

ประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพหุภาคีงานมหกรรมสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13

วันที่ 5-7 พฤศจิกายน 2563 ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

(รศ.นิตยพร น. นิตยพร)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

(ดร.จิตพร จิตพร)
นายกสมาคมพหุภาคีงาน
สู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตพร จิตพร)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

จัดประชุมโดย



PROCEEDINGS
**การประชุมสัมมนาวิชาการ
 รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชน
 แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13**
 13th Thailand Renewable Energy
 for Community Conference

5-7 พฤศจิกายน 2563
 ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

**#TREC
 13**
 พลังงานชุมชน
 บนฐาน
 วิถีชีวิตใหม่

#TREC13























สารบัญ

บทความพิเศษ

1.การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ด้านพลังงานทดแทนแบบผสมผสานพลังงานลมและแสงอาทิตย์ กรณีศึกษาโครงการอัยสวอรัย อ.บางนางบวช จ.สุพรรณบุรี	25
2.ระบบตรวจวัดมุมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตามดวงอาทิตย์โดยใช้ IoT	26
3.การจัดการพลังงานโดยใช้หลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงและการบูรณาการเทคโนโลยีพลังงานที่เหมาะสมกับบริบทชุมชน กรณีศึกษา : ตำบลคำแคน อำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น	27
4.การเชื่อม พลังงาน-น้ำ-ของเสีย เพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรในชุมชนฉลาด	28
5.IoT สำหรับระบบบริหารจัดการฟาร์มเกษตรอัจฉริยะ	29
6.การพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบจากฟางข้าวโดยใช้จุลินทรีย์เร่งกระบวนการเพื่อยกระดับการผลิตไฟฟ้าและความร้อนสำหรับชุมชน	30
7.การพัฒนาไปสู่เมืองที่ยั่งยืนด้วยมูลค่าเพิ่มของเทคโนโลยีไบโอเอนรายสำหรับการจัดการขยะชุมชน กรณีศึกษา องค์การบริหารส่วนตำบลท่ามะนาว อ.ชัยบาดาล จ.ลพบุรี	31
8.การประเมินการคืนสภาพทางพลังงาน: กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 4.9 MW	32
9.Town Lab: แอวกเปลี่ยนเมืองให้เคลื่อนที่ช้าลง	33

EI : นวัตกรรมด้านพลังงาน (Energy Innovation)

EI-001 จำนวนแผงและเวลาใช้งานของระบบโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมสำหรับบึงน้ำ	34
EI-002 การประเมินการคืนสภาพทางพลังงาน: กรณีศึกษาระบบแก๊สชีวภาพพร้อมเครื่องปั่นไฟ	42
EI-003 การพัฒนาโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบน็อคดาวน์สำหรับตะกียบไม้ไผ่สด	48
EI-004 การพัฒนาเครื่องนึ่งแกงข้าวเกรียบชนิดให้ความร้อนด้วยแก๊สบีโตรเลียมเหลวสำหรับใช้ในชุมชน	62
EI-005 การศึกษาและพัฒนาระบบไฮโดรโซฟอนควบคุมความเสถียรในการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำค้อยาวที่ติดตั้งบริเวณพื้นที่สูงลาดชัน	68
EI-006 การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์ กข แม่โจ้ 2 ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มูลวัว	82
EI-007 การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด	90
EI-008 การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับการใช้งานผลิตความร้อนและถ่านชีวภาพ	100
EI-009 การวิเคราะห์ต้นทุนและรายได้ของเกษตรกรเมื่อใช้เตาชีวมวลผลิตความร้อนและถ่านชีวภาพพร้อมกัน	106
EI-013 การศึกษาเบื้องต้นด้านการถ่ายเทความร้อนของไม้ไผ่สำหรับการใช้งานในสถานีชาร์จรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าด้วยระบบเติมพลังงานแสงอาทิตย์	112
EI-014 การศึกษาประสิทธิภาพของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัวกึ่งโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นฉนวนกันความร้อน	120
EI-015 การวิเคราะห์ผลกระทบด้านอุณหภูมิจากความสูงแตกต่างต่อผลการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าของโซลาร์เซลล์บนหลังคาจอร์แดนขนาด 10 กิโลวัตต์	126
EI-016 การศึกษาเปรียบเทียบแบบไม่มีและแบบมีการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด สำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์	134
EI-020 การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคากรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา	146
EI-021 การพัฒนาระบบการเผาถ่านกัมมันต์จากเถ้าเผาถ่านร่วนมิงกรไฟ 84	156
EI-022 การผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มด้วยรังสีไมโครเวฟ	162

วันเสาร์ที่ 7 พฤศจิกายน 2563

เวลา	กิจกรรม
08.30 – 09.30 น.	ลงทะเบียน ณ ห้องประชุมใหญ่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
09.00 – 12.00 น.	กิจกรรมศึกษาดูงาน 1. “ระบบเกษตรอัจฉริยะ” ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 2. “ระบบผลิตพลังงานสะอาด” ณ ศูนย์วิจัยและบริการพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ลงทะเบียนสำรองที่นั่งได้ภายในงานฯ)
12.00 น. เป็นต้นไป	เดินทางกลับโดยสวัสดิภาพ



นวัตกรรมด้านพลังงาน (Energy Innovation)

- EI-001 จำนวนแผงและเวลาใช้งานของระบบโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมสำหรับปั๊มน้ำ
- EI-002 การประเมินการคืนสภาพทางพลังงาน: กรณีศึกษาระบบแก๊สชีวภาพพร้อมเครื่องปั่นไฟ
- EI-003 การพัฒนาโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบน็อคดาวน์สำหรับตะกั่วเปียกโฟลด์
- EI-004 การพัฒนาเครื่องนึ่งแกงข้าวเหนียวชนิดให้ความร้อนด้วยแก๊สปิโตรเลียมเหลวสำหรับใช้ในชุมชน
- EI-005 การศึกษาและพัฒนากระบวนการไฮโดรโฟนอนควบคุมความเสถียรในการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันน้ำคอยาวที่ติดตั้งบริเวณพื้นที่สูงลาดชัน
- EI-006 การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวเหนียวสายพันธุ์ กข แม่โจ้ 2 ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มูลวัว
- EI-007 การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด
- EI-008 การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับการใช้งานผลิตความร้อนและถ่านชีวภาพ



5. คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

- | | |
|--|---|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.พดุงศักดิ์ รัตนเดโช | ที่ปรึกษา |
| 2. ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ | ที่ปรึกษา |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณมภ์ ภูมิภักดิ์พิชญ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร แซ่มสีม่วง | ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ไรยนรินทร์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์จิตร | ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยะวิริยะนันท์ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ภาวสุปรีย์ | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |



5. คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

- | | |
|--|---|
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง | ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญฤทธิ ประสาทแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปราชญ์ อัศวนากุล | ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุ ประทุมพรรัตน์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 14. ดร.วินัย จันทรเพ็ง | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 15. ดร.สถาพร ทองวิก | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 16. ดร.วิเชียร อุปแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 17. รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา สมพงษ์ | สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 18. รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิรขจรกุล | สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 19. รองศาสตราจารย์ ดร.สุภกร บุญยืน | สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 20. รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ | สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล สีนุณาวรัตน์ | ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิก เรืองรุ่งชัยกุล | สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาพล ตันติสตัยกุล | สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 24. ดร.บวรรัตน์ พฤกษ์วิศักดิ์ | สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

5. คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

25.ดร.กฤติยา เชื้อนเพชร	สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
26.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ	วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริด เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
27.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประไพธำรี ธนารักษ์	วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริด เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
28.ดร.บงกช ประสิทธิ์	วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ทกริด เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
29.ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรรค	วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
30.ดร.กัญทิพย์ สีนุธา	วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
31.ดร.ณัฐยา ดันตรานนท์	วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
32.ดร.สุรัชย์ ณรัฐ จันทรศรี	วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
33.ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นฤนาท	วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยี ชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
34.รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยภัทร บุษบาบดินทร์	ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
35.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
36.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณีนันท์ วงษ์ซิ้ม	สาขาวิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
37.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สักรินทร์ แซ่กู	สาขาสถาปัตยกรรมผังเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ผังเมือง และนฤมิตศิลป์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
38.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนโชติ เทียนมงคล	ภาควิชาสื่ออนฤมิต คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
39.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระยศ แห้งบัน	ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
40.ดร.อมฤต สมพงษ์	สาขาวิชาการบัญชี คณะการบัญชี และการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
41.ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5. คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบทางวิชาการ

- | | |
|--|--|
| 42. ดร.อำพล อภารณากร | ฝ่ายนวัตกรรมเพื่อสังคม
สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) |
| 43. ดร.นุวงศ์ ชลคุป | ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ |
| 44. ดร.กัมปนาท ชิลวา | ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ |
| 45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รวิภา ยงประยูร | สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง |
| 46. รองศาสตราจารย์ ดร.จตุพร แก้วอ่อน | สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ |
| 47. ดร.สาคร สร้อยสังวาลย์ | วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน
รัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 48. ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ | วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน
รัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 49. ดร.ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| 50. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง | วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |



การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและมลพิษของ ชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จาก ชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด A Study on Performance and Pollution of An Apparatus for Syngas Production and Combustion from Biomass Pellet for Hot Clean Gas Production

พิษณุ แก้วคุณงาม^{1*} ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล และ สมมาส แก้วล้วน²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก 26120

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและมลพิษของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาด ชีวมวลอัดเม็ดถูกแปรรูปสภาพเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากนั้นถูกเผาเพื่อผลิตแก๊สร้อนสะอาดด้วยหัวเผาแบบโซโคลน แก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่ 0.073 m^2 และทำงานร่วมกับหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลนที่พัฒนาขึ้นโดยหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลนสามารถดับจับได้และผลิตแก๊สร้อนสะอาดที่ระดับอุณหภูมิสูงและถ่ายเทความร้อนให้น้ำในเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนก่อนปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและมลพิษดำเนินการที่อัตราการป้อนชีวมวลเข้าเตาแก๊สซีไฟเออร์ที่ 10.90, 14.04 และ 17.04 kg/h ตามลำดับ สอดคล้องกับพลังงานจากชีวมวลอัดเม็ดป้อนเข้าเตาที่ 49, 63 และ 77 kW ตามลำดับ ในขณะที่อากาศจำนวน 4 ส่วนถูกใช้เพื่อผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลนถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อ โดยน้ำมีอัตราการไหลที่ 173 kg/h, 172 kg/h และ 169 kg/h ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีค่าความร้อนทางสูงในช่วง $4.13 - 4.32 \text{ MJ/Nm}^3$ แก๊สไอเสียมีองค์ประกอบของ O_2 , CO_2 , CO และ NOX ในช่วง 4.94-6.07%, 13.08-13.77%, 230-880 ppm, และ 391-418 ppm ตามลำดับ อุณหภูมิที่ทางออกจากหัวเผามีค่าอยู่ในช่วง $815 - 949^\circ\text{C}$ และประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนและไอน้ำมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 51.32-53.48 ซึ่งผลการคำนวณอาจมีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากไม่สามารถวัดคุณภาพไอน้ำที่ทางออกได้โดยตรง

คำสำคัญ: แก๊สซีไฟเออร์แบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น
หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลน ชีวมวลอัดเม็ด

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลักทำให้รัฐบาลหลายสมัยกำหนดนโยบายในการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ โดยมุ่งพัฒนาพลังงานหมุนเวียน [1] พลังงานทดแทนในอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้คือพลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นพลังงานที่หลายประเทศให้การยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลาย [2] และรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ได้สะดวกคือ แบบเชื้อเพลิงชีวมวลอัด



อัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ

การแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเครื่องแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สแบบเบดนิ่งอากาศไหลขึ้น (fixed bed updraft gasifier) โดยมีค่าอัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (specific gasification rate, SGR) อยู่ในช่วง 100-250 kg/m²-h [5-6] ซึ่งอัตราการป้อนชีวมวลหาได้จากสมการที่ 1 โดยที่ SGR สูงส่งผลอัตราการป้อนชีวมวลและอัตราการป้อนอากาศสูงขึ้นและผลที่ตามมาคือความเร็วในการไหลของอากาศผ่านตะแกรงเตามีค่าเพิ่มขึ้นและความเร็วของแก๊สผ่านหน้าตัดของแก๊สไฟเฟอร์สูงขึ้นซึ่งส่งผลให้อนุภาคของฝุ่นคาร์บอนและเถ้าลอยตามกระแสแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้มากขึ้น

$$BFR = \frac{E_{b.in}}{LHV_b} \times 3600 \quad (1)$$

พลังงานจากชีวมวลอัดเม็ดป้อนเข้าเตา

อัตราการป้อนพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลเข้าสู่เครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีความสัมพันธ์กับอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ดและค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ดซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$E_{b.in} = \frac{BFR \times LHV_b}{3600} \quad (2)$$

โดยที่ $E_{b.in}$ คือ พลังงานจากชีวมวลป้อนเข้าเตา (kW)
 BFR คือ อัตราการป้อนชีวมวล (kg/h)
 LHV_b คือ ค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ด (kJ/kg)

อัตราส่วนอากาศผสม

อัตราส่วนผสม (equivalence ratio, ER) คืออัตราส่วนระหว่างสัดส่วนผสมระหว่างอากาศกับชีวมวลสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเทียบกับสัดส่วนผสมระหว่างอากาศกับชีวมวลสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี โดยทั่วไปค่า ER มีค่าอยู่ในช่วง 0.25-0.45 [7] ซึ่งแสดงในสมการที่ 3 และอัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหาได้จากสมการที่ 4

$$ER = \frac{\frac{AFR_G}{BFR}}{\frac{AFR_{th}}{BFR}} = \frac{ABR_G}{ABR_{th}} \quad (3)$$

$$AFR_G = ER \times AFR_{th} = ER \times ABR_{th} \times BFR \quad (4)$$

โดยที่ AFR_G คือ อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (kg/h)
 AFR_{th} คือ อัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี (kg/h)
 ABR_G คือ อัตราส่วนอากาศต่อชีวมวลสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
 ABR_{th} คือ อัตราส่วนอากาศต่อชีวมวลสำหรับกระบวนการเผาไหม้ทางทฤษฎี

อัตราการป้อนอากาศเพื่อเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อัตราการป้อนอากาศสำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ($AFR_{C,syngas}$) หาได้จากสมการที่ 5 ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างอัตราส่วนอากาศส่วนเกินกับผลต่างระหว่างอัตราการป้อนอากาศทางทฤษฎีและอัตราการป้อนอากาศสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยสัดส่วนอากาศส่วนเกิน (excess air, EA) มีค่าประมาณ 10-20% ของอากาศทางทฤษฎีสำหรับเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และอากาศทางทฤษฎีสำหรับการเผาไหม้แบบสมบูรณ์หาได้จากสมการที่ 6

$$AFR_{C,syngas} = EA \times (AFR_{th} - AFR_G) = EA \times (1 - ER) \times AFR_{th} \quad (5)$$

$$AFR_{th} = BFR \times ABR_{th} \quad (6)$$



วิธีการวิจัย

วัตถุดิบสำหรับการทดลอง

ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ผลิตจากบริษัทศรีโรจน์รุ่งเรืองจำกัดในพื้นที่จังหวัดสพบุรีเม็ดเชื้อเพลิงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 10-20 mm มีค่าความหนาแน่น (bulk density) สูง อยู่ในช่วงระหว่าง 600-700 kg/m³ มีค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยถ้าในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดประมาณ 1.93% ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่นเห้ามันสำปะหลังซึ่งขี้ขาวโพดเปลือกยูคาสิปติสและเศษไม้เหลือใช้ ปักไม้



ภาพที่ 2 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดบริษัท ศรีโรจน์รุ่งเรือง

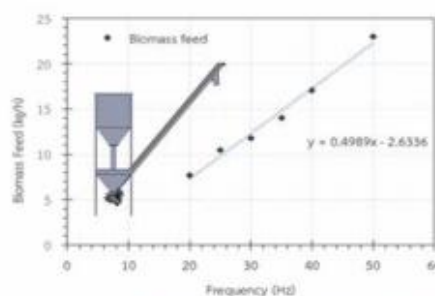
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

องค์ประกอบ	ปริมาณ	องค์ประกอบ	ปริมาณ
Moisture, %W	8.33	Carbon: C, %W	45.40
Volatile Matter, %W	73.12	Hydrogen: H, %W	6.18
Fixed carbon, %W	16.62	Oxygen: O, %W	46.35
Ash, %W	1.93	Nitrogen: N, %W	0.14
LHV, kJ/kg	16,192	Sulfur: S, %W	0.00
HHV, kJ/kg	17,489	Air Biomass Ratio: ABR _{dry} -	5.33

สกรูลำเลียงและโรตารีแอร์ลอคควาล์วป้อนชีวมวลอัดเม็ด

ชีวมวลอัดเม็ดถูกลำเลียงจากกกเก็บและถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยเกสส์วาล์วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ระยะพิท 4 นิ้ว มีความเร็วรอบสูงสุดที่ 1.75 rpm และสามารถปรับความเร็วรอบลดลงได้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดไหลเข้าสู่โรตารีแอร์ลอคควาล์วและถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ตามลำดับผลการปรับเทียบอัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดผ่านสกรูลำเลียงแสดงดังรูปที่ 2 เมื่อสกรูลำเลียงหมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุดและต่ำสุดที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ 50 และ 20 Hz ส่งผลให้อัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดมีค่า 23 และ 7 kg/h ตามลำดับซึ่งอัตราการไหลของชีวมวลจริงต่ำกว่าอัตราการไหลของชีวมวลอัดเม็ดที่คำนวณได้ประมาณ 20-25%





ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการหมุนของชุดป้อนชีวมวลกับอัตราการป้อนชีวมวล

ชุดป้อนอากาศสำหรับชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

อากาศถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยเครื่องเป่า (Norvax NVT-150, 1.6 kW) อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบการหมุนของเครื่องเป่าและความเร็วรอบการหมุนถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ (Delta FVD-M5300) อุณหภูมิอากาศถูกวัดด้วยไฟเบอร์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple K-Type) ความดันอากาศถูกวัดด้วยเกจวัดความดัน (Bourdon, 0-10 kPa) อากาศถูกแยกเป็น 4 ส่วนและถูกวัดอัตราการไหลแต่ละส่วนด้วยโรตาริเตอร์ (Double Ring LZB-25, 5-50 m³/h) และสัดส่วนอัตราการไหลของอากาศแต่ละส่วนถูกปรับแบ่งด้วยวาล์วขนาด 1 นิ้ว (KITZ-316, 600 UTKM) ที่ติดตั้งอยู่บนโรตาริเตอร์ โดยอากาศส่วนแรกใช้สำหรับการกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ และอีก 3 ส่วนใช้สำหรับเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- อากาศส่วนที่ 1 (AG) ถูกป้อนเข้าสู่ส่วนล่างโดยรอบห้องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ โดยอากาศส่วนนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดได้ผลผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์
- อากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้าบริเวณด้านบนบนของห้องผลิตแก๊สในตำแหน่งปลายท่อป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องผลิตแก๊สเพื่อทำหน้าที่ 2 อย่างคือ 1. เพื่อป้องกันการรั่วของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ออกทางท่อป้อนชีวมวล 2. เพื่อช่วยเผาทำลายน้ำมันดิน, สารระเหย และฝุ่นคาร์บอนซึ่งทำให้อุณหภูมิในท่อส่งแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงขึ้นและช่วยให้เกิดเสถียรภาพในการดีดไฟหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์อีกทั้งยังช่วยลดคาร์บอนในแก๊สด้วย
- อากาศส่วนที่ 3 (AB2) เป็นอากาศที่ใช้สำหรับเผาไหม้แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่หัวเผานำร่อง (Pilot burner) ซึ่งถูกเปิดให้ทำงานตั้งแต่เริ่มการเดินเครื่องจนกระทั่งอุณหภูมิที่ปลายหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงกว่า 700 °C หัวเผานำร่องนี้จะหยุดการทำงานโดยการหยุดจ่ายแก๊ส LPG โดยอัตโนมัติ ในขณะที่อากาศส่วนนี้ยังคงไหลเข้าสู่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องภายในห้องเผาไหม้ส่วนต้นของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลนที่บริเวณนี้แก๊สอลอยที่ไหลมากับแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จะถูกเหวี่ยงและตกลงสู่ถังเก็บแก๊สด้วย
- อากาศส่วนที่ 4 (AB3) เป็นอากาศที่ป้อนเข้าสู่ท่อเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลนเพื่อทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ซึ่งส่งผลให้ได้แก๊สร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูงและมีค่ามลพิษต่ำ



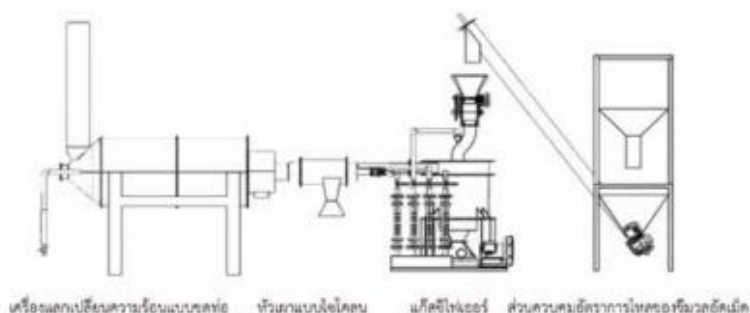
ภาพที่ 4 ชุดป้อนอากาศสำหรับผลิตและเผาแก๊ส



หลักการการทำงานของชุดอุปกรณ์ผลิตแกละแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

เครื่องผลิตแกละแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์คือแก๊สซิฟิเคชันแบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้น (fixed bed updraft gasifier) ที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ที่ 0.073 m^2 สร้างด้วยปูนทนไฟและถูกห่อด้วยฉนวนเซรามิกและผนังโลหะเมื่อกำหนดค่าอัตราการแปรสภาพชีวมวลให้เป็นแก๊สจำเพาะ (specific gasification rate, SGR) อยู่ในช่วง $100\text{--}250 \text{ kg/m}^2\text{-h}$ จึงสามารถคำนวณหาอัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด (Biomass Feed Rate : BFR) ได้ในช่วง $7.30\text{--}18.25 \text{ kg/h}$ และจากค่าความร้อนทางต่ำของชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่า $16,192 \text{ kJ/kg}$ จึงคำนวณหาค่าพลังงานจากชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตแกละแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ได้ในช่วง $33\text{--}82 \text{ kW}$ ตามลำดับ แกละอากาศส่วนแรก (AG) ถูกป้อนเข้าสู่แก๊สซิฟิเคชันที่อัตราการไหลในช่วง $11.67\text{--}29.18 \text{ kg/h}$ เมื่อกำหนดให้ ER มีค่าเท่ากับ 0.3 ในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์กำลังไหลออกจากแก๊สซิฟิเคชันมีอากาศส่วนที่ 2 (AB1) ถูกป้อนเข้ามาผ่านท่อลำเลียงเม็ดเชื้อเพลิงจากด้านบนของแก๊สซิฟิเคชันซึ่งอากาศส่วนนี้ช่วยป้องกันแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ย้อนออกช่องทางป้อนเม็ดเชื้อเพลิงและช่วยเผาไหม้ฝุ่นคาร์บอน น้ำมันดิน และแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์บางส่วน ทำให้อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สูงขึ้นขณะไหลเข้าสู่หัวเผาทำให้หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีศักยภาพในการติดไฟดีขึ้น

หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนที่พัฒนาขึ้นใหม่มีหลักการทำงานคือแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ร้อนที่มีฝุ่นและถ่านลอยเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบไซโคลนและผสมกับอากาศส่วนที่ 3 (AB2) แล้วเกิดการเผาไหม้ถ่านลอยถูกเหวี่ยงตกลงสู่ถังเก็บในขณะที่แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่กำลังเกิดการเผาไหม้ไหลเข้าสู่ท่อเผาไหม้ซึ่งเป็นห้องเผาไหม้ส่วนปลายของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลนเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กับอากาศส่วนที่ 4 (AB3) ซึ่งส่งผลให้ได้แก๊สร้อนสะอาดที่ระดับอุณหภูมิสูงและมีค่ามลพิษต่ำ โดยแก๊สร้อนสะอาดจะไหลเข้าสู่เครื่องต้มน้ำเพื่อนำความร้อนที่ได้ไปใช้ประโยชน์



ภาพที่ 5 แผนภาพการทำงานของชุดอุปกรณ์ผลิตแกละแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ด

เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองผลิตแกละแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดดำเนินการที่ 3 ภาวะความร้อนตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งสอดคล้องกับค่า SGR 3 ระดับคือ $150, 192$ และ $233 \text{ kg/m}^2\text{-h}$ ดังแสดงในตารางที่ 2



ตารางที่ 2 การทดลองผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ

อัตราการป้อนชีวมวล อัตรา (kg/h)	อัตราการป้อนพลังงาน จากชีวมวล (kW)	อัตราการป้อนอากาศ (m ³ /h)			
		A ₀	A ₀₁	A ₀₂	A ₀₃
10.9	49	16	7	16	16
14.04	63	21	8	21	21
17.04	77	25	10	26	26

หมายเหตุ: อากาศที่เข้าสู่เตาเผามีความหนาแน่นระหว่าง 1.151-1.155 kg/m³**การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์**

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากผลที่ได้จากการวัดและวิเคราะห์วัตถุดิบและผลผลิตที่ได้จากระบบโดยองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดวัดด้วยเครื่อง MRU (VARIO Plus for Syngas Analysis) ในขณะที่แก๊สไอเสียจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์วัดด้วยเครื่อง TESTO (Flue Gas Analyzer 350XL) ในขณะที่ถ่านล้อยซึ่งถูกเหวี่ยงและแยกออกจากหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบไซโคลอนจะตกสู่ถังเก็บและเมื่อเสร็จสิ้นการทดลองจะถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณถ่านล้อยที่ตกจับได้

ความร้อนที่ได้จากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกถ่ายเทให้น้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนและไอน้ำโดยอัตราการรับความร้อนโดยน้ำและประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ของการนำพลังงานจากชีวมวลไปใช้ในการต้มน้ำแสดงในสมการที่ 7 และ 8

$$Q_u = \dot{m}_w \times [(h_f + x h_{fg}) - h_1] \quad (7)$$

$$\text{Thermal Efficiency} = \frac{Q_u}{E_{b, in}} \quad (8)$$

เมื่อ Q_u = ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ kw
 $\dot{m}_w$ = อัตราการไหลของน้ำป้อน kg/h
 h_1 = เอนทัลปีของน้ำป้อน kJ/kg
 h_f, h_{fg} = เอนทัลปีของน้ำอิ่มตัว และเอนทัลปีในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ kJ/kg
 x = คุณภาพไอน้ำ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย**ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์**

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากแก๊สซิฟิเคชันแบบเบดนิ่งชนิดอากาศไหลขึ้นที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ ถูกวัดและวิเคราะห์แบบต่อเนื่องพบว่ามีความองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 2 และสามารถคำนวณหาค่าความร้อนทางสูง (HHV) ของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.13 – 4.32 MJ/Nm³ และค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) มีค่าอยู่ในช่วง 3.92-4.11 MJ/Nm³ อย่างไรก็ตามในแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ออกจากแก๊สซิฟิเคชันยังมีส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้อื่น ๆ ปะปนอยู่ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ น้ำมันดิน สารอินทรีย์ระเหยง่าย และฝุ่นคาร์บอน เป็นต้น



ตารางที่ 3 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

อัตราการป้อนชีวมวล (BFR)	อัตราการป้อนอากาศ (AFR _A)	อัตราส่วนอากาศผสม (ER) -	องค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้ง (% Vol.)					ค่าความร้อน HHV
kg/h	kg/h		CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	MJ/Nm ³
10.90	18.45	0.288	18.27	4.04	3.29	12.14	0.39	4.13
14.04	24.26	0.294	20.53	5.54	2.56	12.00	0.35	4.32
17.04	28.78	0.287	20.83	5.07	2.26	9.12	0.82	4.18

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สไอเสีย

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากแก๊สซิฟิเคชันแบบบดขี้นกอากาศไหลขึ้นที่อัตราการป้อนชีวมวล 3 ระดับ ถูกวัดและวิเคราะห์แบบต่อเนื่องพบว่ามีความสอดคล้องดังแสดงในตารางที่ 2 และสามารถคำนวณหาค่าความร้อนทางสูง (HHV) ของแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แห้งซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.13 – 4.32 MJ/Nm³ และค่าความร้อนทางต่ำ (LHV) มีค่าอยู่ในช่วง 3.92-4.11 MJ/Nm³ อย่างไรก็ตามในแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ออกจากแก๊สซิฟิเคชันยังมีส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้อื่น ๆ ปะปนอยู่ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ น้ำมันดิน สารอินทรีย์ระเหยง่าย และฝุ่นคาร์บอน เป็นต้น

ตารางที่ 4 ผลการวัดองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากชีวมวลที่อัตราการป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลที่อัตราการป้อนชีวมวล (BFR) kg/h	อัตราการป้อนอากาศสำหรับเผาแก๊ส (AFR _G) kg/h	อัตราส่วนอากาศผสมสำหรับเผาแก๊ส EA(1-ER)	องค์ประกอบของแก๊สไอเสียแห้ง			
			O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
10.90	44.97	0.774	6.07	13.08	232	393
14.04	57.65	0.770	5.67	13.47	241	391
17.04	71.49	0.767	4.94	13.77	880	418

ผลของสภาวะการทำงานงานของชุดอุปกรณ์ต่อปริมาณแก๊สและค่าล้อยที่ดักจับได้

จากการเก็บรวบรวมแก๊สหนักและค่าล้อยจากถังเก็บที่แก๊สซิฟิเคชันและวิเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคลเมื่อป้อนชีวมวลครบ 50 kg พบว่าแก๊สหนักมีปริมาณลดลงเมื่ออัตราการป้อนชีวมวลเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าล้อยที่เก็บได้มีปริมาณมากขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มากขึ้นโดยที่ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงทุก ๆ 50 kg จะมีชี้แก๊สจากเชื้อเพลิงป้อน 965 g โดยผลรวมมวลแก๊สหนักและค่าล้อยที่เก็บได้มีค่ามากกว่ามวลชี้แก๊สเนื่องจากมีคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ผสมในแก๊สทั้ง 2 ส่วน

ตารางที่ 5 ผลการเก็บรวบรวมแก๊สหนักและค่าล้อยของชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เมื่อป้อนชีวมวลอัดเม็ด 3 ระดับ

อัตราการป้อนชีวมวล (BFR) kg/h	อัตราการป้อนอากาศสำหรับผลิตแก๊ส (AFR _G) m ³ /h	ความเร็วอากาศเข้าที่หน้าตัดแก๊สซิฟิเคชัน (m/s)	อุณหภูมิในแก๊สซิฟิเคชัน °C	อุณหภูมิปลายหัวเผา °C	องค์ประกอบของแก๊สไอเสียแห้ง	
					แก๊สหนัก g/50kg _{dry}	ค่าล้อย kg/kg _{dry}
10.90	16	0.061	468	815	1206.1	14.4
14.04	21	0.080	470	903	1097.7	21.3
17.04	25	0.095	530	949	981.1	31.5



ผลการวิเคราะห์การนำความร้อนจากการเผาไหม้ไปใช้ประโยชน์

ความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ด้วยหัวเผาแบบโซโคสน โดยแก๊สร้อนสะอาดไหลเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและถ่ายเทความร้อนให้แก่น้ำเพื่อผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเหมาะสมจากนั้นไอน้ำที่ถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศซึ่งผลการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 6 ผลการนำความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์

อัตราการป้อน ชีวมวล (BFR)	พลังงานป้อนเข้า จากชีวมวลอัดเม็ด	อุณหภูมิ ปลายหัวเผา	อัตราการไหล ของน้ำป้อน	คุณภาพไอน้ำ ที่ทางออก	ความร้อน ที่น้ำได้รับ	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน
kg/h	kW	°C	kg/h	%	(kW)	%
10.90	49.03	815	173	4.6	25.16	51.32
14.04	63.15	903	172	12.2	33.19	52.56
17.04	76.64	949	169	20.1	40.99	53.48

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองผลิตและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสามารถสรุปได้ว่าแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ผลิตจากแก๊สซิฟิเคชันมีค่าความร้อนสูงอยู่ในช่วง 4.13-4.32 MJ/Nm³ มีค่าและฝุ่นคาร์บอนลอยผสมไปกับกระแสแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปริมาณถ่านล้อยที่ดักจับได้ที่หัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์แบบโซโคสนโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 14.4-35.5 g ตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลและอากาศเข้าสู่แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มขึ้นและความเร็วกระแสแก๊สร้อนที่ผ่านหน้าตัดของแก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มขึ้นแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ถูกเผาไหม้ในหัวเผาแบบโซโคสนได้อย่างมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สที่เผาไหม้ต่ำอยู่ในช่วง 232-880 ppm และปล่อยชิ้นส่วนเกินในไอน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 4.94-6.07 อุณหภูมิแก๊สที่เผาไหม้บริเวณทางออกจากหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์มีค่าอยู่ในช่วง 815-949 °C โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลและอากาศเข้าสู่แก๊สซิฟิเคชันที่เพิ่มขึ้น ความร้อนที่ได้จากชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวลอัดเม็ดถ่ายเทให้กับน้ำที่ไหลภายในชุดแลกเปลี่ยนความร้อนและสามารถหาปริมาณความร้อนที่น้ำได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 25.16 - 40.99 kW และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 51.32-53.48 ตามค่าพลังงานจากชีวมวลอัดเม็ดป้อนเข้าเตาที่เพิ่มขึ้นซึ่งค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนอาจมีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากคุณภาพไอน้ำที่ทางออกหาโดยการปล่อยไอน้ำเข้าสู่อ่างที่แยกไอน้ำเปิดสู่บรรยากาศทำให้น้ำบางส่วนอาจเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวมากขึ้น



กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนการเข้าร่วมประชุมและเสนอผลงานจากบัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2564

เอกสารอ้างอิง

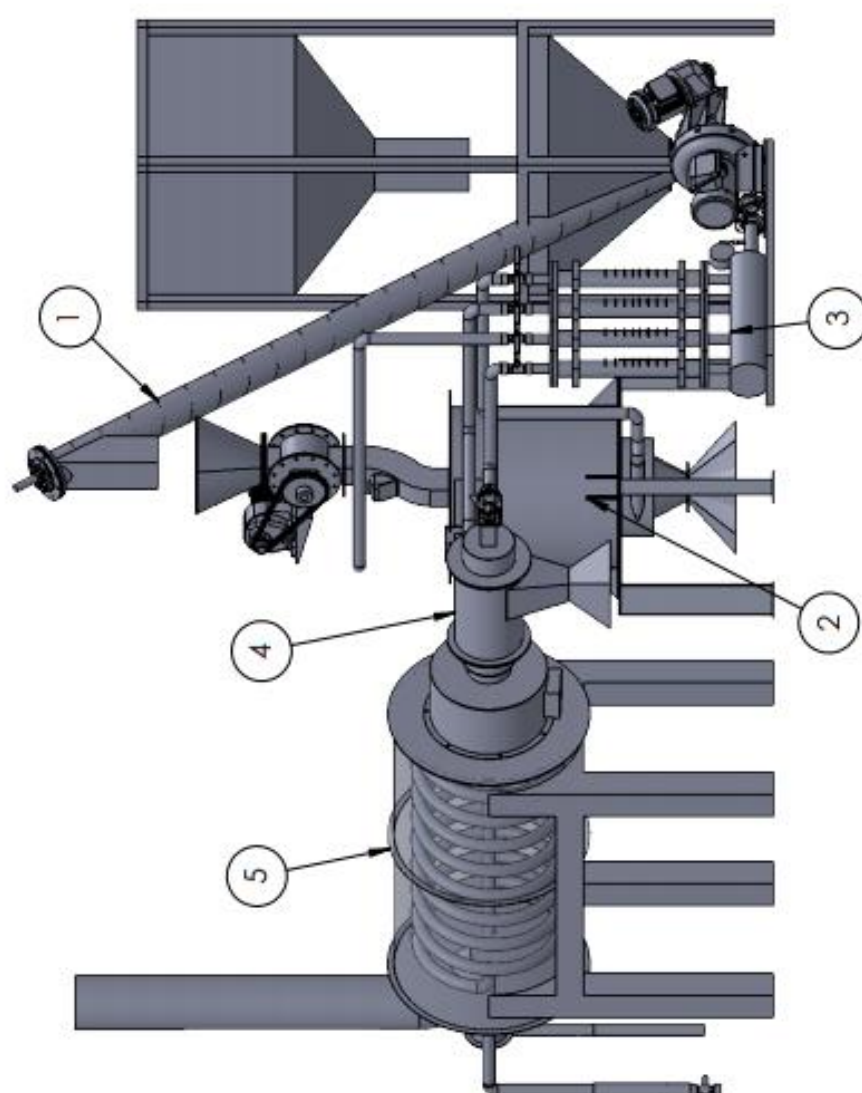
- [1] อริศรา เหล็กคำ (2561)พลังงานชีวมวลในประเทศไทย นโยบาย กฎหมายและการเปลี่ยนผ่านBioenergyin Thailand, Policies, Laws and Transnational
- [2] พนิดา เจริญสุข (2557) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการร้องเรียนด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากการดำเนินการโรงไฟฟ้าชีวมวล[http://hia.anamai.moph.go.th/download/hia/km/61/hia_km12-1.pdf]
- [3] R. P. Devi and S. Kamraj, "Design and development of updraft gasifier using solid biomass," International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, vol. 6, no. 4, pp. 182-189, 201
- [4] S. Nurhadi, Y. S. Utomo, I. Djunaedi, A. Santosa, Y. Hidayat, "Design Calculation of a 100 kWe Refuse Derived Fuel Gasifier" Vol. 9, No. 03, 2020.
- [5] Kaewluan, S and Pipatmanomai, S. (2007) Preliminary Study of Rubber Wood Chips Gasification in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor: Effect of Air to Fuel Ratio, PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, May10-11, 2007, Phuket, Thailand
- [6] สมชาติ ฉันทศิริวรรณ (2558). วิศวกรรมโรงไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 316 E-book,
- [7] Kluska, Jacek & Ochnio, Mateusz & Kazimierski, Pawel & Kardaś, Dariusz. (2018). Comparison of downdraft and updraft gasification of biomass in a fixed bed reactor. Archives of Thermodynamics, 39. 59-69. 10.1515/aoter-2018-0029.





ภาคผนวก จ

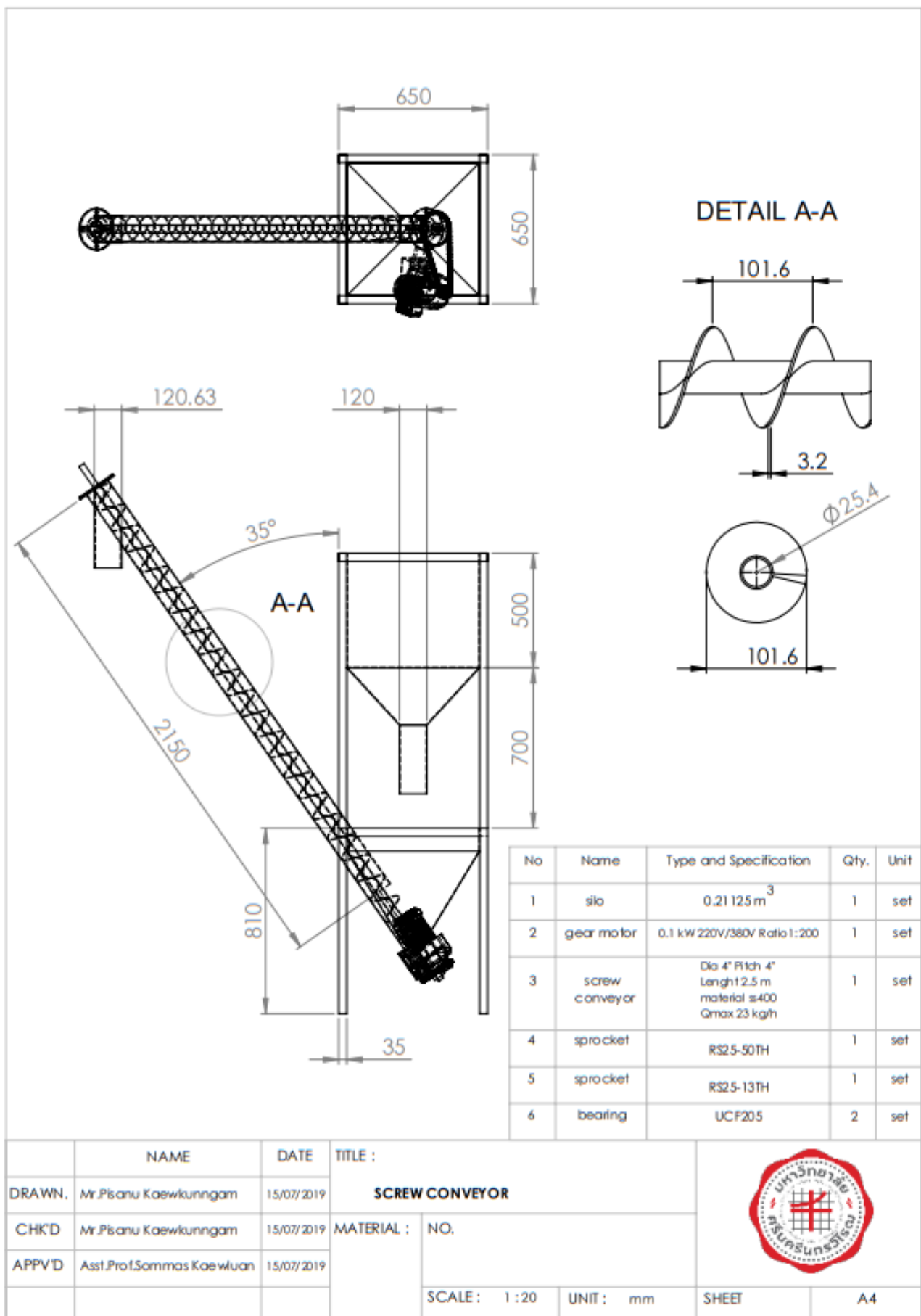
ชิ้นส่วนชุดอุปกรณ์ผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์

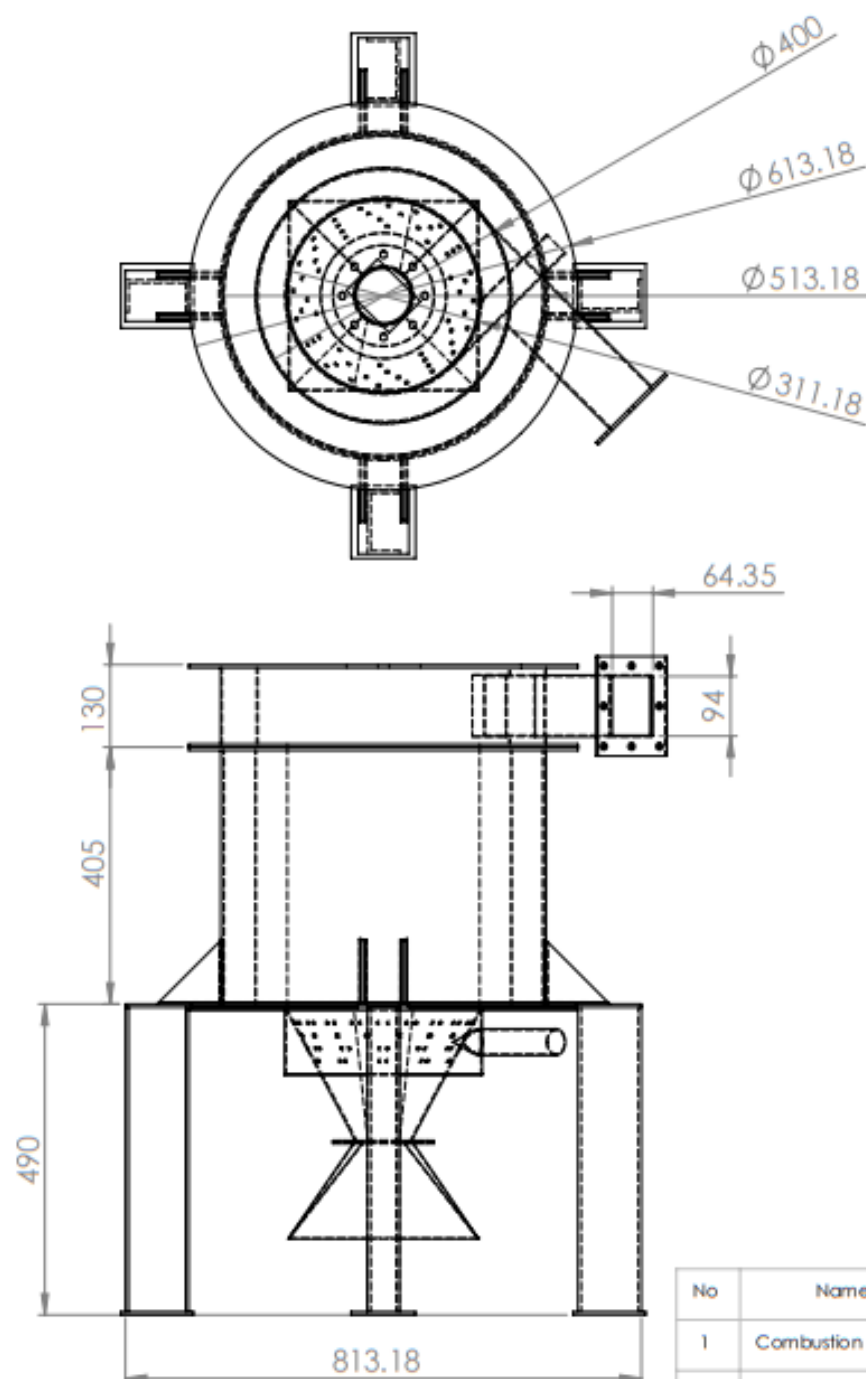


No	Name
1	Screw Conveyor
2	Combustion gasifier
3	Air Combustion
4	Cyclone Burner
5	Heat exchanger

DRAWN. Mr.Pisarnu Kaewkurngarn		DATE	15/07/2019			TITLE :		STUDY OF THE PERFORMANCE AND EMISSION OF BIOMASS PELLET FUEL GAS BURNER WITH CLEAN HOT GAS SYSTEM			SHEET		A4	
CHK'D	Mr.Pisarnu Kaewkurngarn		15/07/2019			MATERIAL :		NO.			SCALE : 1 : 20		UNIT : mm	
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewkuan		15/07/2019											

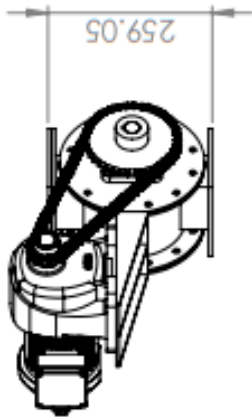
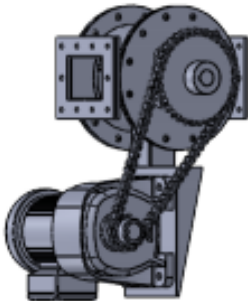
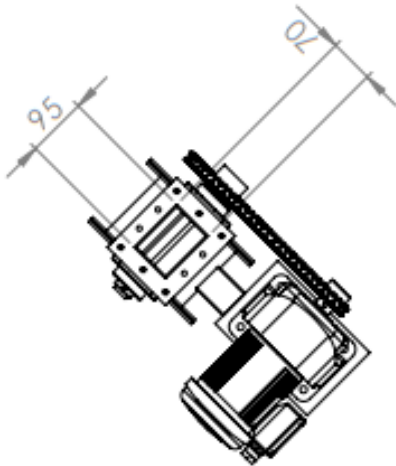






No	Name	Material
1	Combustion gasifier	SUS304
2	Refractory	C60A
3	Ceramic Fiber	

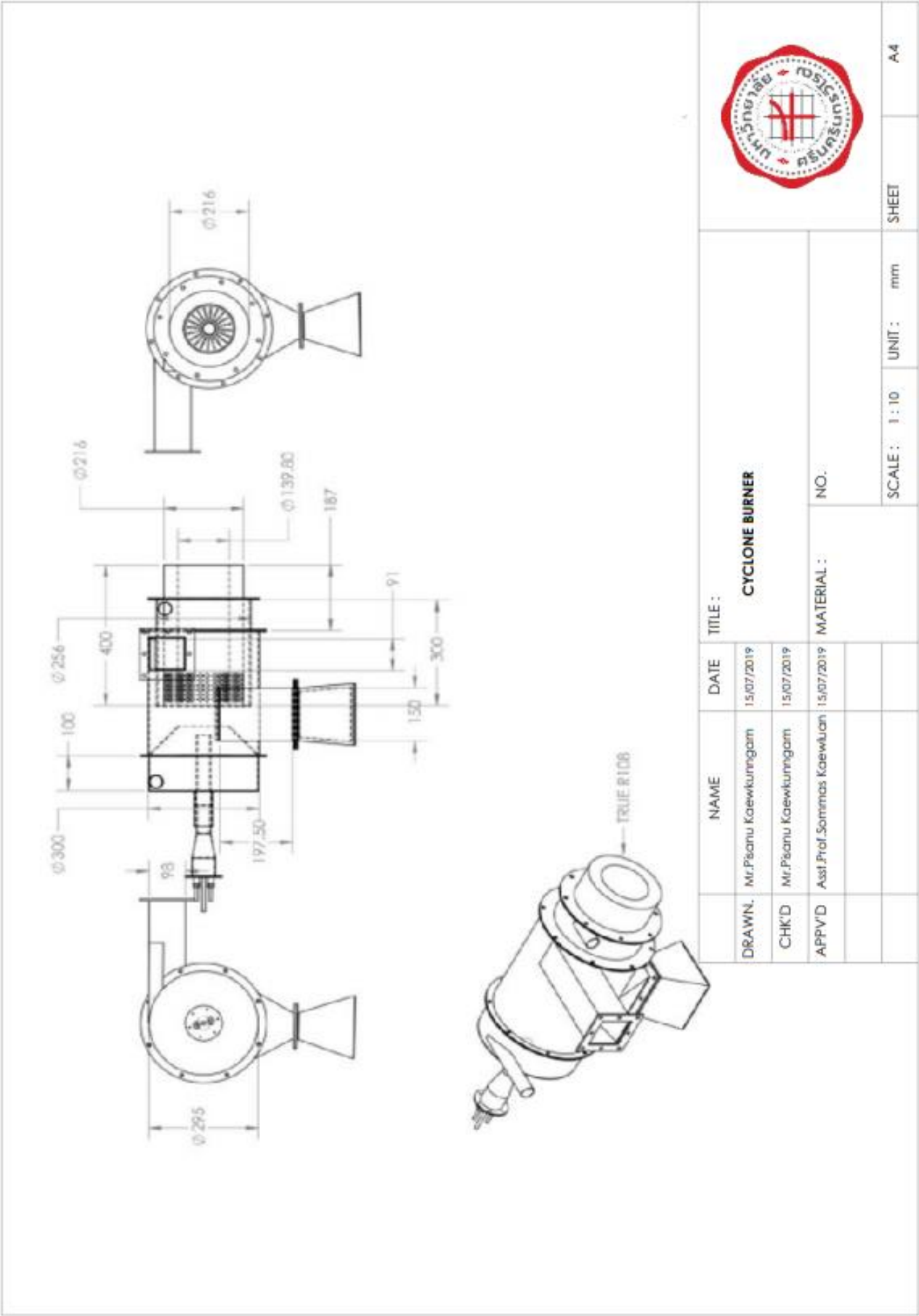
	NAME	DATE	TITLE :					
DRAWN.	Mr.Pisanu Kaewkungam	15/07/2019	COMBUSTION GASIFIER					
CHK'D	Mr.Pisanu Kaewkungam	15/07/2019	MATERIAL :	NO.				
APPV'D	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	15/07/2019						
			SCALE :	1 : 10	UNIT :	mm	SHEET	A4

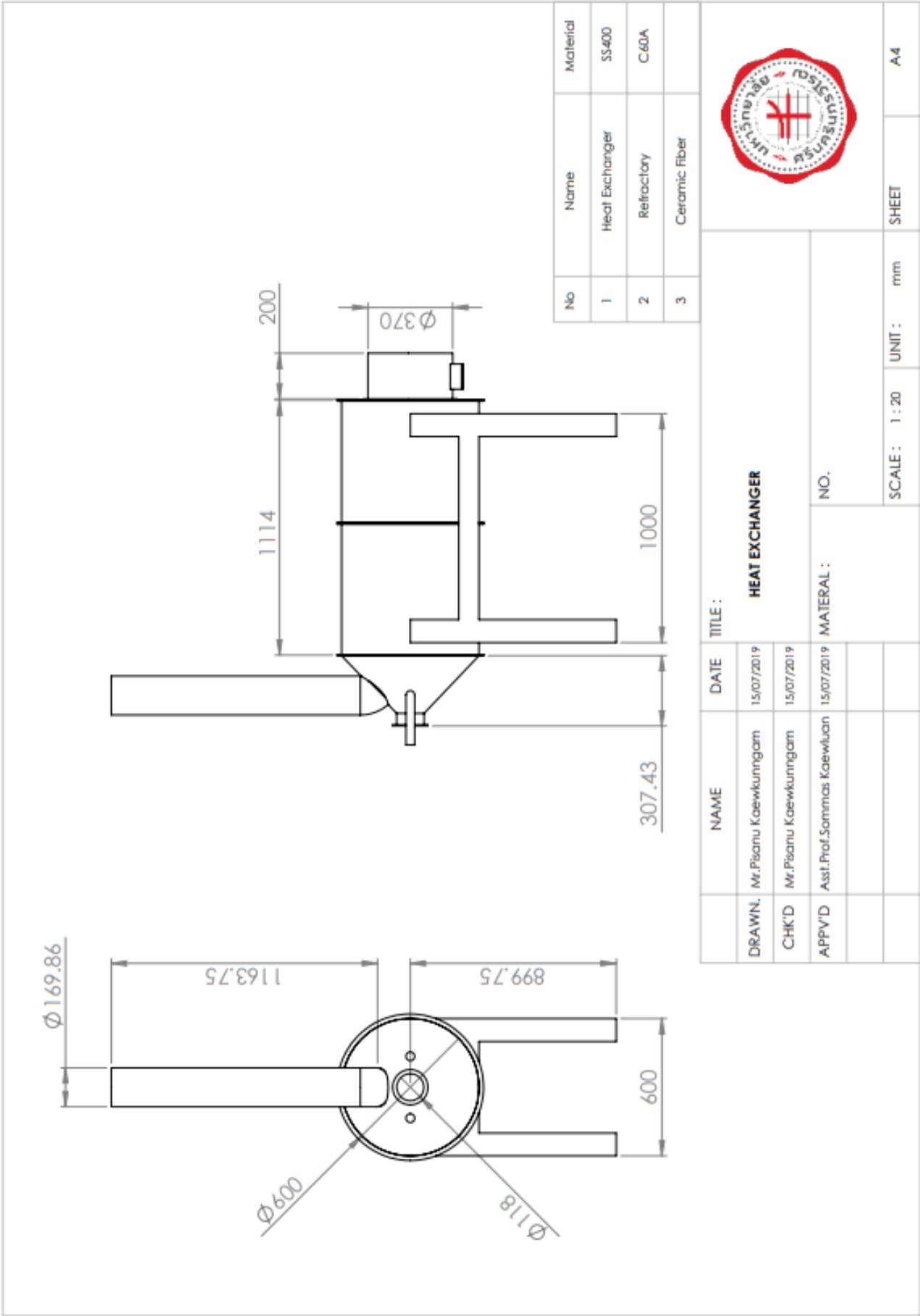


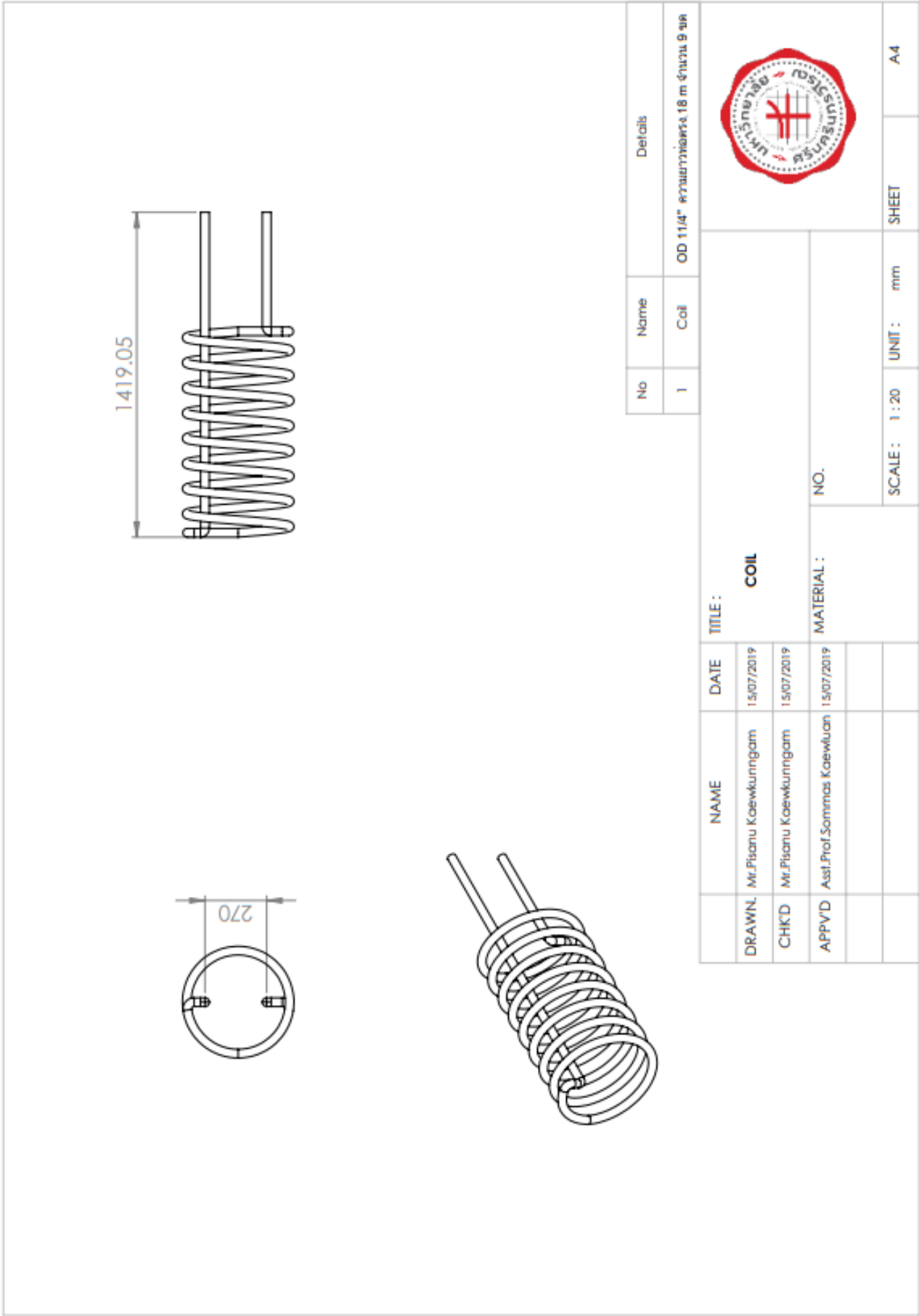
No	Name	Type and Specification	Qty.	Unit
1	Rotary Airlock	Qmax 23 kg/m ³	1	set
2	gear motor	0.1 kW 220V/380V	1	set
3	sprocket	RS25-30TH	1	set
4	sprocket	RS25-17TH	1	set
5	bearing	UCF205	2	set

	NAME	DATE	TITLE :			SHEET	A4
DRAWN.	Mr.Pisanu Kaewkunnigam	15/07/2019	ROTARY AIRLOCK				
CHK'D	Mr.Pisanu Kaewkunnigam	15/07/2019	MATERIAL :				
APPVD	Asst.Prof.Sommas Kaewluan	15/07/2019	NO.				
			SCALE :	1 : 10	UNIT :	mm	











ภาคผนวก ซ

ขั้นตอนการผลิตและเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์



ภาพประกอบ จ.1 ชั่งน้ำหนักชีวมวลอัดเม็ด



ภาพประกอบ จ.2 เติมชีวมวลอัดเม็ด 2 kg เพื่อเตรียม Start up



ภาพประกอบ จ.3 Start up Burner ด้วยแก๊ส LPG



ภาพประกอบ จ.4 เริ่มผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์



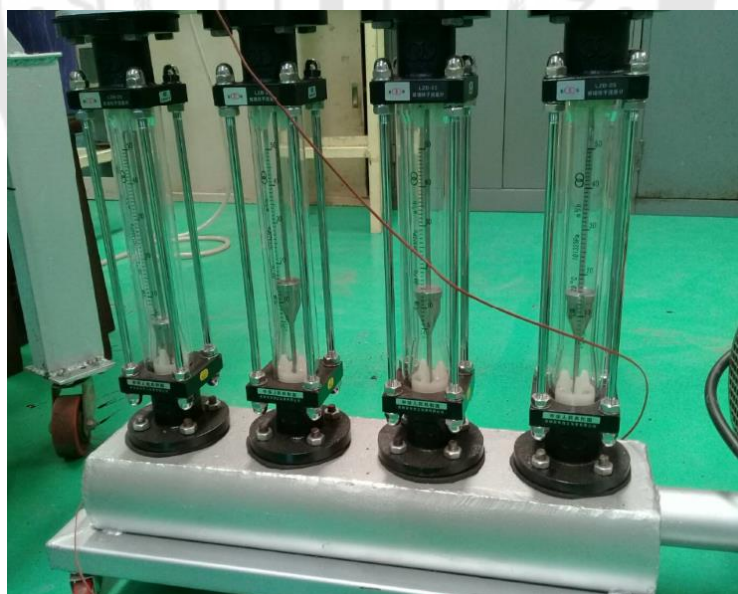
ภาพประกอบ จ.5 แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์สามารถติดไฟได้



ภาพประกอบ จ.6 ผลิตภัณฑ์แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ต่อเนื่อง



ภาพประกอบ จ.7 ประกอบเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เข้ากับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพประกอบ จ.8 ปรับวาล์วเมื่อผลิตแก๊สและเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์



ภาพประกอบ จ.9 เก็บข้อมูลแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์และแก๊สไอเสีย



ภาพประกอบ จ.10 ตรวจสอบสมรรถนะและมลพิษของหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

ร่วมกับระบบแก๊สร้อนสะอาด



ภาพประกอบ จ.11 เครื่องวัดแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์



ภาพประกอบ จ.12 เครื่องวัดแก๊สไฮโดรเจน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

พิษณุ แก้วคุณงาม

วัน เดือน ปี เกิด

8 กุมภาพันธ์ 2517

สถานที่เกิด

สระบุรี

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2549

วิศวกรรมศาสตรสาขาวิศวกรรมเครื่องกล

จาก มหาวิทยาลัยปทุมธานี

พ.ศ. 2563

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

