



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย

โดย นายนิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

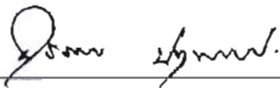
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

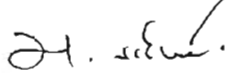
(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

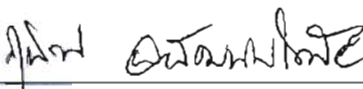
8 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร.มณฑิลา นรสิงห์)

 กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย)

ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย

นายนิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายนิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล
ชื่อวิทยานิพนธ์ : ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

การผลิตพลังงานจากชีวมวลสามารถทำได้ 2 กระบวนการ คือกระบวนการทางชีวภาพ และกระบวนการทางอุณหภูมิ โดยสำหรับกระบวนการทางอุณหภูมิ กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้รับความสนใจในวงกว้าง เนื่องจากสามารถแก้ปัญหาการจัดของเสีย เช่น ขยะมูลฝอยได้ โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการเผาไหม้โดยตรง และสามารถนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มาผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะและประเมินศักยภาพ สำหรับการผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขนาด 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมงเพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ แต่เพื่อให้สามารถควบคุมสภาวะและเงื่อนไขการทดลองได้ จึงได้ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเป็นข้อมูลอ้างอิงและเปรียบเทียบเมื่อเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นขยะมูลฝอย การประเมินสมรรถนะอาศัยข้อมูลขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง สมดุลมวล และข้อมูลที่ได้ตรวจวัดระหว่างการทดลอง พบว่าโซ่นการเผาไหม้มีอุณหภูมิประมาณ 1000 องศาเซลเซียส ณ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานจะมีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ยดังนี้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 15.12 ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 1.62 ก๊าซมีเทนร้อยละ 1.73 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 19.98 ก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 10.34 และมีค่าความร้อนค่าสูง 4.15 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร จากการประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสามารถผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 6.15 กิโลวัตต์ หรือมีอัตราส่วนการผลิตพลังงานเท่ากับ 1.50 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 9.67 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 80 หน้า)

คำสำคัญ : ขยะมูลฝอยชุมชน, เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง, การประเมินสมรรถนะ, การผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Nimit Nipattummakul
Thesis Title : Municipal Solid Waste Gasification System
Major Field : Mechanical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Associate Professor Dr.Somrat Kerdsuwan
Assistant Professor Dr.Suthum Patumsawad
Academic Year : 2006

Abstract

Energy can be harnessed from biomass by two processes named as biological and thermochemical processes. Among all thermochemical processes, the gasification deserves extensive attention because it helps in solving disposal problems, reducing environmental pollution and producing combustible fuel gas for thermal and power generation applications. The objective of this research is to study performance of a downdraft gasifier and evaluating performance for power generation. A 15 kg/hr of biomass batch type gasification has been designed, fabricated and operated on wood chips for evaluating its performance. In order to control the experimental conditions in laboratory, wood chip was used as reference in the place of municipal solid waste. The performance of the gasifier is evaluated in terms of measures determined from the gas composition, material balance data and other measurements. The temperatures along the height of the gasifier have been measured. The temperatures investigated in the combustion zone were around 1000°C. From the analysis on results, the gas sampled at the exit consists of 15.12%CO₂, 1.62%O₂, 1.73% CH₄, 19.98% CO and 10.34% H₂. The calculated higher heating value was 4.15 MJ/Nm³. The estimated electric power generation of this lab-scale gasifier was about 6.15 kW, with a specific consumption about 1.50 kg/kWh at fuel consumption rate of 9.67 kg/hr.

(Total 80 pages)

Keywords : Municipal Solid Waste, Downdraft Gasifier, Performance Evaluation,
Waste-to-Energy

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ เนื่องจากความอนุเคราะห์ของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คือ รองศาสตราจารย์ ดร.สมรัฐ เกิดสุวรรณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ปทุมสวัสดิ์ ที่คอยให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นในการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.มนพิไล นรสิงห์ และ อาจารย์ ดร.สุนิรัตน์ พิพัฒน์มโนมัย สำหรับคำแนะนำและเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย คุณนิพัฒน์ สงสังข์ทอง และคุณสมโภชน์ เชิดพงษ์ สำหรับคำแนะนำในส่วนของคุณสมบัติ และการทดลองของงานวิจัย และขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้ทางด้านต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

ขอพระขอบคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นิमित นิพัทธ์ธรรมกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 วิธีการวิจัย	4
1.6 อุปกรณ์และเครื่องมือ	4
1.7 ประโยชน์ของการวิจัย	5
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟิกส์เบด(Fixed Bed Gasifiers)	6
2.3 กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	9
2.4 นิยามพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	12
2.5 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	14
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย	16
3.1 ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	16
3.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasifier)	17
3.3 ชุดจ่ายอากาศ	19
3.4 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์	20
3.5 ชุดเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง	23
3.6 เชื้อเพลิง	23
3.7 วิธีการทดลอง	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง	27
4.1 ผลการทดลอง	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 โชนปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	33
4.3 ปรากฏการณ์บริดจิง (Bridging Effect)	34
4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	37
4.5 อัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	38
4.6 การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการทดลอง	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก ก	
ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	50
ภาคผนวก ข	
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ห้อยค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง	57
ภาคผนวก ค	
สรุปการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	60
ภาคผนวก ง	
ตัวอย่างการคำนวณ	65
การคำนวณสมดุลมวล	66
การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	67
การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็ง	
การคำนวณ Hearth Load	68
ภาคผนวก จ	
เอกสารตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ	70
ประวัติผู้วิจัย	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซสามารถเผาไหม้ได้	12
3-1 ส่วนประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของไม้เมงกรีส	24
4-1 สภาพะการทดลอง	27
4-2 องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง	30
4-3 ค่าความร้อนค่าสูงขององค์ประกอบก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ในก๊าซเชื้อเพลิง	32
4-4 ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	40
4-5 สมรรถภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	43
4-6 สมรรถภาพของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล	43
4-7 ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงของระบบผลิตการเชื้อเพลิงแบบไหลลง	43
4-8 อัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ	44
ข-1 ตัวอย่างองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง	59
ข-2 องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงทั้ง 5 กรณี	59
ค-1 การออกแบบ Imbert Nozzle และ Heart Chamber Diameters	63
ง-1 การคำนวณปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	66
ง-2 การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	67
ง-3 การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งกรณีรวมก๊าซในโตรเจน	67
ง-4 การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งกรณีไม่รวมก๊าซในโตรเจน	67
ง-5 แสดงค่า Hearth Load ทั้ง 5 กรณี	68

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟิชเชอร์	8
2-2 แสดงแผนภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 5 kWc และลักษณะอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน	12
2-3 ลักษณะ โชนการเผาไหม้ของเครื่องผลิตการเชื้อเพลิงแบบอิมเบิร์ต (Imbert Gasifier)	15
3-1 ระบบการทำงานของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ขนาด 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	16
3-2 แสดงลักษณะของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ขนาด 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	17
3-3 เครื่องเป่าอากาศ(Blower)	19
3-4 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter)	20
3-5 ก) ระบบควบคุมการทำงาน และ ข) เครื่องอุ่นอากาศแบบขดลวดไฟฟ้า	20
3-6 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	21
3-7 ก) ตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น ข) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ	21
3-8 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)	22
3-9 มาโนมิเตอร์รูปตัวยูและตำแหน่งการวัด	22
3-10 ปิตอร์ทูปแบบ-S และมาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง	23
3-11 ท่อเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง	23
3-12 ไม้แมงกริสสำหรับการทดลอง	24
3-13 แผนผังขั้นตอนการทดลอง	26
4-1 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 250 ลิตร/นาที่	28
4-2 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 250 ลิตร/นาที่	28
4-3 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 350 ลิตร/นาที่	29
4-4 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 400 ลิตร/นาที่	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 450 ลิตร/นาที่	29
4-6 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	30
4-7 การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงสภาวะคงที่ เทียบกับความสูง และตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิ้ล	31
4-8 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้เปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	33
4-9 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนค่าสูงเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	33
4-10 แผนภูมิเทอร์โมกราฟิเมตริกของเชื้อเพลิงชีวมวล	34
4-11 ปราบัญการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 250 ลิตร/นาที่	35
4-12 ปราบัญการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 300 ลิตร/นาที่	35
4-13 ปราบัญการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 350 ลิตร/นาที่	36
4-14 ปราบัญการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 400 ลิตร/นาที่	36
4-15 ปราบัญการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 450 ลิตร/นาที่	36
4-16 ก) ปราบัญการณ์บริดจิงภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ข) ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงแข็งภายในเครื่องผลิตก๊าซ เชื้อเพลิงแบบไหลลง	37
4-17 การใช้กรวยเอียง 60 องศา บริเวณด้านบนของโซนการเผาไหม้	37
4-18 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของโซนภายในและค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิง	38
4-19 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเปรียบเทียบกับอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	39
4-20 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	39
4-21 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-22 ก) แผนภูมิแสดงอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูล ข) แผนภูมิแสดงอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็งเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูล	40
4-23 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็งเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ก) รวมปริมาณของก๊าซในโตรเจน ข) ไม่รวมปริมาณของก๊าซในโตรเจน	41
4-24 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่สภาวะปกติเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	42
4-25 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเปรียบเทียบกับ ค่าความร้อนค่าสูงและอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ	44
ก-1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	51
ก-2 ระบบการป้อนอากาศ	51
ก-3 ท่อเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง	52
ก-4 โรตาริเตอร์วัดอัตราการไหลของอากาศ	52
ก-5 ปิโตรทูปแบบ-S วัดอัตราการไหลก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ทางออก	53
ก-6 มาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง	53
ก-7 มาโนมิเตอร์รูปตัวยู	54
ก-8 ท่อเก็บก๊าซตัวอย่างและท่อวัดความดันภายในระบบ	54
ก-9 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)	55
ก-10 Gas Chromatography (GASUKURO KOGYO: Model 370)	56
ก-11 Gas Sample Bulb	56
ข-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงในคอลัมน์ที่ 1	58
ข-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงในคอลัมน์ที่ 2	58
ค-1 ห้องกลั่นสลาย	61
ค-2 ห้องเผาไหม้	61
ค-3 ห้องถ่ายเถ้า	62
ค-4 แผนภาพแสดงกระบวนการระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ง-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและ Hearth Load	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ขยะมูลฝอยเกิดจากกิจกรรมการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ช่วงเวลาสิบปีที่ผ่านมา ปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นจาก 11 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2535 เป็น 14 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2545 หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 จากการคาดการณ์ปริมาณขยะมูลฝอยในประเทศไทย พบว่า ขยะมูลฝอยจะ เพิ่มขึ้นจาก 39,956 ตันต่อวันในปี พ.ศ. 2547 เป็น 48,706 ตันต่อวัน ในปี พ.ศ. 2557 [1] ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีการกำจัดขยะมูลฝอยที่เหมาะสมกับลักษณะและองค์ประกอบของขยะมูลฝอยในประเทศไทยจึง จำเป็นต่อการแก้ปัญหาขยะมูลฝอยภายในประเทศ ปัจจุบันวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยในประเทศไทยร้อยละ 64 ใช้การกองทิ้งและเผากลางแจ้ง ร้อยละ 35 ใช้เทคโนโลยีการฝังกลบ และร้อยละ 1 ใช้เทคโนโลยีเตาเผา[2] ซึ่งเป็นที่ประจักษ์แล้วว่าวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยในปัจจุบัน ไม่ได้เป็นวิธีการที่ยั่งยืน แต่เป็นการนำปัญหาที่เกิดขึ้นไปเก็บสะสมไว้เพื่อรอกำจัดอีกครั้ง

เทคโนโลยีการย่อยสลายด้วยความร้อน เป็นเทคโนโลยีซึ่งสามารถลดน้ำหนักของขยะมูลฝอยได้ถึงร้อยละ 70-80 ทั้งยังสามารถกำจัดขยะมูลฝอยที่มีองค์ประกอบหลากหลาย ใช้พื้นที่น้อยกว่าการฝังกลบ และใช้เวลาในการกำจัดรวดเร็วกว่าเทคโนโลยีฝังกลบหรือเทคโนโลยีชีวภาพ นอกจากนี้ขยะมูลฝอยยังมีค่าความร้อนค่าสูงเท่ากับ 7,674 kcal/kg ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านหินลิกไนต์ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ดังนั้นการกำจัดขยะมูลฝอยโดยใช้เทคโนโลยีย่อยสลายด้วยความร้อน ยังให้ผลตอบแทนเป็นพลังงาน ซึ่งสามารถใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้พลังงานความร้อนสำหรับหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หรือผลิตน้ำเย็นด้วยระบบดูดกลืน (Absorption Chiller) แต่ทั้งนี้ความชื้นในขยะมูลฝอยที่สูงถึงร้อยละ 61.33 เป็นปัจจัยสำคัญที่ลดประสิทธิภาพของเทคโนโลยีย่อยสลายด้วยความร้อนเพื่อผลิตพลังงาน

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เป็นเทคโนโลยีการย่อยสลายด้วยความร้อนโดยการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการอุณหเคมี (Thermochemistry Process) สามารถลดน้ำหนักของเชื้อเพลิงแข็งได้ร้อยละ 70-80 ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงปัจจุบันมี 4 ระบบคือ ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (Updraft Gasification) ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft Gasification) ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง (Crossdraft Gasification) และระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดไคส์เบด (Fluidized Bed Gasification) ในส่วนของระบบที่นำมา

วิจัยคือ ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง เนื่องจากมีอัตราการเกิดก๊าซสูง และมีองค์ประกอบของน้ำมันทาร์ (Tar) ในก๊าซเชื้อเพลิงน้อยเมื่อเทียบกับระบบอื่น

หลักการของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง คือการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง โดยก๊าซเชื้อเพลิงจะมีทิศทางไหลลงสู่ด้านล่างของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ผ่านโซนการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง เป็นผลให้น้ำมันทาร์สลายตัวกลายเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ เช่น ก๊าซมีเทน กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงด้วยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงมีโซนปฏิกิริยาเกิดขึ้น 4 โซนปฏิกิริยาประกอบด้วย[3]

โซนการอบแห้ง คือกระบวนการระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิงโดยใช้พลังงานความร้อนที่เกิดจากโซนปฏิกิริยาที่อยู่ด้านล่าง

โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) คือกระบวนการกลั่นสลายสารระเหยในเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง โดยใช้กระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ความร้อนสำหรับกระบวนการนี้ได้จากโซนการเผาไหม้ที่ถัดไปด้านล่าง ก๊าซไพโรไลซิส (Pyrolysis gas) และถ่าน (Char) ที่ได้กระบวนการนี้จะใช้สำหรับผลิตพลังงานความร้อนในโซน การเผาไหม้

โซนการเผาไหม้ ก๊าซไพโรไลซิสและถ่าน ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันในโซนการเผาไหม้ เพื่อผลิตพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการอื่นภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง กระบวนการออกซิเดชันจะเกิดกับก๊าซไพโรไลซิสมากกว่าถ่าน เนื่องจากหลักการการเผาไหม้ ดังนั้นหลังจากการกระบวนการเผาไหม้ในโซนการเผาไหม้ ถ่านที่เหลือจากกระบวนการจะตกลงไปทำปฏิกิริยาต่อที่โซนปฏิกิริยาด้านล่าง

โซนรีดักชัน (Reduction Zone) คือโซนผลิตก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ด้วยกระบวนการดูดความร้อน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างถ่านและก๊าซที่ได้จากโซนการเผาไหม้ โดยก๊าซที่ออกจากกระบวนการนี้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ และ ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสามารถนำไปผลิตพลังงาน หรือพลังงานความร้อน เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไปได้

เนื่องจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ เป็นการใช้งานครั้งแรก จึงต้องการข้อมูลเพื่อใช้สำหรับอ้างอิง ก่อนเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นขยะมูลฝอย การทดลองได้ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงทดลองเพื่อใช้สำหรับเป็นข้อมูลอ้างอิงและเปรียบเทียบ เหตุผลสำหรับการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงอ้างอิง เนื่องจากไม้เป็นเชื้อเพลิงที่มีกรณีศึกษาอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ

1.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Z.A. Zainal[4] ได้ศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง โดยใช้เศษไม้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และเศษไม้ทั่วไปเป็นเชื้อเพลิงทดลอง โดยได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อองค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิง ค่าความร้อน และอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วย $1.69\%O_2$, $43.62\%N_2$, $14.05\%CO$, $14.66\%CO_2$, และ $2.02\%CH_4$ ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนแปลง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสมมูล และจากการประเมินประสิทธิภาพพบว่า เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.287 สำหรับกรณีใช้เศษไม้ทั่วไป และที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.438 สำหรับกรณีใช้เศษไม้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ ผสมรวมกับถ่านหิน

M. Dogru[5] ศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเปลือกถั่วฮาเซล (Hazel Nut Shell) ด้วยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 5 kW เพื่อหาจุดเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเปลือกถั่วฮาเซล โดยใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงระหว่าง 1.7-5.5 kg/hr จากการทดลองพบว่า ที่จุดเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงระหว่าง $1.44-1.47 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ และอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงระหว่าง 4.06-4.48 kg/hr ส่วนเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะมีค่าความร้อนประมาณ 5 MJ/Nm^3 และมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรระหว่าง $8-9 \text{ Nm}^3/\text{hr}$

T.H.Jayah[6] ศึกษาการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 20 kg/hr โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองใช้ไม้ยางเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง เพื่อปรับเทียบแบบจำลองที่ใช้สำหรับคำนวณในคอมพิวเตอร์ การวิจัยได้ใช้แบบจำลองสองส่วนคือ ส่วนของโซนไพโรไลซิสและโซนการเผาไหม้ จากการจำลองระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงต้องใช้ไม้ขนาด 3-5 cm. ความชื้นของเชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 15 % และที่สำคัญโซนการเผาไหม้ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 cm.

A. Midilli[7] ได้ทำการทดลองของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากตะกอนน้ำเสีย โดยใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง เพื่อศึกษาถึงปริมาณของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Gas) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากการทดลองพบว่าองค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ประกอบไปด้วย H_2 , CO , CH_4 , C_2H_2 และ C_2H_6 โดยคิดเป็น 19 – 23 % ของปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ทั้งหมด และมีค่าความร้อนระหว่าง $2.55-3.2 \text{ MJ/Nm}^3$ องค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ มีผลมาจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและอากาศที่ป้อนเข้า, ปริมาณของน้ำและความชื้น, อุณหภูมิของในโซนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ของก๊าซที่ได้จากการกลั่นระเหยของเชื้อเพลิง (Pyrolysis Product)

M. Dogru[8] ได้ศึกษาถึงกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากตะกอนน้ำเสีย โดยใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบคอดูด พบว่าควรรักษาอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเท่ากับ $3.69 - 3.78 \text{ kg/hr} \pm 1.43\%$, และอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air Fuel Ratio) เท่ากับ $2.28-2.34 \text{ N.m}^3/\text{kg} \pm 1.84\%$ ซึ่งจะได้อัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Gasification Rate) เท่ากับ $497.74-514 \text{ Nm}^3/\text{m}^2\text{hr} \pm 1.5\%$ และอัตราส่วนของก๊าซที่ผลิตได้ต่อเชื้อเพลิงแข็ง (Turndown Ratio) เท่ากับ $3.64-94.15\% \pm 1.92\%$ จากการวิจัยสรุปได้ว่าหากทำงาน ณ สภาวะเงื่อนไขดังกล่าวจะได้คุณภาพของแก๊สที่ดีคือมีน้ำมันดิน (Tar) น้อยและเกิดการหลอมจับก้อนของเชื้อเพลิง (Clinker) น้อย

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาและสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ที่อัตราการป้อน 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการ
- 1.3.2 วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง
- 1.3.3 วิเคราะห์ค่าความร้อนและองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงเพื่อใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง รวมถึงองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

1.5 วิธีการวิจัย

ออกแบบและสร้างเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่อัตราการป้อน 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากนั้นทำการทดสอบหาอัตราการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สุดท้ายจะนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบและค่าความร้อน

1.6 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1.6.1 ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง
- 1.6.2 อุปกรณ์สำหรับบันทึกค่าพารามิเตอร์ โดยจะประกอบไปด้วย เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouples) เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) คอมพิวเตอร์ และเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ (Gas Analyzer)
- 1.6.3 อุปกรณ์สำหรับเก็บก๊าซ เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อในเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ

1.7 ประโยชน์ของการวิจัย

1.7.1 สามารถใช้เป็นเครื่องต้นแบบ ของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงสำหรับเชื้อเพลิงในรูปแบบอื่น เช่น ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.7.2 ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบผลิตพลังงานได้ เช่น เครื่องยนต์สันดาปภายใน สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนได้

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification Process) คือ การเปลี่ยนสถานะของเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซที่ยังคงสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง ด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยกระบวนการย่อย 4 กระบวนการคือ กระบวนการอบแห้ง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชัน ซึ่งทั้ง 4 กระบวนการต้องเกิดอย่างต่อเนื่องและสมดุล หากกระบวนการใดเกิดสะดุด จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการอื่นและคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ดังนั้นหากต้องการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจึงจำเป็นต้องศึกษากระบวนการทั้ง 4 กระบวนการโดยละเอียดก่อนเพื่อออกแบบระบบให้เหมาะสมต่อเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากก๊าซเชื้อเพลิง สามารถกระทำได้ทั้งในรูปแบบของพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้โดยตรง หรือในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

2.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟิक्ซ์เบด (Fixed Bed Gasifiers)

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟิक्ซ์เบดจำแนกได้จากลักษณะการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยจำแนกได้ 3 ประเภทคือ เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น (Updraft Gasifier) เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) และเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง (Crossdraft Gasifier)

2.2.1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น

ทิศทางการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น มีทิศทางการไหลขึ้นไปสู่ด้านบนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งสวนทางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงแข็ง ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ก) จากลักษณะการไหลของก๊าซเชื้อเพลิง ที่จ่ายอากาศเข้าสู่โซนการเผาไหม้ (Combustion Zone) เพื่อผลิตความร้อนและก๊าซ และออกจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงบริเวณด้านบน ผ่านโซนรีดักชัน โซนไพโรไลซิส และโซนอบแห้ง ระหว่างที่ก๊าซเชื้อเพลิงไหลผ่านโซนทั้ง 3 โซน ความร้อนจากก๊าซจะถ่ายเทไปยังเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อนำไปใช้สำหรับกระบวนการที่เกิดขึ้นในโซนนั้นๆ สุดท้ายก๊าซที่ออกจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จะเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้จากรูปแบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น จึงสามารถ

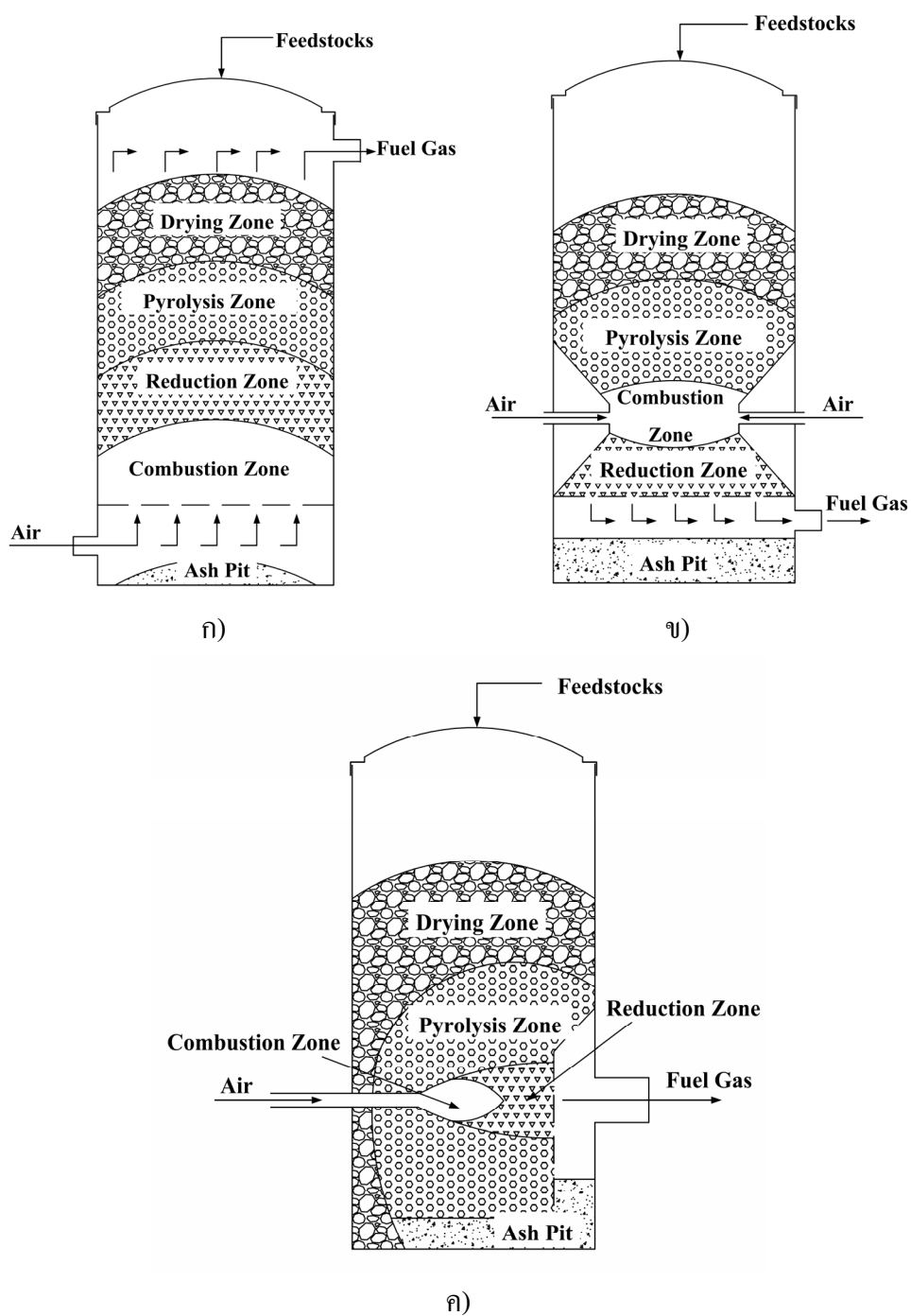
นำไปใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบ เนื่องจากก๊าซเชื้อเพลิงผ่านโซนอุณหภูมิต่ำ ทาร์ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากโซนไพโรไลซิสจึงปะปนออกไปกับก๊าซเชื้อเพลิงและกลิ่นตัวที่อุณหภูมิต่ำ เป็นผลให้ก๊าซเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของทาร์สูง ดังนั้นหากต้องการนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน จึงต้องการระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูง ก่อนนำเข้าสู่เครื่องยนต์ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในของเครื่องยนต์

2.2.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

ปัญหาเกี่ยวกับทาร์ที่เกิดขึ้นกับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น สามารถแก้ไขได้ด้วยการให้ก๊าซเชื้อเพลิงผ่านส่วนที่มีอุณหภูมิสูงก่อนออกจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เพื่อให้ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูงที่เกิดจากโซนไพโรไลซิส ซึ่งเป็นต้นเหตุของการเกิดทาร์สลายตัวเป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลเบาเช่น มีเทน จากลักษณะการทำงานของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง (ภาพที่ 2-1 ข) ทิศทางการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงจะมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของเชื้อเพลิงแข็ง ก๊าซเชื้อเพลิงจะผ่านโซนการเผาไหม้ และโซนรีดักชัน ที่มีอุณหภูมิสูงก่อนออกจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจึงสามารถลดปริมาณทาร์ในก๊าซเชื้อเพลิงได้ แต่ทั้งนี้ หากต้องการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ไปใช้งานกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ยังคงต้องมีระบบทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่น ความชื้น และทาร์บางส่วนที่หลุดออกมาก่อนนำเข้าสู่เครื่องยนต์ เนื่องจากกระบวนการผลิตก๊าซที่ซับซ้อนกว่าเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น จึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาด และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้กับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้

2.2.3 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง

ภาพที่ 2-1 ค) แสดงของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้จะมียังมีองค์ประกอบของทาร์น้อย เนื่องจากก๊าซเชื้อเพลิงผ่านโซนที่มีอุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง แต่จะมีโซนการเผาไหม้และโซนรีดักชันที่แคบกว่า จึงส่งผลให้ช่วงการเริ่มต้นทำงานของเครื่องผลิตก๊าซใช้เวลาสั้น จากลักษณะของโซนรีดักชันที่แคบ ส่งผลให้ก๊าซที่ผ่านโซนรีดักชันมีความเร็วสูง ซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาในโซนนี้ คาร์บอนไดออกไซด์จะมีเวลาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนแข็งได้น้อย ทำให้เชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณภาพต่ำ และโซนการเผาไหม้ที่แคบจะส่งผลให้อุณหภูมิในโซนนี้สูง ประกอบกับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่มีตะกรับแยกเถ้าออกจากโซนเผาไหม้และโซนรีดักชัน จึงมีโอกาสสูงที่เถ้าจะเกิดการหลอมภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้จึงต้องการเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของเถ้าต่ำ เช่น ไม้ ถ่านหิน หรือถ่านโค้ก เป็นต้น



ภาพที่ 2-1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟิกส์เบด

ก) เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น

ข) เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น

ค) เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง

2.3 กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบฟิสิกส์เบด ทั้ง 3 ประเภทที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.2 มีกระบวนการผลิตก๊าซภายใน 4 กระบวนการเช่นเดียวกัน คือ กระบวนการอบแห้ง กระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชัน แต่กระบวนการที่เกิดในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงทั้ง 3 ประเภทจะเกิดในตำแหน่งที่แตกต่างกันดังภาพที่ 2-1 เป็นผลให้ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในแต่ละประเภทมีคุณภาพแตกต่างกัน การอธิบายกระบวนการผลิตการเชื้อเพลิงจะอ้างอิงกระบวนการและตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นหลัก กระบวนการในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง เริ่มต้นจากโซนอบแห้งบริเวณด้านบนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ถัดลงมาคือโซนไพโรไลซิส โซนการเผาไหม้ และด้านล่างบริเวณตะกั่วคือโซนรีดักชัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 โซนอบแห้ง คือกระบวนการระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิงแข็ง โดยใช้ความร้อนที่ผ่านมาจากโซนไพโรไลซิส ไอน้ำ และเชื้อเพลิงแห้งที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง จะลงไปสู่โซนไพโรไลซิส ซึ่งอยู่ในโซนถัดไปด้านล่าง สมการที่ 2-1 แสดงกระบวนการในโซนอบแห้ง

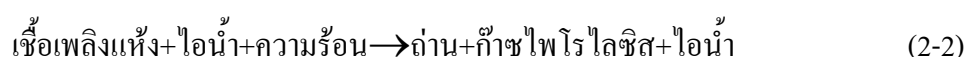


ช่วงอุณหภูมิในโซนอบแห้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถกำหนดได้จากการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis) สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C

ความร้อนที่ใช้ในโซนการอบแห้งขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงแข็ง หากเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะส่งผลต่อโซนปฏิกิริยาภายในและส่งผลต่อไปยังคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิง ถ้าเชื้อเพลิงไม่มีความชื้นมาตรฐานแห้งสูงกว่า 67% ก๊าซเชื้อเพลิงจะไม่สามารถติดไฟได้ และหากต้องการให้ก๊าซเชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ เชื้อเพลิงไม่จำเป็นต้องมีความชื้นมาตรฐานแห้งไม่เกิน 33% [3]

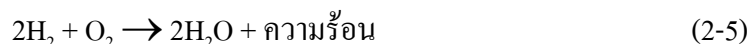
จากการศึกษาของ T.H. Jayah และคณะ[6] โดยใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ได้จำลองเชื้อเพลิงไม้ที่มีความชื้นจำนวน 3 ค่า คือ 0% 15% และ 30% พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Conversion Efficiency) จะลดลงหากความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นเพื่อใช้สำหรับระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลให้พลังงานที่ต้องใช้สำหรับปฏิกิริยาอื่นลดลง จากผลการทดลอง T.H. Jayah และคณะ ได้แนะนำว่าความชื้นมาตรฐานแห้งของเชื้อเพลิงไม่ควรเกิน 15% สำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง

2.3.2 โชนไฟโรไลซิส คือกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนแบบไม่ใช้ออกซิเจน สารระเหยที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็ง จะถูกกลั่นสลายออกมาจากเชื้อเพลิงแข็งด้วยความร้อนที่ได้จากโชนการเผาไหม้ที่อยู่บริเวณด้านล่างของโชนไฟโรไลซิส ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสคือ ถ่าน และก๊าซไฟโรไลซิส อาทิเช่น ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซอีเทน และก๊าซไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ดังสมการที่ 2-2



ก๊าซไฟโรไลซิสและถ่านจากกระบวนการไฟโรไลซิส จะใช้สำหรับกระบวนการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนในโชนการเผาไหม้ ช่วงอุณหภูมิในโชนไฟโรไลซิสจะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถกำหนดได้จากการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีอุณหภูมิระหว่าง 200-600 °C[3]

2.3.3 โชนการเผาไหม้ ก๊าซไฟโรไลซิสและถ่านที่ผ่านเข้ามาในโชนการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศที่จ่ายเข้าสู่โชนการเผาไหม้ เพื่อผลิตพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในโชนปฏิกิริยาอื่น เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะได้มาจากโชนการเผาไหม้เพียงแหล่งเดียว ดังนั้นการออกแบบโชนการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูงจึงเป็นส่วนสำคัญสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง กระบวนการออกซิเดชันจะมีโอกาสเกิดขึ้นกับก๊าซไฟโรไลซิสมากกว่าถ่านที่เป็นสถานะของแข็ง เมื่อผ่านโชนการเผาไหม้จึงยังคงเหลือถ่านเพื่อนำไปทำปฏิกิริยาในโชนถัดไป กระบวนการที่เกิดในโชนการเผาไหม้จะเกิดดังสมการที่ 2-3 และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะแสดงในสมการเคมีที่ 2-4 และ 2-5 ในโชนการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิประมาณ 1000°C

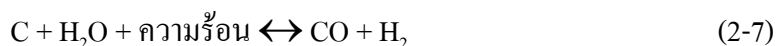


2.3.4 โชนรีดักชัน หลังจากผ่านโชนการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่โชนรีดักชันประกอบด้วย ถ่าน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ก๊าซไนโตรเจนที่เข้ามาพร้อมกับอากาศและจากเชื้อเพลิง ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฟโรไลซิสที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ในโชนการเผาไหม้ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากโชนการเผาไหม้จะทำปฏิกิริยาต่อไปในโชนรีดักชันเพื่อผลิตก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดในโชนนี้ประกอบด้วย

ปฏิกิริยาบูดัวร์ด (Boudouard Reaction)



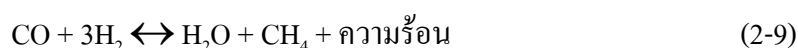
ปฏิกิริยาอวเทอร์ก๊าซ (Water Gas Reaction)



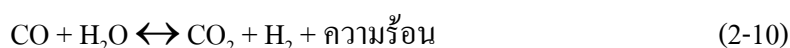
ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation Reaction)



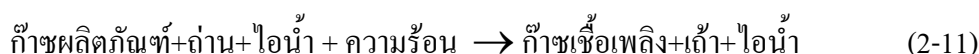
ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทน (Methanation)



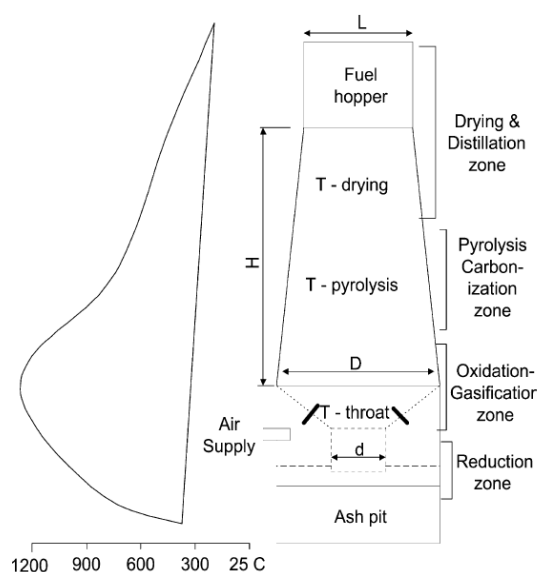
ปฏิกิริยาเปลี่ยนก๊าซ CO เป็นก๊าซ CO₂ ด้วยน้ำ (Water Shift Reaction)



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในโซนการรีดักชันจะเป็นปฏิกิริยาที่ผลิตก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเกิดขึ้นทั้ง ในสถานะของแข็งกับก๊าซและในสถานะก๊าซกับก๊าซ สุดท้ายก๊าซที่ออกจากโซนรีดักชันจะมีองค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ซึ่งมีความเข้มข้นเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง กระบวนการในโซนรีดักชันแสดงในสมการที่ 2-11 ส่วนโซนรีดักชันจะมีอุณหภูมิระหว่าง 600-900 °C



จากการศึกษา M. Dogru และคณะ [5] ศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเปลือกถั่วฮาเซล (Hazelnut Shell) ด้วยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 5 kWe ได้แบ่งโซนปฏิกิริยาดังภาพที่ 2-2 โดยโซนอบแห้งมีอุณหภูมิระหว่าง 70-200°C ที่ความสูง 0.1 m. โซนไพโรไลซิสมีอุณหภูมิระหว่าง 350-500°C ที่ความสูง 0.17 m. โซนการเผาไหม้มีอุณหภูมิระหว่าง 1000-1200°C ที่ความสูง 0.12 m. โซนรีดักชันมีอุณหภูมิระหว่าง 700-1000°C ที่บริเวณด้านล่างของโซนการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดในโซนอบแห้ง, โซนไพโรไลซิส และโซนการเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 125, 566 และ 1206°C ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงอุณหภูมิบริเวณคอคอดในโซนการเผาไหม้มีอุณหภูมิเท่ากับ 1050°C โดยมีองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงดังนี้ 2.47% CH₄, 19.89%CO, 11.86%H₂ และมีค่าความร้อนค่าสูงเท่ากับ 5.15 MJ/Nm³



ภาพที่ 2-2 แสดงแผนภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 5 kWe และลักษณะอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน [5]

2.4 นิยามพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

2.4.1 ค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนค่าสูง (Higher Heating Value) เป็นพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อเผาไหม้สมบูรณ์ โดยอุณหภูมิหลังเกิดปฏิกิริยาลดลงมาเท่ากับอุณหภูมิก่อนเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเสมอ ขณะที่การปลดปล่อยพลังงานความร้อนดังกล่าว ไอน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาจะกลั่นตัวและคายความร้อนแฝงออกมา ดังนั้นค่าความร้อนของปฏิกิริยาเมื่อรวมกับความร้อนแฝงนี้จึงเรียกว่า ค่าความร้อนค่าสูง สำหรับการหาค่าความร้อนค่าสูงในก๊าซเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง โคนินยามที่สภาวะปกติ (Normal Temperature and Pressure, NTP) ที่อุณหภูมิ 25°C และความดัน 1 atm. ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซสามารถเผาไหม้ได้[9]

ก๊าซ	ค่าความร้อนสูงสุด (kJ/kmole ที่ 25°C)
ไฮโดรเจน (H_2)	285,840
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	282,990
มีเทน (CH_4)	890,360
อีเทน (C_2H_6)	1,559,900

2.4.2 อัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็ง (Gas Yield)

อัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็ง คือปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ซึ่งนิยามที่สภาวะปกติต่อปริมาณของเชื้อเพลิงแห้งที่ใช้ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ตัวแปรนี้จะแสดงถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปของเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิงของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถนิยามได้สองรูปแบบ รูปแบบที่ 1 รวมองค์ของก๊าซเชื้อเพลิงทั้งหมด เมื่อต้องการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ และรูปแบบที่ 2 ไม่รวมองค์ประกอบของก๊าซไนโตรเจน (Free Nitrogen) เมื่อต้องการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพ

2.4.3 ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

A. Midilli และคณะ[7] ได้ทำการทดลองของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากตะกอนน้ำเสีย โดยใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ได้นิยามประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง 2 สภาวะคือ ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะก๊าซร้อน และประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะปกติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะก๊าซร้อน ขึ้นอยู่กับพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง (พลังงานความร้อนสัมผัส+ค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิง) และพลังงานเคมีของตะกอนน้ำเสียแห้ง โดยพลังงานเคมีนิยามจากค่าความร้อนค่าสูงของตะกอนน้ำเสียและอัตราการป้อนของตะกอนน้ำเสียแห้ง ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของตะกอนน้ำเสีย ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะก๊าซร้อนแสดงในสมการที่ 2-12

$$\text{Hot Gas Efficiency} = \frac{\text{Hot Product Gas Energy}}{\text{Chemical Energy of Dry Sewage Sludge}} \times 100 \quad (2-12)$$

ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะปกติ นิยามจากพลังงานความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะปกติ (ค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิง) และพลังงานเคมีของตะกอนน้ำเสียแห้ง ซึ่งแสดงในสมการที่ 2-13

$$\text{Cold Gas Efficiency} = \frac{\text{Cold Product Gas Energy}}{\text{Chemical Energy of Dry Sewage Sludge}} \times 100 \quad (2-13)$$

2.4.3 อัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ (Specific Consumption)

อัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ นิยามจากอัตราส่วนระหว่างอัตราเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งต่อพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ (kg/kW hr) ซึ่งเป็นตัวแปรที่แสดงถึงประสิทธิภาพของการผลิต

พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง หากอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะต่ำ แสดงว่าระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพเปลี่ยนพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงแข็งเป็นพลังงานไฟฟ้าสูง

Z.A. Zainal และคณะ[4] ได้ศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง โดยใช้เศษไม้จากอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์และเศษไม้ทั่วไปเป็นเชื้อเพลิงทดลอง ซึ่งได้นำก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตไปผลิตพลังงานไฟฟ้า ด้วยเครื่องยัดสับภายในแบบใช้ก๊าซชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล จากการทดลองพบว่าระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเฉลี่ยเท่ากับ 11.15% โดยมีค่าสูงสุด 15.46% ที่อัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.38 และมีอัตราส่วนการผลิตพลังงานจำเพาะต่ำที่สุดเท่ากับ 1.49 kg/kW hr ดังนั้นหากต้องการผลิตพลังงานไฟฟ้า 1 kW จะต้องใช้ชีวมวล 1.49 kg/hr

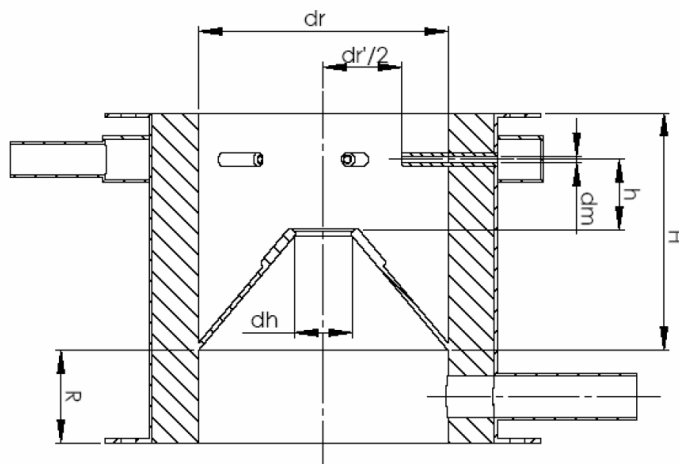
2.5 การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องยัดสับภายใน จำเป็นต้องใช้ก๊าซเชื้อเพลิงที่สะอาดปราศจากองค์ประกอบของทาร์ในก๊าซเชื้อเพลิง เพื่อลดการสึกหรอและยืดอายุการใช้งานของเครื่องยัด ซึ่งเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง สามารถลดปัญหาของการเกิดทาร์ เนื่องจากทาร์ที่ส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสจะไหลผ่านโซนการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูง ทาร์จะสลายตัวและจัดเรียงโมเลกุลใหม่ ก่อนเข้าสู่โซนรีดักชัน ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบเพื่อลดปริมาณทาร์ให้ได้มากที่สุด

การออกแบบโซนการเผาไหม้ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้คือ รูปแบบการฉีดอากาศเข้าสู่โซนการเผาไหม้ และพื้นที่หน้าตัดของโซนการเผาไหม้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัดของโซนการเผาไหม้เพื่อป้องกันการหลุดรอดของทาร์ การออกแบบโดยใช้คอคอด (Throat) เพื่อลดพื้นที่หน้าตัดของโซนการเผาไหม้ วิธีการที่นิยมใช้สำหรับการแก้ปัญหาการหลุดรอดของทาร์ออกจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เนื่องจากคอคอดมีพื้นที่แคบ ดังนั้นเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบใช้คอคอดจึงมีข้อจำกัดเกี่ยวกับขนาดเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ ซึ่งต้องมีขนาดไม่เกิน 3 ถึง 5 x 6 ถึง 8 cm. [10] ดังนั้นเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตพลังงานน้อยกว่า 1 MW [11]

ในส่วนการออกแบบคอคอดจำเป็นต้องเข้าความสัมพันธ์ของ Hearth Load ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะปกติ 25°C 1 atm ต่อพื้นที่หน้าตัดของคอคอดในโซนการเผาไหม้ ($\text{Nm}^3/\text{cm}^2/\text{hr}$) กรณีใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบอิมเบิร์ต (Imbert Type) จะมีค่า Hearth Load สูงสุดเท่ากับ $0.9 \text{ Nm}^3/\text{cm}^2/\text{hr}$ [10] ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบอิมเบิร์ต ในการทดลอง ซึ่งออกแบบให้มีขนาด 14 kg/hr และการออกแบบจะอ้างอิง

ตารางสำหรับการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบอิมเบิร์ต ตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ง ภาพที่ 2-3 แสดง ลักษณะ โชนการเผาไหม้ของเครื่องผลิตการเชื้อเพลิงแบบอิมเบิร์ต



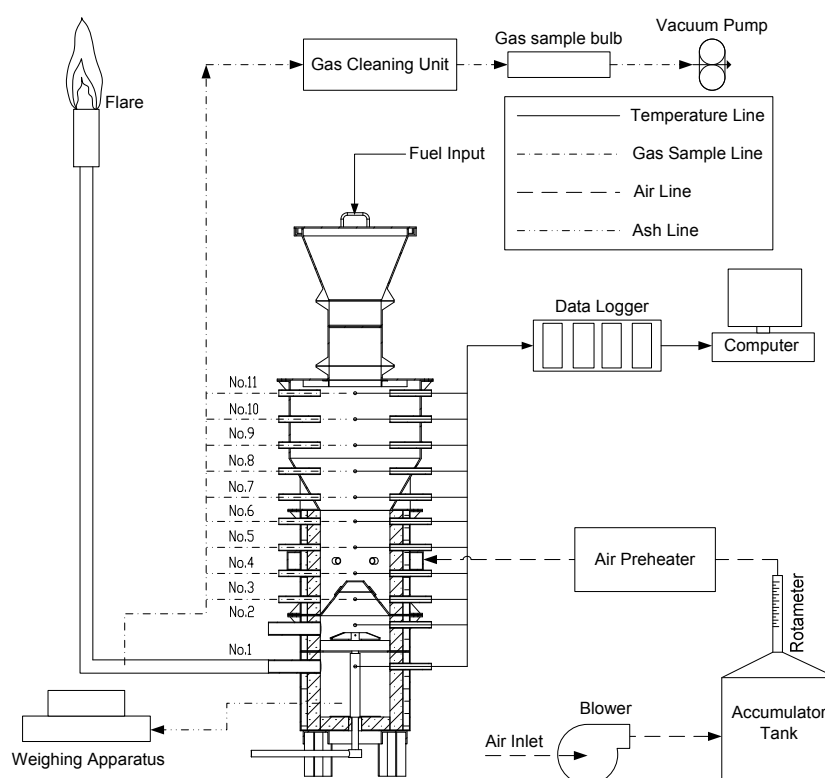
ภาพที่ 2-3 ลักษณะ โชนการเผาไหม้ของเครื่องผลิตการเชื้อเพลิงแบบอิมเบิร์ต (Imbert Gasifier)

ในส่วนของการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 25 kg/batch เพื่อใช้ใน ห้องปฏิบัติการจะแสดงในภาคผนวก ง

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

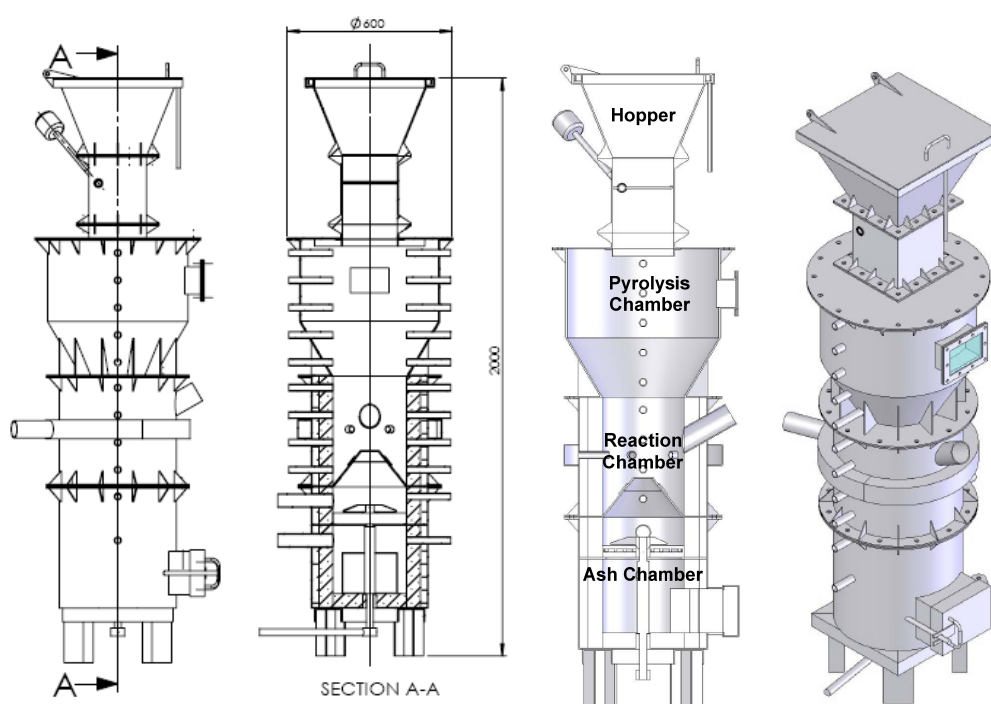


ภาพที่ 3-1 ระบบการทำงานของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ขนาด 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีความสามารถในการป้อนเชื้อเพลิงประมาณ 25 กิโลกรัมต่อครั้ง โดยมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนคือ เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ชุดจ่ายอากาศ อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ และชุดเก็บก๊าซเชื้อเพลิง การทำงานของระบบ เริ่มต้นจากการป้อนเชื้อเพลิงที่ด้านบนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยป้อนเชื้อเพลิงแบบครั้งเดียว (Batch Type) เมื่อป้อนเชื้อเพลิงเพียงพอต่อการทดสอบ จะปิดประตูป้อนและจุดไฟที่ช่องจุดไฟ รอจนเชื้อเพลิงบางส่วนเริ่มติดไฟ จึงปิดฝาครอบช่องจุดไฟและจ่ายอากาศเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง หลังจากนั้นจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิในตำแหน่งที่มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ในส่วนของการเก็บ

ก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อนำไปทดสอบ จะเริ่มเก็บเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงอยู่ในสภาวะคงที่ ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะถูกเผาทั้งที่ทางออกของปล่องระบาย กระบวนการทดลองจะสิ้นสุดลงเมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด โดยสังเกตได้จากช่องสังเกตการณ์ จากนั้นรอให้อุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงลดลง จึงสามารถนำถ่านที่เหลือจากการทดลองมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนักของถ่าน ภาพที่ 3-1 แสดงการทำงานของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ในส่วนของรายละเอียดของอุปกรณ์และวิธีการทดลองจะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasifier)



ภาพที่ 3-2 แสดงลักษณะของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ขนาด 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในการงานวิจัยมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงประมาณ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง การป้อนเชื้อเพลิงเป็นแบบป้อนครั้งเดียว (Batch Type) โดยป้อนเชื้อเพลิงเข้าที่ด้านบนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 mm. และสูง 2000 mm. และมีส่วนประกอบสำคัญ 4 ส่วนคือ ช่องป้อนเชื้อเพลิง (Hopper) ห้องไพโรไลซิส (Pyrolysis Chamber) ห้องปฏิกิริยา (Reaction Chamber) และห้องถ่ายถ่าน (Ash Chamber) ภาพที่ 3-2 แสดงลักษณะของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

3.2.1 ช่องป้อนเชื้อเพลิง (Hopper)

ช่องป้อนเชื้อเพลิง ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของเชื้อเพลิงให้ไหลลงไปยังห้องไพโรไลซิส และห้องปฏิกิริยา ช่องป้อนเชื้อเพลิงทำจากเหล็กแผ่นหนา 4.5 mm. กว้าง 450 mm. และสูง 590 mm. บริเวณขอบด้านบนของช่องป้อนจะมีช่องสำหรับใส่น้ำ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลของก๊าซที่อยู่ภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

3.2.2 ห้องไพโรไลซิส (Pyrolysis Chamber)

กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในห้องไพโรไลซิสประกอบด้วย กระบวนการอบแห้งและกระบวนการกลั่นสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอุณหภูมิภายในห้องจะมีอุณหภูมิระหว่าง 80-500 °C ห้องไพโรไลซิส ทำจากเหล็กแผ่นหนา 4.5 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเท่ากับ 500 mm. และสูง 500 mm. มีตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 5 ตำแหน่ง และตำแหน่งสำหรับเก็บก๊าซตัวอย่าง 5 ตำแหน่ง มีระยะห่างระหว่างตำแหน่งห่างกัน 100 mm.

3.2.3 ห้องปฏิกิริยา (Reaction Chamber)

ภายในห้องปฏิกิริยาจะเกิดกระบวนการกลั่นสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ต่อเนื่องมาจากห้องไพโรไลซิส และเกิดการเผาไหม้ในโซนถัดลงมา ภายในห้องจะมีอุณหภูมิระหว่าง 500-1200 °C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเท่ากับ 268 mm. และสูง 400 mm. เนื่องจากห้องนี้ต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงต้องมีฉนวน เพื่อป้องกันความร้อนถ่ายเทออกไปสู่ภายนอก โดยฉนวนประกอบไปด้วย คอนกรีตทนไฟหนา 50 mm. ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์หนา 25 mm. และมีเหล็กแผ่นหนา 3 mm. ทำหน้าที่เป็นโครงสร้าง ส่วนประกอบอื่นที่สำคัญ ได้แก่ คอคอด (Throat) ช่องจุดไฟ (Light Port) กล่องอากาศ (Air Box) หัวจ่ายอากาศ (Tuyeres) จำนวน 5 หัว ตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 4 ตำแหน่ง และตำแหน่งสำหรับเก็บก๊าซตัวอย่าง 4 ตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและตำแหน่งสำหรับเก็บก๊าซตัวอย่าง มีระยะห่างระหว่างตำแหน่งห่างกัน 100 mm.

3.2.4 ห้องถ่ายเถ้า (Ash Chamber)

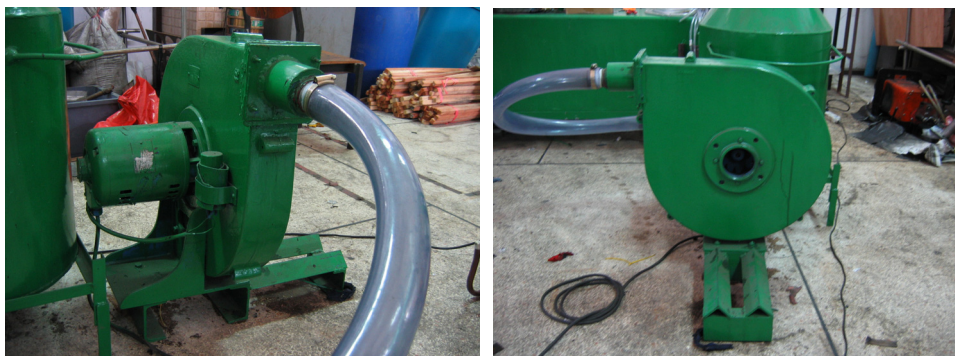
คาร์บอนแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้ในห้องปฏิกิริยา จะตกลงมาสู่ตะแกรงเพื่อทำปฏิกิริยารีดักชันต่อ และบางส่วนที่ทำปฏิกิริยาเสร็จแล้วจะถูกกวาดลงไปสู่ห้องถ่ายเถ้าโดยใช้ตะแกรงแบบเคลื่อนที่ ภายในห้องถ่ายเถ้าจะมีอุณหภูมิระหว่าง 300-1000 °C เนื่องจากห้องนี้ต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงจึงต้องมีฉนวน เพื่อป้องกันความร้อนถ่ายเทออกไปสู่ภายนอก โดยฉนวนประกอบไปด้วย คอนกรีตทนไฟหนา 50 mm. ฉนวนเซรามิกไฟเบอร์หนา 25 mm. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเท่ากับ 268 mm. และสูง 440 mm. ส่วนประกอบห้องถ่ายเถ้าประกอบไปด้วย ตะแกรงส่วนที่เคลื่อนที่และส่วนที่อยู่กับที่ ท่อทางออกของก๊าซเชื้อเพลิง จำนวน 2 ตำแหน่ง ประตูลถ่ายเถ้า และตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 2 ตำแหน่ง

3.3 ชุดจ่ายอากาศ

การจ่ายอากาศเข้าสู่ส่วนของการเผาไหม้จะเริ่มต้นจากการใช้เครื่องเป่าอากาศ (Blower) เป่าอากาศ ผ่านถังเก็บกักเพื่อรักษาแรงดันอากาศให้คงที่ ผ่านชุดควบคุมอัตราการไหลของอากาศซึ่งใช้เกววาล์ว (Gate Valve) และโรตاميเตอร์ (Rotameter) ควบคุม จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่เครื่องอุ่นอากาศเพื่ออุ่นอากาศในกรณีที่ต้องการ เมื่อออกจะส่วนนี้อากาศจะไหลเข้าสู่กล่องอากาศ (Air Box) ก่อนที่จะไหลเข้าสู่หัวจ่ายอากาศ (Tuyeres) และเข้าสู่ส่วนของการเผาไหม้ โดยรายละเอียดของอุปกรณ์มีดังนี้

3.3.1 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

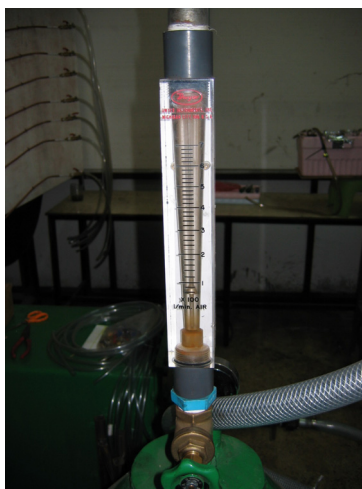
เครื่องเป่าอากาศที่ใช้สำหรับเป่าอากาศเข้าสู่ส่วนของการเผาไหม้ ใช้เครื่องเป่าอากาศของ B.O.B รุ่น 688 HB ขนาด 0.75 HP 220-240 V. 4 A. 50 Hz. ความเร็วรอบ 2800 rpm มีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 500 L/min.



ภาพที่ 3-3 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

3.3.2 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter)

การวัดอัตราการไหลของอากาศที่จ่ายเข้าไปในส่วนของการเผาไหม้ ใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบลูกกลอย ของ Dwyer วัดการไหลของอากาศได้ในช่วง 60-700 L / min.



ภาพที่ 3-4 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Meter)

3.3.3 เครื่องอุ่นอากาศ (Air Pre-heater)

เครื่องอุ่นอากาศด้วยไฟฟ้าขนาด 18 kW ใช้ขดลวดไฟฟ้าแบบ 3 เฟส 380 V 60 A ต่อกันแบบเคลด้า มีขดลวดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm. ทั้งหมด 3 ชุด อากาศไหลผ่านตามขดลวดไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน และ ใช้อุ่นอากาศที่ใช้ในห้องเผาไหม้ที่สอง และมีชุดควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ (PID Controller)



ก)



ข)

ภาพที่ 3-5 ก) ระบบควบคุมการทำงาน และ ข) เครื่องอุ่นอากาศแบบขดลวดไฟฟ้า

3.4 อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์

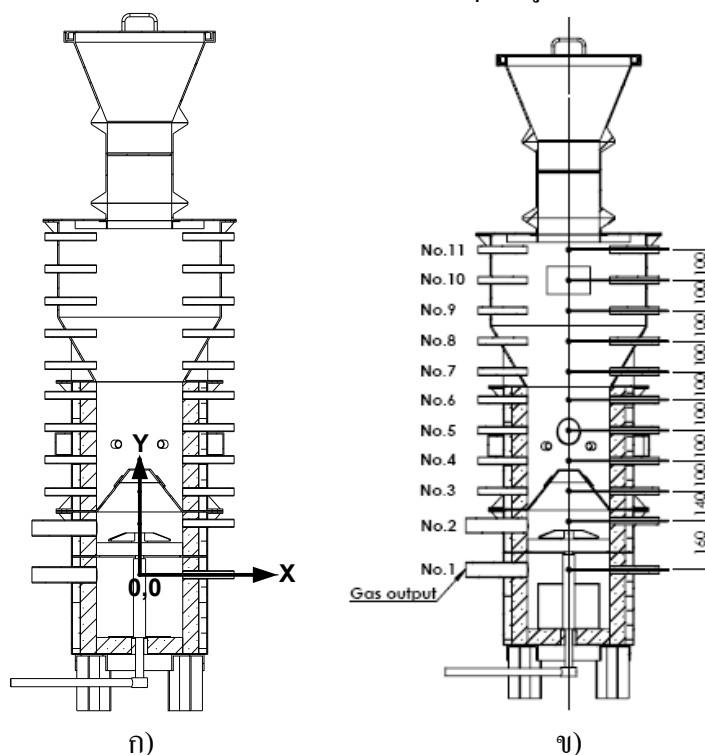
3.4.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เทอร์โมคัปเปิล แบบ Chromel-alumel ชนิด K มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm. มีตัวฉนวนเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้วัดอุณหภูมิตรงกลางเครื่องผลิต

ก๊าซเชื้อเพลิง จำนวน 11 ตำแหน่ง (ภาพที่ 3-7) ในส่วนของการบันทึกผลของอุณหภูมิจะใช้ร่วมกับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) โดยบันทึกผลแบบต่อเนื่อง



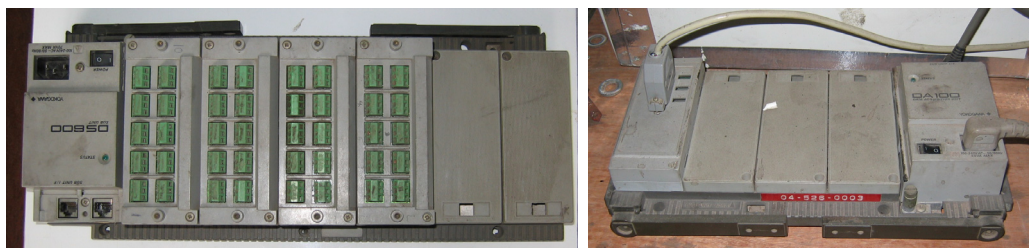
ภาพที่ 3-6 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 3-7 ก) ตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น และ ข) ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

3.4.2 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)

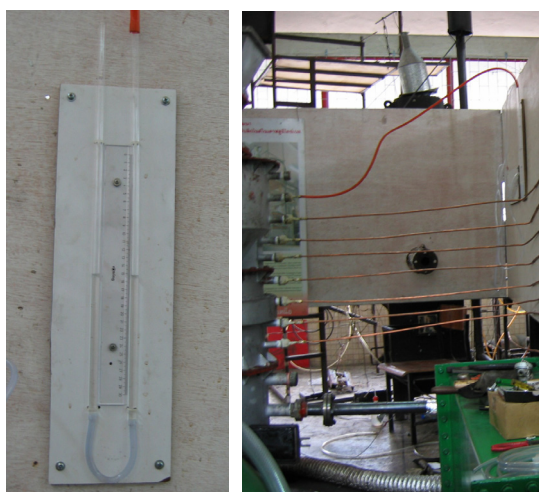
เครื่องเก็บข้อมูล ภาพที่ 3-8 เป็นแบบ Data Signals Logger ของ Yokogawa โมเดล DA100 & DS 600 มีความถี่สูงสุดในการบันทึกข้อมูล 0.5 Hz มีช่องสัญญาณเทอร์โมคัปเปิล 80 ช่องสัญญาณแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์ DARWIN การบันทึกค่าพารามิเตอร์เป็นการบันทึกตามเวลาจริงแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 3-8 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)

3.4.3 มาโนมิเตอร์รูปตัวยู (U-Tube Manometer)

มาโนมิเตอร์รูปตัวยูใช้สำหรับวัดความดันภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สเตกลมีความละเอียด 1 mm. สามารถวัดความดันแตกต่างได้สูงสุด 15 mm. ภายในบรรจุน้ำเป็นตัวกลางเพื่ออ่านค่าแรงดัน ความผิดพลาดในการวัดประมาณ $\pm 0.3\%$



ภาพที่ 3-9 มาโนมิเตอร์รูปตัวยูและตำแหน่งการวัด

3.4.4 เครื่องมือวัดอัตราการไหล ปิตอร์ทูปแบบ เอส (Pitot Tube Type S)

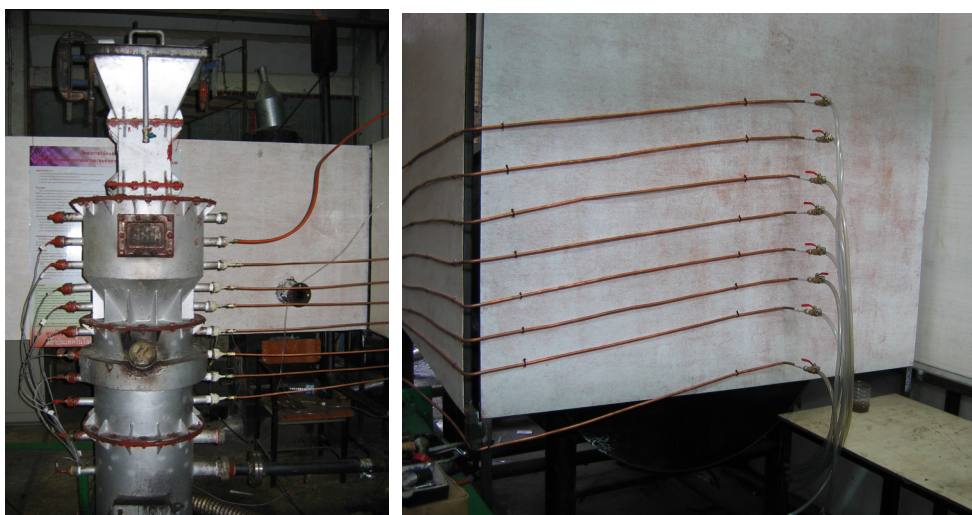
ปิตอร์ทูปชนิด-S ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้บริเวณท่อทางออกของก๊าซเชื้อเพลิง โดยใช้ร่วมกับมาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง (Inclined Manometer) เพื่ออ่านค่าความดันแตกต่าง



ภาพที่ 3-10 ปิตอร์ทูปแบบ-S และมาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง

3.5 ชุดเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง

ก๊าซเชื้อเพลิงบางส่วนจะถูกดูดออกมาจากท่อระบายก๊าซและตำแหน่งต่างๆภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยอาศัยปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) ปั๊มสุญญากาศจะดูดก๊าซเชื้อเพลิงผ่านชุดควบแน่นเพื่อดึงไอน้ำและน้ำมันทาร์ออกจากก๊าซเชื้อเพลิง จากนั้นจะผ่านชุดทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิง ก่อนที่จะไหลเข้าสู่หลอดเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง ก๊าซเชื้อเพลิงที่ถูกเก็บจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (Gas Chromatograph) ต่อไป ซึ่งระบบการทำงานของชุดเก็บก๊าซเชื้อเพลิงดูได้จากภาพที่ 3-11



ภาพที่ 3-11 ท่อเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง

3.6 เชื้อเพลิง

ไม้ที่ใช้ในการทดสอบเป็นไม้แมงกริส (Manggris Wood) โดยทั่วไปแล้วไม้ชนิดนี้ใช้ในอุตสาหกรรมฟอร์นิเจอร์ ไม้ที่นำมาใช้จะต้องนำมาตัดให้มีขนาด กว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว และหนา 1 นิ้ว โดยประมาณ เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายในของห้องปฏิกิริยาเท่ากับ 268 mm. ในส่วนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไม้เมงกรีตแสดงในตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-12 ไม้เมงกรีตสำหรับการทดลอง

ตารางที่ 3-1 ส่วนประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของไม้เมงกรีต

Properties	As-received basis	Dry ash-free basis
Proximate analysis (%wt)		
Moisture	20.30	-
Ash	0.48	-
Volatile matter	68.51	86.48
Fixed carbon	11.70	14.77
Ultimate analysis (%wt)		
Carbon , C	50.29	50.53
Hydrogen , H	1.56	1.57
Nitrogen , N	0.01	0.01
Sulphur , S	0.00	0.00
Oxygen , O	47.66	47.89
Net calorific value , kcal / kg	4,787.71	4,936.39
Bulk density , kg/m ³	546.63	

3.7 วิธีการทดลอง

การทดลองจะอ้างอิงค่าเริ่มต้นของปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากตารางที่ ค-1 ในภาคผนวก ง โดยทำการทดลองปรับปริมาณอากาศเริ่มต้นที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 350 L/min. และจะปรับให้อยู่ในช่วงระหว่าง 250-450 L/min. จำนวน 5 ครั้ง ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการบันทึกระหว่างการทดลองได้แก่ อุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งจะบันทึกผลแบบต่อเนื่อง ความดันภายในและอัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้โดยเฉลี่ยวัดเฉพาะช่วงเวลาที่อุณหภูมิภายในคงที่ หลังจากการทดลองเสร็จสิ้นในแต่ละครั้งจะต้องรอให้อุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงลดลงก่อน จึงจะสมารถนำถ่านที่เหลือจากการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงไปชั่งน้ำหนักได้ ส่วนองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงและก๊าซในตำแหน่งต่างๆ ของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะใช้วิธีการเก็บก๊าซตัวอย่างช่วงเวลาที่อุณหภูมิภายในคงที่ หลังจากนั้น นำไปหาองค์ประกอบภายหลังที่ทำการทดลองเสร็จสิ้นในแต่ละครั้ง ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

3.7.1 ชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงและป้อนเชื้อเพลิงที่ด้านบนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยป้อนครั้งเดียวต่อการเผาหนึ่งครั้ง (Batch Type)

3.7.2 เมื่อป้อนเชื้อเพลิงเพียงพอต่อการทดสอบ จึงปิดประตูป้อนและจุดไฟที่ช่องจุดไฟ รอกันเชื้อเพลิงบางส่วนเริ่มติดไฟ จึงปิดฝาครอบช่องจุดไฟ

3.7.3 ปรับปริมาณอากาศที่จ่ายเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

3.7.4 หลังจากนั้นจึงเริ่มบันทึกค่าของอุณหภูมิในตำแหน่งที่มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

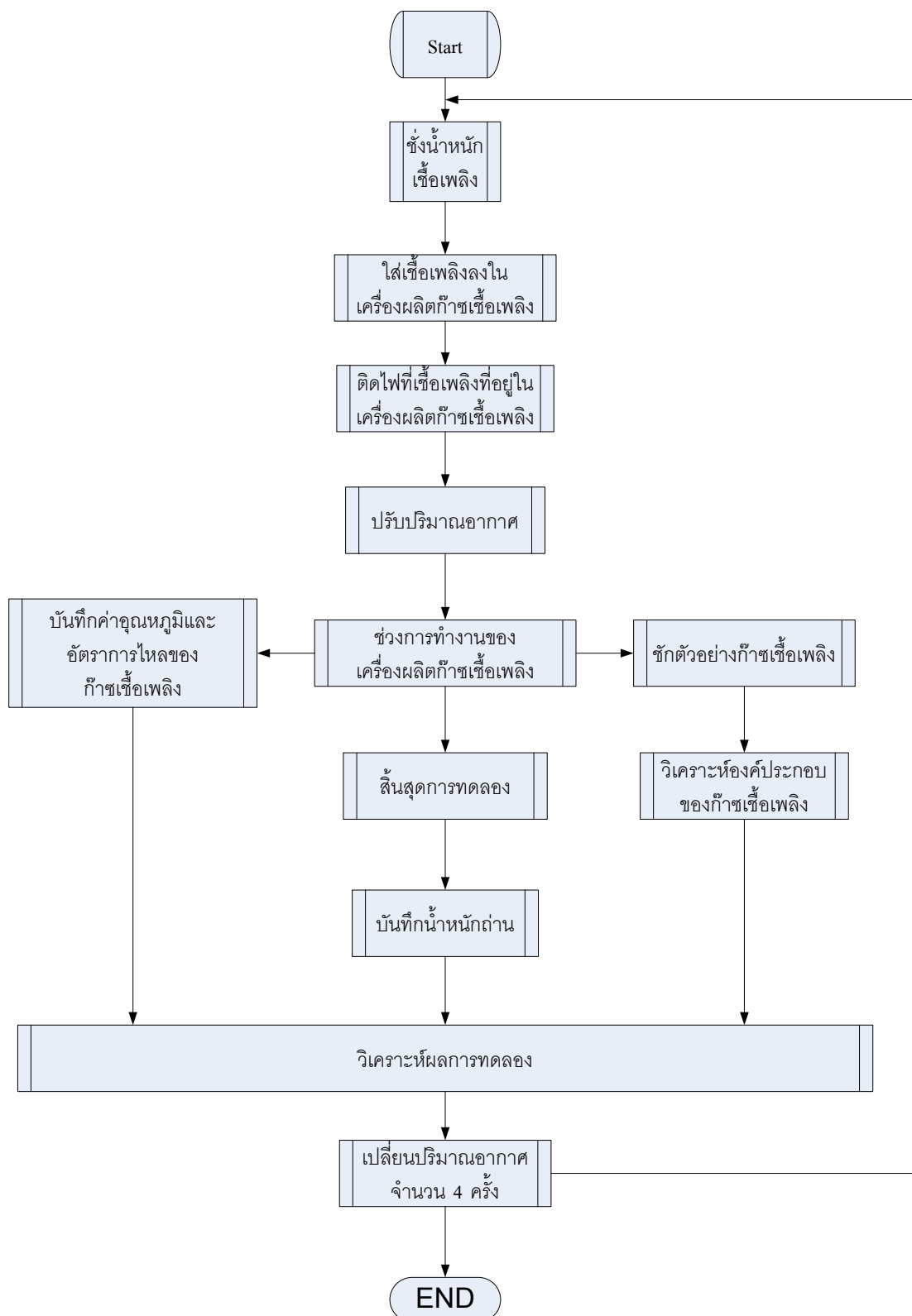
3.7.5 เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคงที่ จึงเริ่มบันทึกค่าความดันภายใน อัตราการไหลของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ และเก็บก๊าซเชื้อเพลิงบางส่วนเพื่อนำไปทดสอบ ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ส่วนใหญ่จะถูกเผาทิ้งที่ทางออกของปล่องระบาย

3.7.6 เมื่อเชื้อเพลิงถูกเผาไหม้จนหมด โดยสังเกตได้จากช่องสังเกตการณ์ จึงปิดอากาศที่ป้อนเข้าไป

3.7.7 รอให้อุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงลดลง นำถ่านที่เหลือจากการทดลองมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนักของถ่าน

3.7.8 นำก๊าซเชื้อเพลิงที่เก็บไว้ไปหาองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ (Gas Chromatography)

3.7.9 ทำการทดสอบครั้งต่อไป โดยปรับอากาศให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 250, 300, 350, 400, 450 L/min. ตามลำดับ



ภาพที่ 3-13 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้มีศักยภาพสูงสุด ต้องอาศัยปัจจัยทั้งเชื้อเพลิงแข็งที่นำมาใช้ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ปริมาณอากาศ และประเภทของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมาจะต้องมีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จึงทำให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากการทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมรรถนะของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สำหรับใช้อ้างอิงเมื่อทำการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นขยะมูลฝอยหรือเชื้อเพลิงประเภทอื่น การทดลองจึงได้ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงทดลอง ในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงซึ่งมีอัตราการป้อน 25 กิโลกรัมต่อครั้ง การทดลองอาศัยการเปลี่ยนแปลงปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรให้อยู่ในช่วง 250-450 ลิตรต่อนาที และนำฟารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมของปริมาณอากาศที่ใช้เพื่อให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพสูงสุด

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การเปลี่ยนสภาวะสำหรับการทดลอง

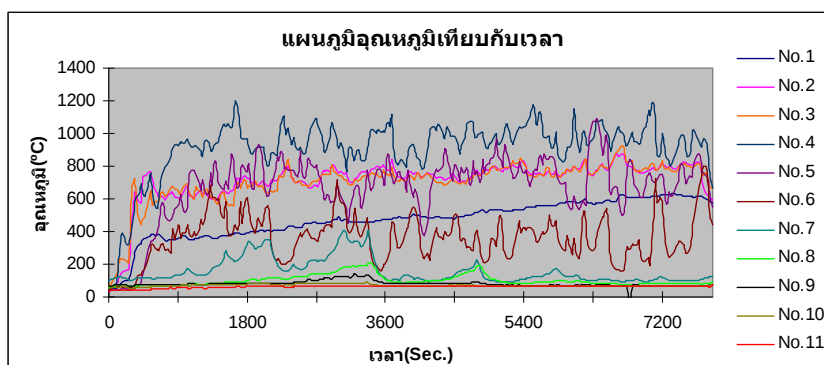
สำหรับการทดลองจะใช้ไม้ที่ผ่านการเตรียมการเบื้องต้นจำนวน 25 กิโลกรัมต่อครั้ง และอาศัยการปรับปริมาณอากาศที่จ่ายเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศทั้งหมด 5 กรณี คือ 250, 300, 350, 400 และ 450 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในตารางที่ 4-1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณอากาศ ที่มีผลต่อสภาวะภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

ตารางที่ 4-1 สภาวะการทดลอง

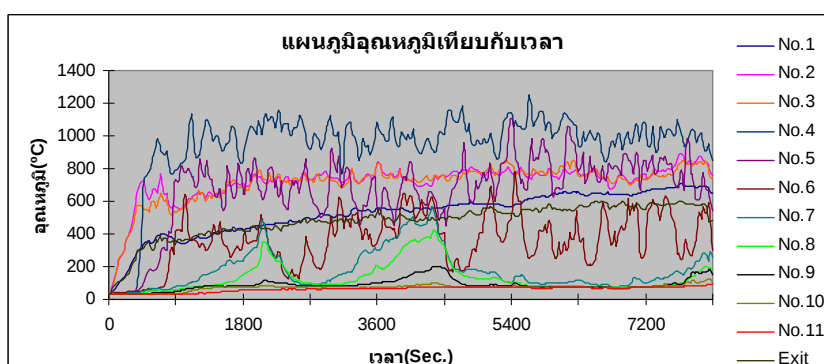
Air inlet [L/min]	Wood input [kg]	Moisture content [% wb]	Dry Wood input [kg]
250.00	25.00	15.52	21.12
300.00	25.00	17.83	20.54
350.00	25.00	21.81	19.55
400.00	25.00	18.44	20.39
450.00	25.00	18.93	20.27

4.1.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

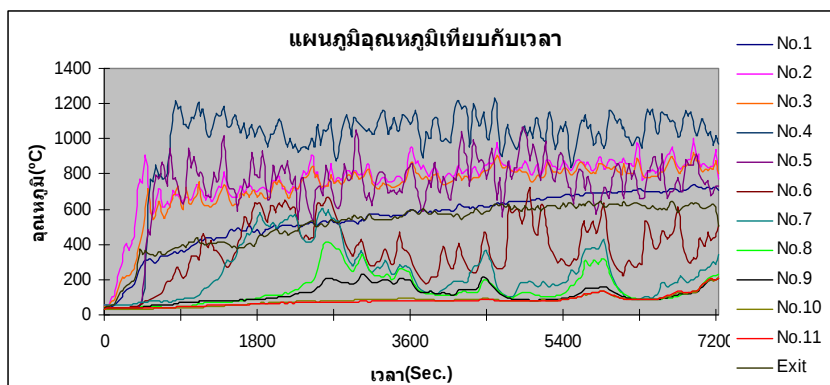
จากผลการทดลองในภาพที่ 4-1 - ภาพที่ 4-5 แสดงแผนภาพการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเทียบกับเวลา สังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่วัดค่าได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลตำแหน่งที่ 4 5 และ 6 ภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเกิดการกระเพื่อมขึ้นลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในการทดลองทุกกรณี ภาพที่ 4-7 แสดงการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ด้วยโปรแกรม MATLAB 6.1 โดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงสภาวะภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคงที่เป็นเวลา 30 นาที สังเกตเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศที่จ่ายเข้าสู่เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง พบว่าบริเวณตำแหน่งที่อากาศไหลเข้าจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



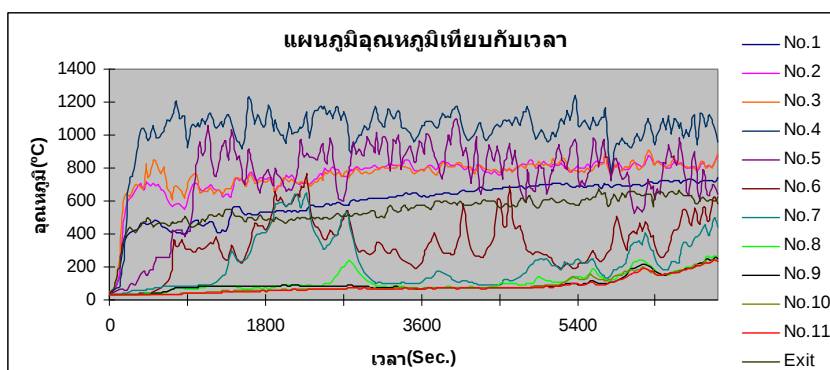
ภาพที่ 4-1 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 250 ลิตร/นาที



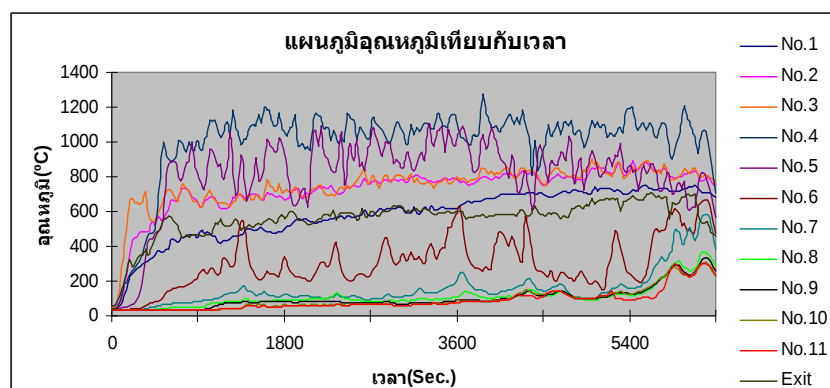
ภาพที่ 4-2 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 300 ลิตร/นาที



ภาพที่ 4-3 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตร
ของอากาศ 350 ลิตร/นาที



ภาพที่ 4-4 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตร
ของอากาศ 400 ลิตร/นาที



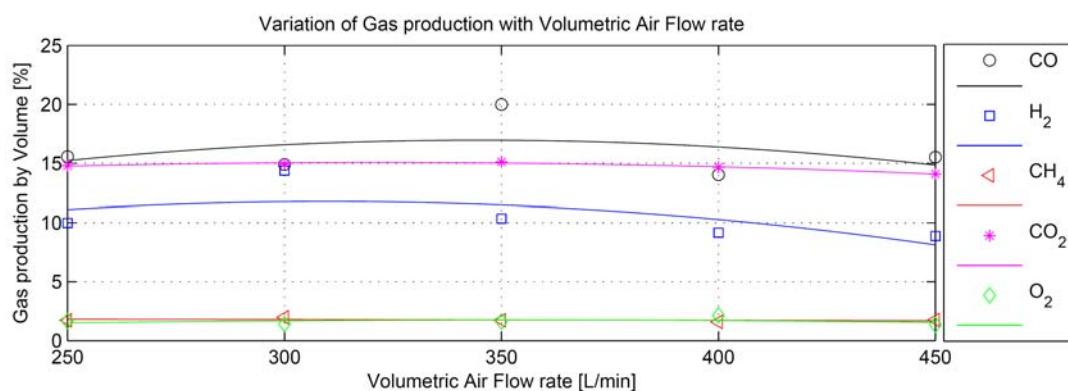
ภาพที่ 4-5 แผนภูมิอุณหภูมิเปรียบเทียบกับเวลา กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตร
ของอากาศ 450 ลิตร/นาที

4.1.3 องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง

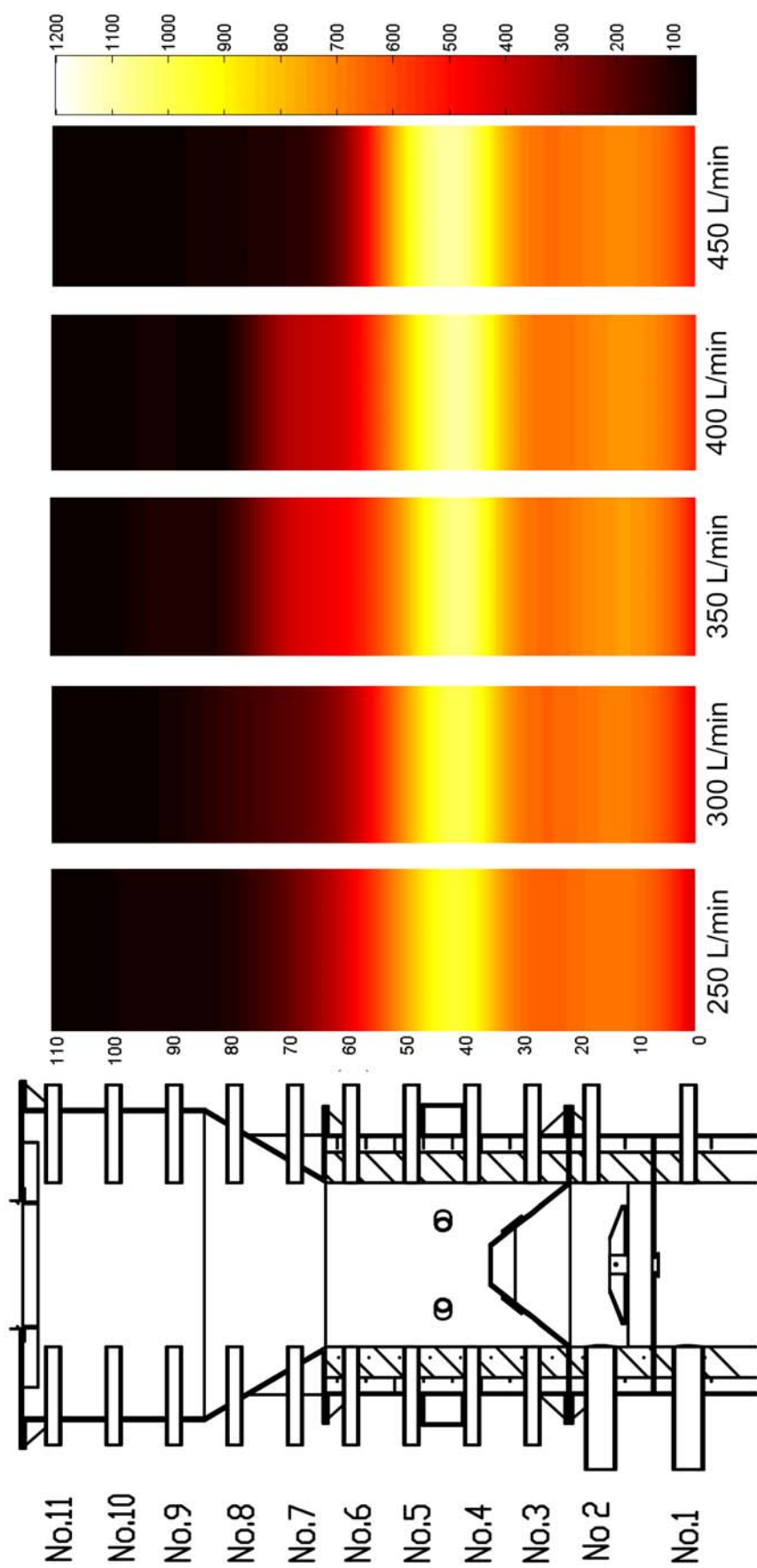
องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง หาได้จากการชักตัวอย่างก๊าซที่ตำแหน่งทางออกของก๊าซเชื้อเพลิง โดยเลือกเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่สภาวะภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคงที่จำนวน 3 ตัวอย่างและเว้นช่วงเวลากการเก็บตัวอย่างก๊าซเชื้อเพลิง 10 นาที ทั้งนี้ช่วงสภาวะคงที่สังเกตได้จากค่าอุณหภูมิที่แสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์แบบประมวลผลตามเวลาจริง (Real Time) เมื่อได้ก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง จะนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซเชื้อเพลิง ก๊าซที่ผ่านการวิเคราะห์จะประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง

Volumetric Air Flow Rate (L/min)	Gas Composition % by Volume					
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
250	15.57	9.98	1.73	14.79	1.66	56.27
300	14.89	14.39	1.98	14.95	1.41	52.39
350	19.99	10.34	1.73	15.12	1.62	51.20
400	14.04	9.16	1.59	14.67	2.15	58.40
450	15.52	8.88	1.76	14.09	1.35	58.41



ภาพที่ 4-6 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงปริมาตรของอากาศ



ภาพที่ 4-7 การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงสภาวะคงที่เทียบกับความสูง และตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล

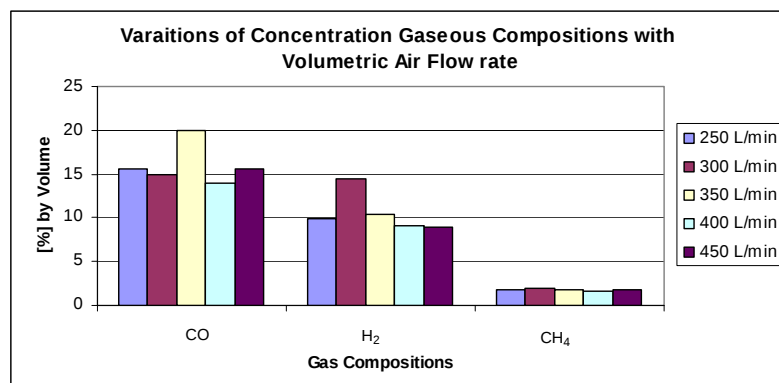
จากภาพที่ 4-6 พบว่า ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน มีการตอบสนองกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศมากกว่าก๊าซองค์ประกอบอื่นที่สามารถวัดได้ โดยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 14.04-19.99 % และมีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 19.99% ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 350 L/min ก๊าซไฮโดรเจนมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 8.88-14.39% และมีปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 14.39% ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 300 L/min เนื่องจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะทำงานที่ร้อยละของปริมาณอากาศตามทฤษฎีน้อยกว่าร้อยละ 100 ดังนั้นปริมาณองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเชื้อเพลิงจึงเป็นก๊าซที่สะท้อนถึงกระบวนการผสมระหว่าง อากาศกับก๊าซจากโซนก้นสลายและเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งควรจะต้องมีองค์ประกอบน้อยที่สุด จากผลการทดลองพบปริมาณองค์ประกอบของก๊าซออกซิเจนอยู่ระหว่าง 1.35-2.15% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ Zainal [4] ที่พบออกซิเจนในองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 %

4.1.4 ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

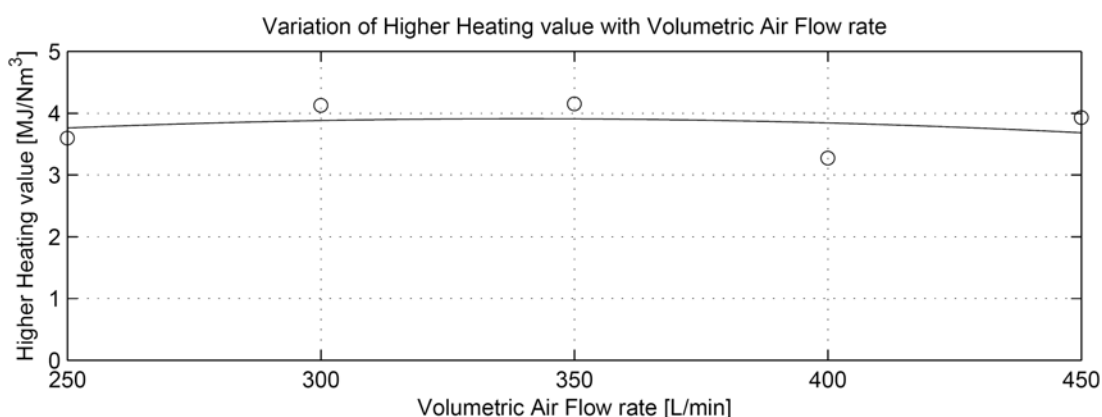
ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง จะมีผลมาจากองค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทน ที่มีอยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากภาพที่ 4-8 แสดงถึงร้อยละองค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พบมากที่สุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 350 L/min และก๊าซไฮโดรเจนพบมากที่สุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 300 L/min จากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตก๊าซแบบไหลลง จะมีค่าความร้อนค่าสูงอยู่ระหว่าง 3.27-4.15 MJ/Nm³ และมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 350 L/min ดังแสดงในภาพที่ 4-9 แต่ทั้งนี้ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 350 L/min และ 300 L/min จะมีค่าความร้อนค่าสูงปริมาณใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสองกรณีมีองค์ประกอบของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ใกล้เคียงกัน ประกอบกับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นองค์หลักของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ค่าความร้อนค่าสูงขององค์ประกอบก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ในก๊าซเชื้อเพลิง[9]

ก๊าซ	ค่าความร้อนค่าสูง (kJ/kmole ที่ 25°C)
ไฮโดรเจน (H ₂)	285,840
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	282,990
มีเทน (CH ₄)	890,360



ภาพที่ 4-8 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้
เปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ



ภาพที่ 4-9 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนค่าสูงเปรียบเทียบกับ
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ

4.2 โซนปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

โซนปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง แบ่งได้ 4 โซนคือ โซนอบแห้ง โซนกลั่นสลาย โซนเผาไหม้ และโซนรีดักชัน แต่ละโซนแบ่งแยกได้ตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายใน โดยอุณหภูมิภายในจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากภาพที่ 4-10 แผนภูมิวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งใช้สำหรับกำหนดโซนอบแห้งและโซนกลั่นสลายพบว่าโซนอบแห้งจะมีอุณหภูมิ ต่ำกว่า 200°C โซนกลั่นสลายมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200-600°C ส่วนโซนเผาไหม้กำหนดโซนได้จากตำแหน่งที่จ่ายอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 750-1600°C สุดท้ายโซนรีดักชันกำหนดได้จากตำแหน่งที่เกิดกระบวนการดูดความชื้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในลดลงมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 600-900°C จากการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเฉลี่ย 30 นาที ในช่วงสภาวะคงที่ ดังภาพที่ 4-7 สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

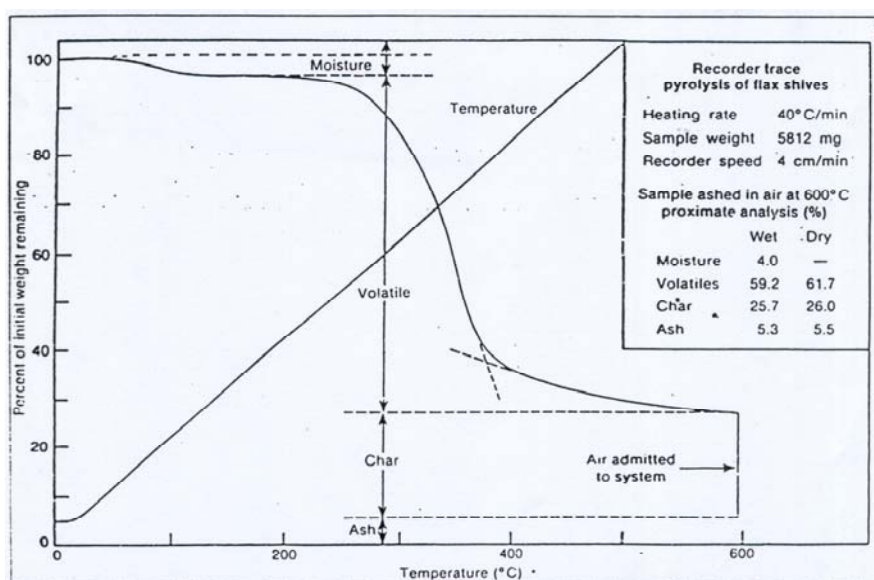
โซนอบแห้งจะอยู่ในช่วงความสูง 70 เซนติเมตร ขึ้นไป โดยมีอุณหภูมิต่ำกว่า 200°C

โซนกลั่นสลาย อยู่ในช่วงความสูง 60-70 เซนติเมตร อุณหภูมิอยู่ในช่วง $200-700^{\circ}\text{C}$

โซนเผาไหม้ อยู่ในช่วงความสูง 40-50 เซนติเมตร อุณหภูมิอยู่ในช่วง $750-1000^{\circ}\text{C}$

โซนรีดักชัน อยู่ในช่วงความสูง 20-40 เซนติเมตร อุณหภูมิอยู่ในช่วง $600-900^{\circ}\text{C}$

อย่างไรก็ตามโซนที่เกิดขึ้นไม่สามารถกำหนดตำแหน่งได้ชัดเจน เนื่องจากการเลื่อนลงของเชื้อเพลิงไม้ที่ไม่ต่อเนื่อง เป็นผลให้โซนการเกิดปฏิกิริยา เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งตลอดเวลา ซึ่งสามารถสังเกตได้จากแผนภูมิอุณหภูมิเทียบกับเวลา ภาพที่ 4-1 ถึงภาพที่ 4-5 แต่ทั้งนี้การเลื่อนโซนจะจำกัดอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้ในเบื้องต้น

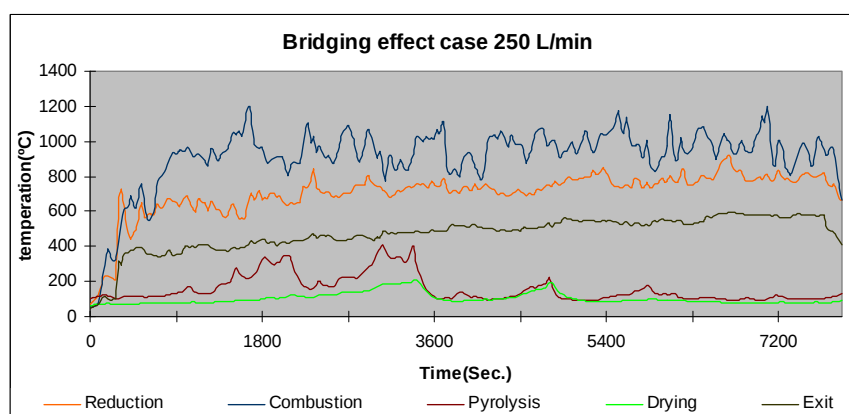


ภาพที่ 4-10 แผนภูมิเทอร์โมกราวิเมตริกของเชื้อเพลิงชีวมวล [3]

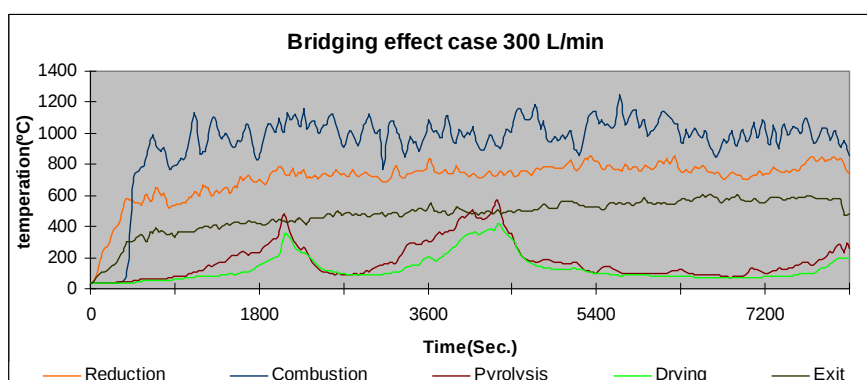
4.3 ปรางูการณ้บริดจิง (Bridging Effect)

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.1.2 พบว่าอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงบางตำแหน่งเกิดการกระเพื่อม หลังจากแบ่งโซนปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง บริเวณตำแหน่งหัวฉีดอากาศของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง หรือโซนการเผาไหม้อุณหภูมิเกิดการกระเพื่อมอย่างชัดเจน (ภาพที่ 4-11 ถึง ภาพที่ 4-15) จากการศึกษาของ Zainal [4] ได้เกิดปรากฏการณ์บริดจิงเช่นเดียวกัน (ภาพที่ 4-16 ก) โดย Zainal ได้กล่าวว่าปรากฏการณ์บริดจิงเป็นปรากฏการณ์ปกติของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ภาพที่ 4-16 ข แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของเชื้อเพลิงแข็งภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ขนาดของเชื้อเพลิงแข็งจะลดลงเมื่อเชื้อเพลิงเลื่อนลงสู่ด้านล่างของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง และจะลดลงอย่างรวดเร็วในโซนการเผาไหม้บริเวณที่จ่ายอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเชื้อเพลิงแข็งจะเปลี่ยนกลายเป็นก๊าซอย่างรวดเร็ว

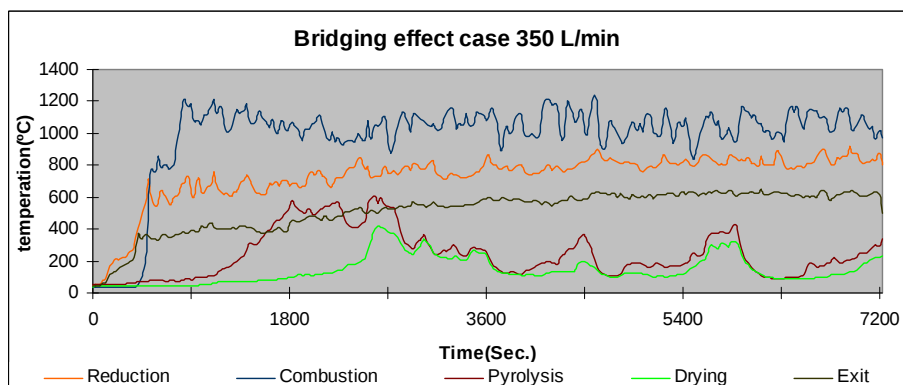
เชื้อเพลิงแข็งที่อยู่เหนือโซนการเผาไหม้ตกลงมาแทนที่อย่างไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากเกิดการบีบอัดกันเองระหว่างเชื้อเพลิงแข็ง เป็นผลทำให้เกิดปรากฏการณ์บริดจิงขึ้น ผลกระทบจากปรากฏการณ์บริดจิง จะสะท้อนออกมาในรูปของอุณหภูมิที่กระเพื่อม ณ บริเวณโซนเผาไหม้ การกระเพื่อมของอุณหภูมิ เกิดจากการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟเมื่อเกิดปรากฏการณ์บริดจิงและเมื่อเชื้อเพลิงด้านบนตกลงมาสู่โซนการเผาไหม้อุณหภูมิที่วัดได้จะลดลง เนื่องจากเทอร์คัปเปิ้ลจะสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงแข็งซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟ ดังนั้นค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลจึงเกิดการกระเพื่อมตลอดเวลา Zainal ได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น โดยใช้กรวยเอียง 60 องศา บริเวณด้านบนของโซนการเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 4-17 นอกจากนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้กลไกช่วยขยับให้เชื้อเพลิงแข็งลงมาสู่ด้านล่างอย่างต่อเนื่อง



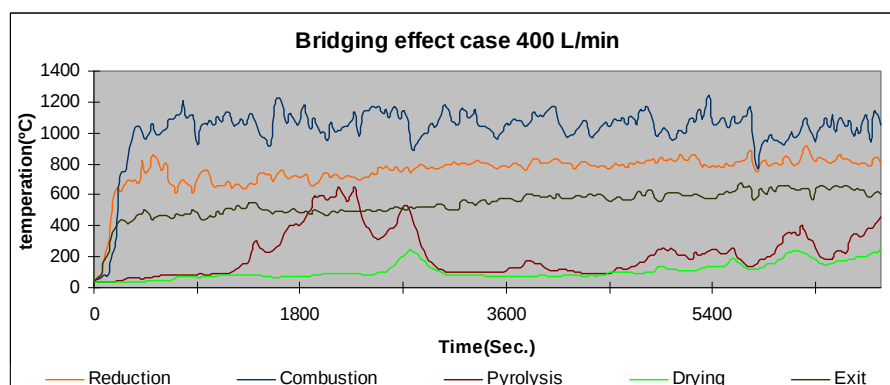
ภาพที่ 4-11 ปรากฏการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 250 ลิตร/นาที



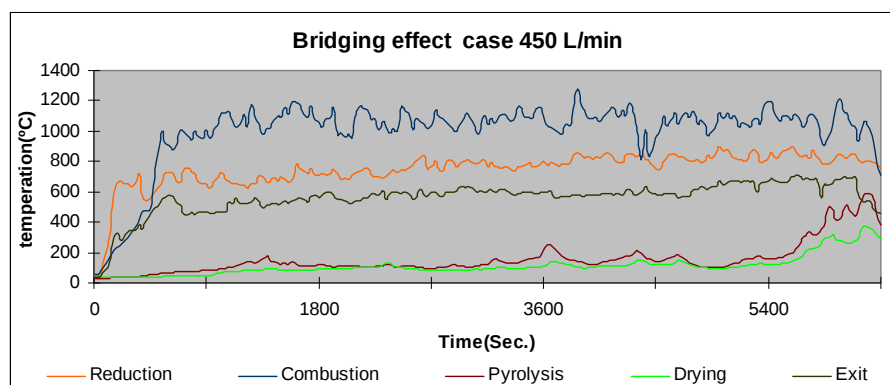
ภาพที่ 4-12 ปรากฏการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 300 ลิตร/นาที



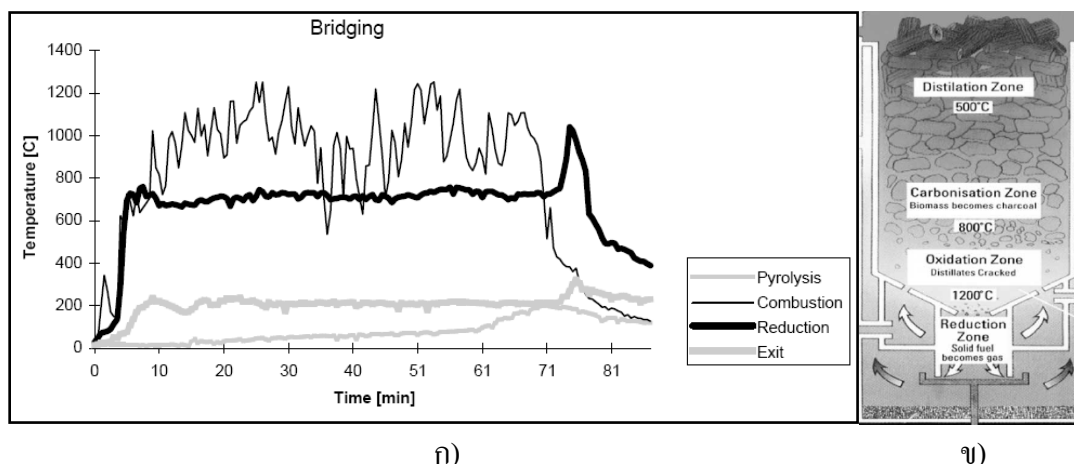
ภาพที่ 4-13 ปรากฏการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 350 ลิตร/นาที



ภาพที่ 4-14 ปรากฏการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 400 ลิตร/นาที

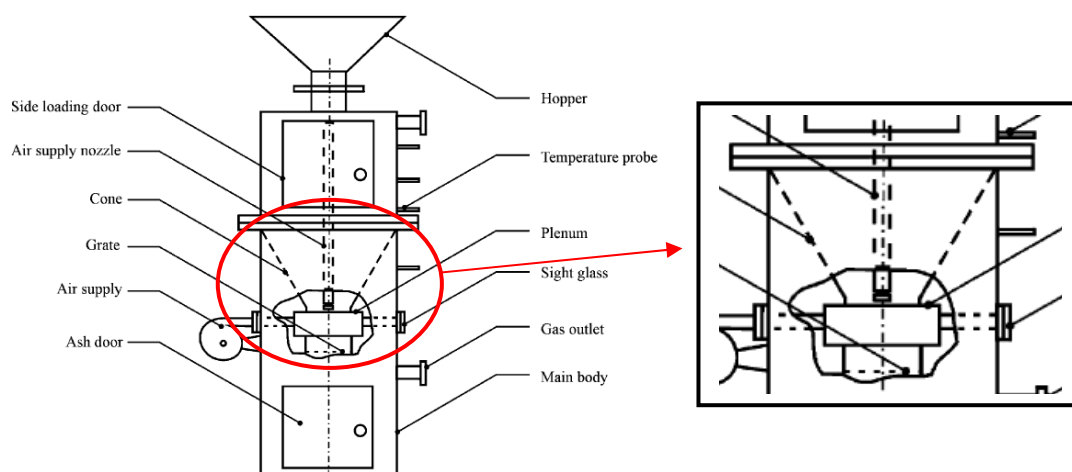


ภาพที่ 4-15 ปรากฏการณ์บริดจิง กรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 450 ลิตร/นาที



ภาพที่ 4-16 ก) ปรากฏการณ์บริดจิงภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง[4]

ข) ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงแข็งภายใน
เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง[5]



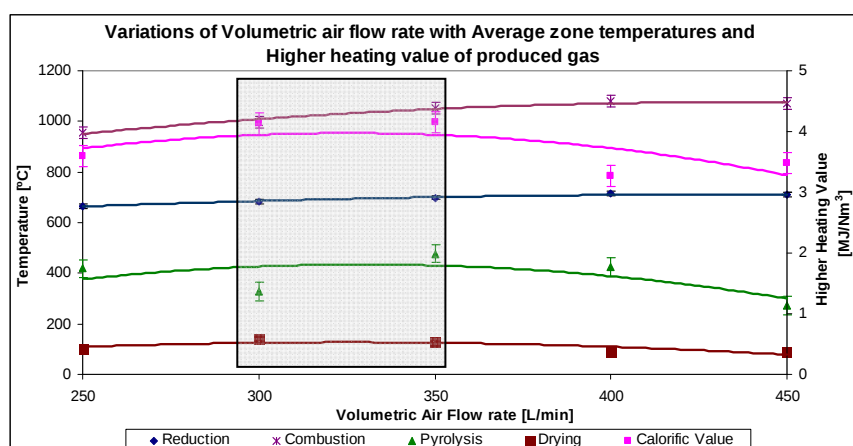
ภาพที่ 4-17 การใช้กรวยเอียง 60 องศา บริเวณด้านบนของโซนการเผาไหม้ [4]

4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

จากการผลการทดลองการเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ จะส่งผลต่ออุณหภูมิภายในของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ภาพที่ 4-7 แสดงถึงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง บริเวณโซนการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ เนื่องจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีสภาวะการทำงานที่ปริมาณร้อยละของอากาศตามทฤษฎี ต่ำกว่า 100 % ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศหรือออกซิไดซ์เซอร์ (Oxidizer) จึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างออกซิไดซ์เซอร์กับเชื้อเพลิง ประกอบกับความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อกระบวนการผสม (Mixing) จากองค์ประกอบที่ได้กล่าวมาจึงส่งผลทำให้

อุณหภูมิในโซนการเผาไหม้เพิ่มขึ้น และเนื่องจากก๊าซที่เกิดจากโซนการเผาไหม้จะไหลลงสู่ทางด้านล่างของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงผ่านโซนรีดักชัน ดังนั้นอุณหภูมิของก๊าซที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงส่งผลทำให้อุณหภูมิในโซนรีดักชันเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน(ภาพที่ 4-18)

จากภาพที่ 4-18 พบว่าอุณหภูมิภายในที่ได้รับอิทธิพลมาจากการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศจะมีผลต่อคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ออกมา ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของค่าความร้อนค่าสูง จากผลการทดลองสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง คือ ช่วงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศระหว่าง 300- 350 ลิตร/นาที โดยผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนค่าสูงเท่ากับ 4.15 MJ/Nm^3 ที่อุณหภูมิ โซนรีดักชัน โซนการเผาไหม้ โซนกลั่นสลาย และโซนอบแห้ง เท่ากับ 690°C 1025°C 403°C และ 135°C ตามลำดับ



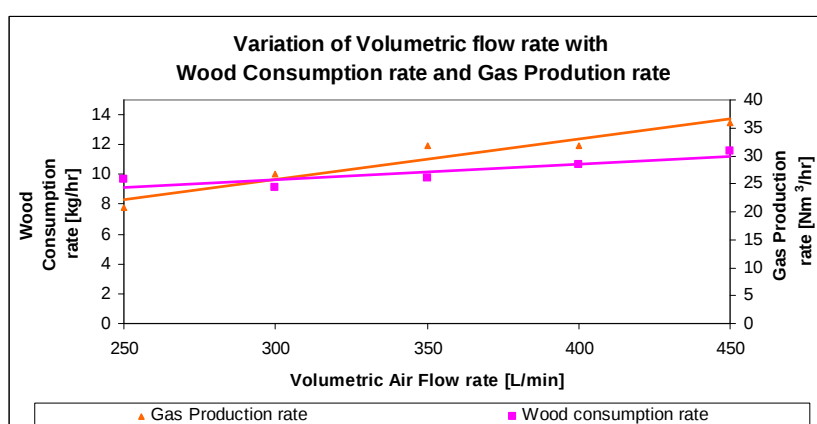
ภาพที่ 4-18 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของโซนภายในและค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิง

4.5 อัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

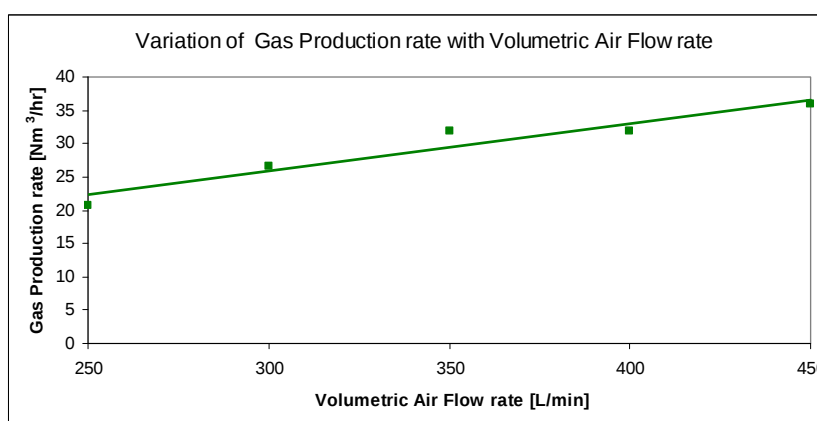
อัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จะเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ และมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้ ดังแสดงในภาพที่ 4-19 ถึง ภาพที่ 4-21 โดยเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีอัตราการเผาไหม้อยู่ระหว่าง $9.67\text{--}11.58 \text{ kg/hr}$ และมีอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง $20.70\text{--}35.90 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ดังแสดงในตารางที่ 4-4 สาเหตุของอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศในโซนการเผาไหม้ ดังที่ได้วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณก๊าซที่เกิดจากโซนการเผาไหม้มีอัตราสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศ จากการศึกษาของ Zainal ในภาพที่ 4-22 ก) พบว่าในการทดลองเพิ่มอัตราส่วนสมมูล จะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงลดลง Zainal ได้อธิบายว่าหากเครื่องผลิต

ก๊าซเชื้อเพลิงเป็นแบบป้อนเชื้อเพลิงเพียงครั้งเดียว (Batch Type) โดยปริมาณอากาศและเวลาในการทดลองเท่ากันทุกการทดลอง ดังนั้นจากสมการที่ 4-1 อัตราส่วนสมมูลจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณเชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งเป็นการลดวัสดุที่สามารถเผาไหม้ได้ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงจึงลดลง

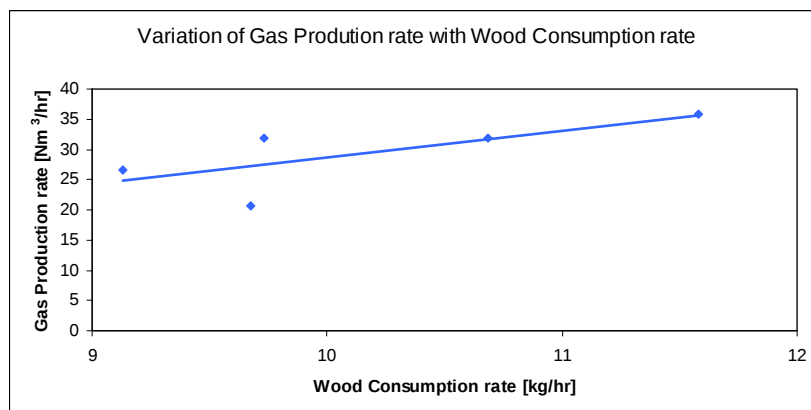
$$\text{Equivalence Ratio, } \phi = \frac{(\text{Flow rate of air supply}) \times (\text{Duration of the run})}{(\text{Mass input of wood}) \times (A/F \text{ for } \phi = 1)} \quad (4-1)$$



ภาพที่ 4-19 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเปรียบเทียบกับอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง



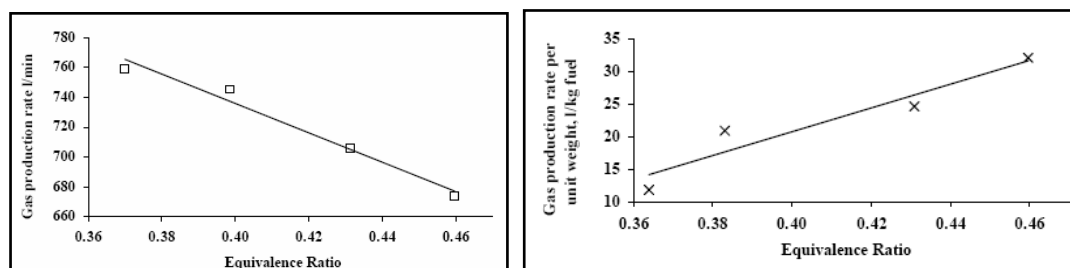
ภาพที่ 4-20 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ



ภาพที่ 4-21 แผนภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ตารางที่ 4-4 ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

Volumetric Air Flow rate L/min	Gas Output		
	Dry Gas Production		
	kmol dry gas/hr	Nm³ dry gas/hr	kg dry gas/hr
250	0.85	20.70	23.40
300	1.09	26.69	28.89
350	1.30	31.85	35.95
400	1.31	31.92	36.38
450	1.47	35.90	40.81

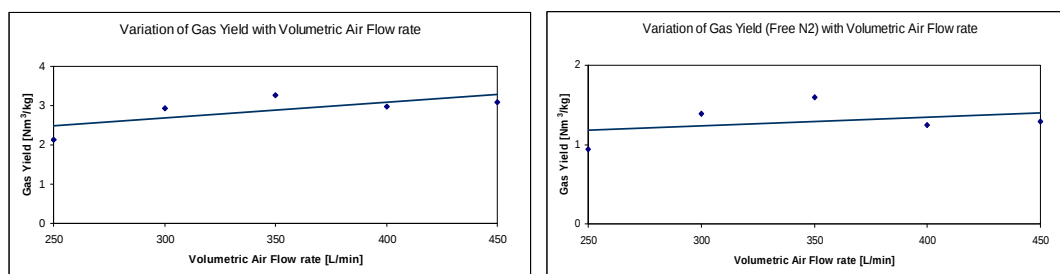


ภาพที่ 4-22 ก) แผนภูมิแสดงอัตราการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูล

ข) แผนภูมิแสดงอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็งเปรียบเทียบกับอัตราส่วนสมมูล [4]

ในส่วนของการหาอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็ง จากผลการทดลอง ภาพที่ 23 ก) และ ภาพที่ 23 ข) แสดงถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศในโซนการเผาไหม้ ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองของ Zainal ในภาพที่ 22 ข) โดยภาพที่ 23 ก) แสดงอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งในกรณีรวมปริมาณของก๊าซ

ไนโตรเจน และภาพที่ 23 ข) กรณีไม่รวมปริมาณของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งทั้งสองกรณีจะพบว่าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 350 L/min จะมีอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งมากที่สุดเท่ากับ $3.27 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ในกรณีรวมปริมาณของก๊าซไนโตรเจน และ $1.60 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ในกรณีไม่รวมปริมาณของก๊าซไนโตรเจน



ก)

ข)

ภาพที่ 4-23 แผนภูมิแสดงอัตราส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงต่อมวลเชื้อเพลิงแข็งเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ ก) รวมปริมาณของก๊าซไนโตรเจน
ข) ไม่รวมปริมาณของก๊าซไนโตรเจน

4.6 การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงคุณภาพและปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งจากการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพพบว่าเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงที่สุด ในกรณีปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศให้อยู่ในช่วง 300-350 L/min และจากการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณพบว่าปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอากาศที่ปรับเพิ่มขึ้น ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จะกล่าวถึงภาพรวมทั้งปริมาณและคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิง ในรูปแบบของประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพที่ 4-24 จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในภาคผนวก ง โดยอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25°C ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 66.05 % ในกรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 350 L/min ซึ่งสอดคล้องกับคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงและอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็ง หากนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zainal [4] ในตารางที่ 4-5 ซึ่งใช้เชื้อเพลิงประเภทไม้เช่นเดียวกัน การทดลองของ Zainal จะมีประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสูงกว่าประมาณ 10 % เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สามารถกระทำได้โดยการใช้ความร้อน

จากก๊าซเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิประมาณ 500 °C นำมาอุ่นอากาศที่จ่ายเข้าสู่โซนการเผาไหม้ ซึ่งต้องทำการศึกษารณีนี้ต่อไปหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

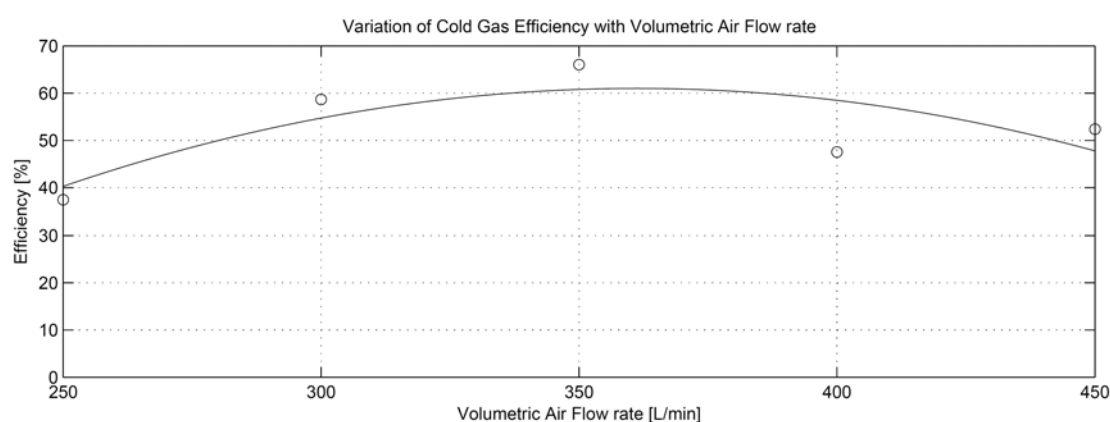
ในส่วนของการประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จะอาศัยข้อมูลประสิทธิภาพระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ผลิตพลังงานไฟฟ้า ในการทดลองของ Zainal จากตารางที่ 4-6 แสดงผลการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองของ Zainal พบว่าระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ผลิตพลังงานไฟฟ้า จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานเชิงความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง ก่อนเข้าสู่ระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิงและเครื่องยนต์ผลิตพลังงานไฟฟ้า จากการทำ Curve Fitting เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ระหว่างพลังงานเชิงความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงกับระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิง และเครื่องยนต์ผลิตพลังงานไฟฟ้าดังแสดงในสมการที่ 4-2

$$y = 0.0104x^2 - 1.2098x + 4.159 \quad (4-2)$$

โดยที่ y = ประสิทธิภาพของระบบทำความสะอาดและเครื่องยนต์ผลิตพลังงานไฟฟ้า

x = พลังงานเชิงความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

จากสมการที่ 4-2 จะใช้สำหรับประเมินสมรรถภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง จากการคำนวณประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 9.28-11.66 % และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 300 L/min ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองของ Zainal ในตารางที่ 4-5



ภาพที่ 4-24 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่สภาวะปกติ
เปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ

ตารางที่ 4-5 สมรรถภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง[4]

Run	Density (kg/m ³)	Calorific value (MJ/m ³)	Power output from the gasifier (kW)	Cold gas efficiency (%)	Mass conversion efficiency (%)	Equivalence ratio	Remark
12	1.11	4.65	49.81	67.65	98.83	0.268	Wood chips
15	1.10	4.77	65.04	68.37	98.39	0.259	Wood chips
16	1.13	5.19	44.93	76.68	90.12	0.287	Wood chips

ตารางที่ 4-6 สมรรถภาพของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล [4]

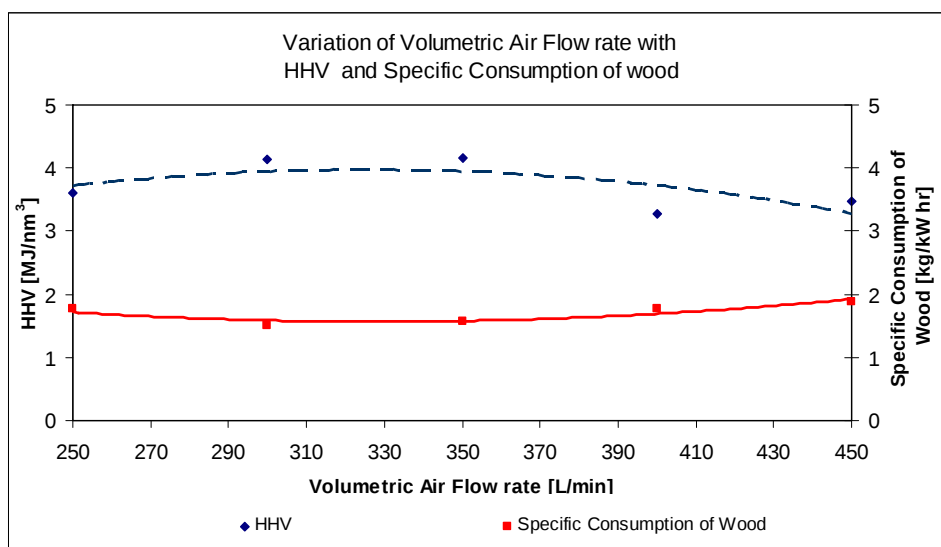
Run	Power input into the gasifier (kW)	Power output from the gasifier (kW)	Mass conversion efficiency (%)	Equivalence ratio	Efficiency of the gasifier (%)	Overall efficiency of the biomass gasifier system (%)	Specific consumption of wood (kg/kW h)
40	75.79	55.68	82.09	0.356	73.47	10.63	2.00
41	71.44	57.81	75.87	0.383	80.92	8.13	2.58
42	57.35	38.83	71.50	0.3831	67.71	10.64	1.97
43	59.35	45.75	85.10	0.364	77.09	10.54	2.02
44	39.13	30.26	61.57	0.3831	77.33	15.46	1.49
45	48.93	42.47	86.14	0.438	86.80	12.34	1.74
46	58.53	48.29	82.49	0.37	82.50	10.28	2.06

ตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงของระบบผลิตการเชื้อเพลิงแบบไหลลง

Volumetric Air Flow rate L/min	Input		Output			Gasifier Efficiency %	Overall Efficiency %
	Dry wood input kg. dry wood/hr	Power input kW	Dry Producer Gas MJ/Nm ³ dry gas	Power output kW	Power output kWe		
250	9.67	55.26	20.70	20.69	5.50	37.44	9.95
300	9.13	52.15	26.69	30.60	6.08	58.67	11.66
350	9.73	55.60	31.85	36.72	6.15	66.05	11.07
400	10.68	61.03	31.92	29.02	6.04	47.55	9.89
450	11.58	66.16	35.90	34.65	6.14	52.38	9.28

การประเมินช่วงการทำงานที่เหมาะสมของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สามารถประเมินได้จาก อัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ (Specific Consumption) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งต่อพลังงานไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ดังแสดง ในตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-25 แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิง และอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ สังเกตเห็นได้ว่าอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะจะมีแนวโน้มในเชิงบวกเช่นเดียวกับค่าความร้อนค่าสูง จากการประเมินอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.50-1.89 kg/kW hr และมีช่วงการทำงานที่เหมาะสมของระบบจะอยู่ในช่วงอัตราการไหลเชิงปริมาตร 300-350 L/min และมีอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะระหว่าง 1.50-1.58 kg/kW hr โดยการวิเคราะห์ของ Zainal[4] พบว่าระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.98 kg/kW hr มีอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะมากกว่าที่ได้จากการประเมิน เนื่องจากการประเมินพลังงานจากระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง มิได้

คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียไปพร้อมกับทาร์ ในระบบทำความสะอาดก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งต้อง
 ทำการศึกษาในกรณีนี้หากต้องการพัฒนาเพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 4-25 แผนภูมิการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเปรียบเทียบกับ
 ค่าความร้อนค่าสูงและอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 4-8 อัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ

Volumetric Air Flow rate L/min	Specific consumption of wood kg/kWe hr
250	1.76
300	1.50
350	1.58
400	1.77
450	1.89

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยอาศัยการปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศจำนวน 5 กรณี คือ 250, 300, 350, 400 และ 450 L/min จากการทดลองพบว่า ปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่ออุณหภูมิภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง โดยเฉพาะในโซนการเผาไหม้ ซึ่งใช้อากาศสำหรับกระบวนการออกซิเดชัน ดังนั้น อุณหภูมิในโซนการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้น เมื่อปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณอากาศยังส่งผลต่อแนวโน้มของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ทั้งนี้หากวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพจะพบว่า ค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซเชื้อเพลิงจะไม่เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ เนื่องจากปฏิกิริยาภายในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงไม่ได้จำกัดอยู่เพียงเฉพาะปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ยังมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในโซนกลั่นสลายและโซนรีดักชัน ปฏิกิริยาเคมีที่เป็นกระบวนการเกิดก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นกระบวนการที่เกิดในโซนรีดักชัน จากการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 350 L/min เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงที่สุด โดยมีค่าความร้อนค่าสูงเท่ากับ 4.5 MJ/Nm^3

จากการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงาน ของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งประเมินในเชิงประสิทธิภาพและอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ ที่สภาวะเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง คือ ช่วงอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศระหว่าง 300-350 L/min ในสภาวะนี้จะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงระหว่าง 58.67-66.05 % จากการประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ที่สภาวะเหมาะสมจะมีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าระหว่าง 11.66-11.07 % และมีอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะระหว่าง 1.50-1.58 kg/kW hr ทั้งนี้หากต้องการพัฒนาเพื่อใช้สำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าต้องประเมินประสิทธิภาพจากการใช้งานจริงอีกครั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การประยุกต์ในงานกับขยะมูลฝอยชุมชน

ขยะมูลฝอยเกิดจากการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งลักษณะและองค์ประกอบของขยะมูลฝอยจะแตกต่างกันตามวัฒนธรรมการดำเนินชีวิตของท้องถิ่นที่เป็นแหล่งกำเนิดของขยะมูลฝอย ทั้งด้านองค์ประกอบทางกายภาพ, องค์ประกอบทางเคมี และความชื้นของขยะมูลฝอย จากการสำรวจขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในประเทศไทย[1] พบว่าขยะมูลฝอยในประเทศไทย มีองค์ประกอบทางกายภาพประกอบด้วย เศษอาหารและสารอินทรีย์ 63.57%, กระจก 8.19%, พลาสติก 16.83%, แก้ว 3.47%, โลหะ 2.10%, ยางและหนัง 0.50%, ผ้า 1.37% และอื่นๆ 3.97% ส่วนองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วย ความชื้น 61.33%, คาร์บอน 47.87%, ไฮโดรเจน 5.39%, ออกซิเจน 32.54%, ไนโตรเจน 0.20%, ฟอสฟอรัส 0.17% และค่าความร้อนค่าสูง 7,674 kcal/kg จากข้อมูลองค์ประกอบของขยะมูลฝอย จะเห็นได้ว่าขยะมูลฝอยเหมาะสำหรับนำกลับมาใช้ผลิตพลังงาน เนื่องจากมีค่าความร้อนค่าสูงมากกว่าถ่านหินลิกไนต์ (3,500-4600 kcal/kg[12]) ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักสำหรับการผลิตพลังงานภายในประเทศ แต่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความชื้นในขยะมูลฝอย และองค์ประกอบของวัสดุที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ความชื้นในขยะมูลฝอยจะส่งผลต่อโซนปฏิกิริยาภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง หากเชื้อเพลิงมีความชื้นสูง ความต้องการความร้อนจากกระบวนการออกซิเดชันในโซนการเผาไหม้ ซึ่งนำต้องการความร้อนประมาณ 2300 kJ/kg และ 1500 kJ/kg สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิให้เท่ากับ 700°C[3] ซึ่งเป็นอุณหภูมิปฏิบัติงานของเตาเผาขยะมูลฝอยทั่วไป ดังนั้นความร้อนที่ต้องใช้ในกระบวนการกลั่นสลายและกระบวนการรีดักชันจะลดลง และส่งผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณและคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิง ในส่วนของวัสดุที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ จะส่งผลต่อตะกั่วเคลื่อนที่ของระบบการถ่ายเถ้า ซึ่งจะต้องออกแบบเพื่อรองรับวัสดุที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้โดยเฉพาะ และใช้พลังงานความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุโดยไม่เกิดประโยชน์ต่อระบบ

ดังนั้นขยะมูลฝอยต้องผ่านกระบวนการคัดแยกวัสดุที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ออก, ลดขนาดขยะมูลฝอย, ลดความชื้นให้ไม่เกิน 20% [13] และอัดก้อนขยะมูลฝอยให้มีขนาดระหว่าง 1x0.5x0.5 cm. ถึง 8x4x4 cm.[10] ก่อนนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง เพื่อผลิตพลังงาน โดยขนาดของเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 25 kg/batch ที่ใช้ในการทดลอง จะเหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดประมาณ 2.5x2.5x2.5 cm.

5.2.2 การขยายขนาดเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

การขยายขนาดเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตพลังงาน จะอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการจากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลงขนาด 25 kg/batch ข้อมูลสำหรับขยายขนาดเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จะอ้างอิงจากสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตัวแปรสำคัญที่ใช้เพื่อขยายขนาดเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงคือ Hearth Load [10] ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซเชื้อเพลิงในสภาวะปกติ 25 °C 1 atm ต่อพื้นที่หน้าตัดของคอคอดในโซนการเผาไหม้ (Throat)

การออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง โดยมีคอคอดในโซนการเผาไหม้จะใช้ความสัมพันธ์ของ Hearth Load เพื่อออกแบบโซนการเผาไหม้ของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดเหมาะสมสำหรับ Hearth Load โดยเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในภาคผนวก ง พบว่าที่จุดเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง มีค่า Hearth Load เท่ากับ $2.96 \text{ Nm}^3/\text{m}^2/\text{s}$ ค่าของฮาร์ทโหลดที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการสามารถใช้สำหรับการออกแบบคอคอดเพื่อขยายขนาดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง จากภาคผนวก ง หากต้องการขยายขนาดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้เท่ากับ 50 kg/hr คอคอดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 122 mm.

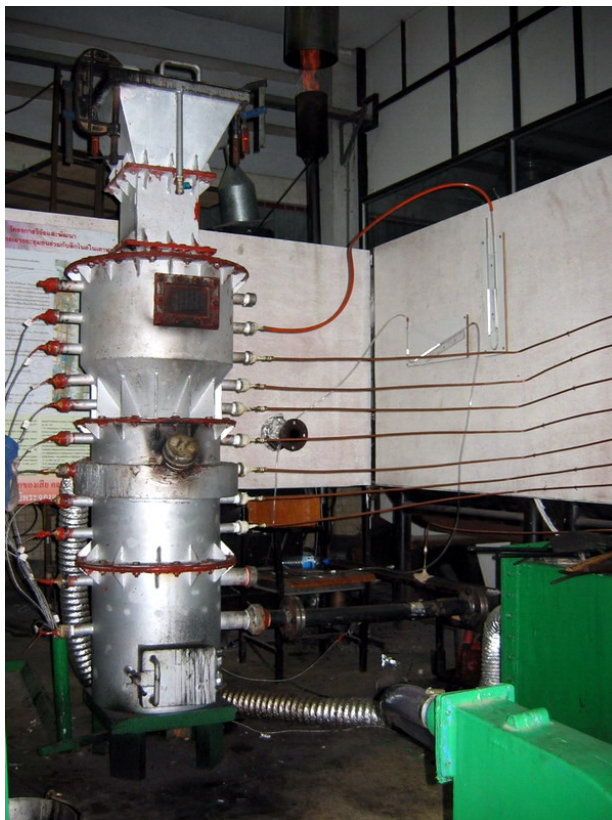
เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. โครงการวิจัยเชิงนโยบายเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและการใช้พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในประเทศไทย. กรุงเทพฯ : สำนักงาน, 2550.
2. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนอย่างครบวงจร คู่มือสำหรับผู้บริหารองค์กรส่วนท้องถิ่น. กรุงเทพฯ : กรม, 2547.
3. Reed, T. B. and Das, A. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. 3rd ed. Colorado : The Biomass Energy Foundation Press, 1988.
4. Z. A. Zainal, A. Rifau, G. A. Quadir and K. N. Seetharamu. "Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier." Biomass and Bioenergy. 23 (2002) : 283-289.
5. M. Dogru, C. R. Howarth, G. Akay, B. Keskinler and A. A. Malik. "Gasification of Hazelnut Shells in Downdraft Gasifier." Energy. 27 (2002) : 415-427.
6. T. H. Jayah, L. Aye, R. J. Fuller and D. F. Stewart. "Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying." Biomass and Bioenergy. 25 (2003) : 459-469.
7. A. Midilli, M. Dogru, C. R. Howarth, M. J. Ling and T. Ayhan. "Combustible Gas Production from Sewage Sludge with a Downdraft Gasifier." Energy Conversion & Management. 42 (2001) : 157-172.
8. M. Dogru, A. Midilli and C. R. Howarth "Gasification of Sewage Sludge Using a Throat Downdraft Gasifier and Uncertainty Analysis." Fuel Processing Technology. 75 (2002) : 55-82.
9. กองอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน, สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. ระบบเครื่องยนต์ก๊าซโปรคิวเซอร์จากชีวมวล (Gas Producer Engine System from Biomass). กรุงเทพฯ : กอง, 2544.
10. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Wood Gas as Engine Fuel. Rome : FAO Forestry Department, 1986.

11. สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. “ระบบผลิตแก๊สชีวมวลขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้า Small Biomass Gasification for Power.” การประชุมวิชาการแห่งชาติครั้งที่ 1 ระบบกำเนิดก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลและขยะมูลฝอยเพื่อผลิตพลังงาน: ทางเลือกใหม่ของพลังงานทดแทน? 109-119. รวบรวมและจัดพิมพ์โดย สมรัฐ เกิดสุวรรณ และ สุธรรม ปทุมสวัสดิ์. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ : กรุงเทพฯ, 2549
12. G. L. Borman and K. W. Ragland. Combustion Engineering. International ed. Singapore : The McGraw-Hill Companies, Inc., c1998.
13. R. Bain. “Beneficiation of Biomass for Gasification and Combustion.” Biomass Gasification Principles and Technology. 72-90. Edited by T. B. Reed. Colorado : Solar Energy Research Institute, 1981.
14. Pitaksa Suwannakuta. A Study on Biomass Gasification in Spout-Fluid Bed. Master of Engineering Degree School of Environment Resources, and Development Asian Institute of Technology, 2002.
15. S. R. Turns. An Introduction to Combustion : Concepts and Application. 2nd ed. Singapore : The McGraw-Hill Companies, Inc. c2000.
16. A. Chernov and N. Bessrebrennikov. Fundamentals of Heat Engineering and Hydraulics. Moscow : Mir Publishers, 1969.
17. Y. A. Cengel and M. A. Boles. Thermodynamics : An Engineering Approach. 4th ed. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc. c2002.
18. C. Higman and M. van der Burgt. Gasification. USA. : Elsevier Science, c2003.
19. P. Quaak, H. Knoef and H. Stassen. Energy from Biomass : A Review of Combustion and Gasification Technologies. Energy Series. WTP 422. Washington, D.C : Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, c1999.
20. M. J. Prins. Thermodynamics Analysis of Biomass Gasification and Torrefaction. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
21. M. J. Prins, K. J. Ptasinski and F. J. J. G. Janssen. “Thermodynamics of gas-char reaction: First and Second Law Analysis.” Chemical Engineering Science. 58 (2003) : 1003-1011.
22. Z. A. Zainal, R. Ali, C. H. Lean and K. N. Seetharamu. “Prediction of Performance of a Downdraft Gasifier Using Equilibrium Modeling for Different Biomass Material.” Energy Conversion & Management. 42 (2001) : 1499-1515.

ภาคผนวก ก

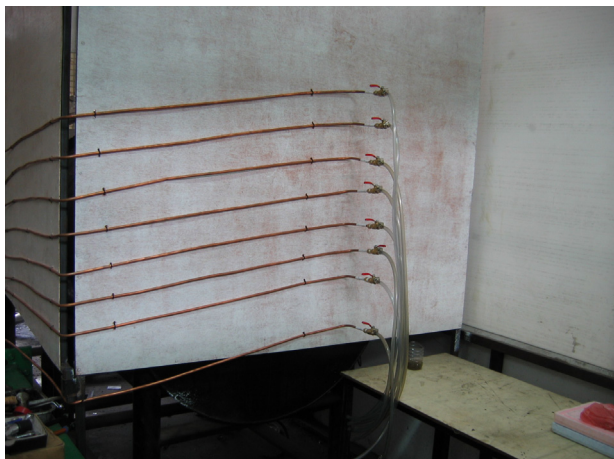
ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ ก-1 เครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง



ภาพที่ ก-2 ระบบการป้อนอากาศ



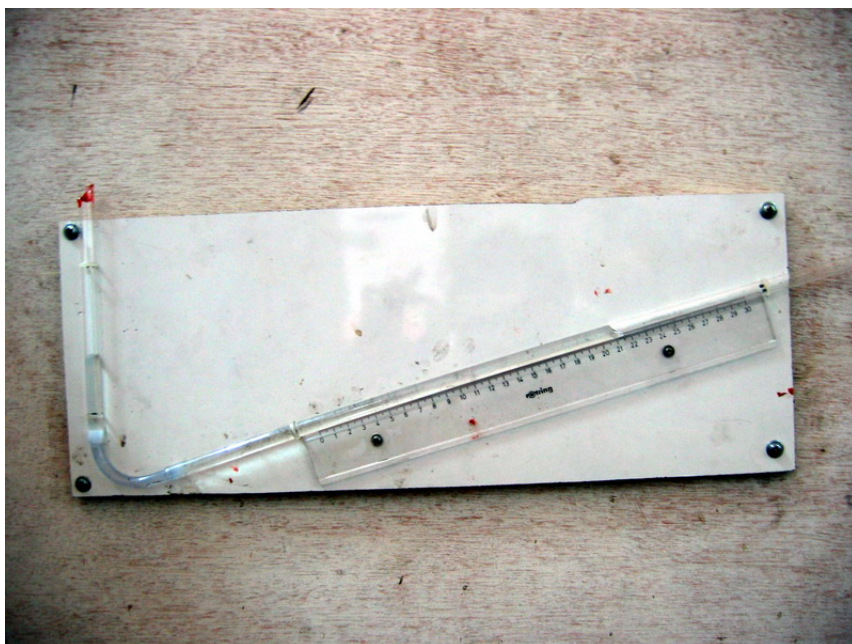
ภาพที่ ก-3 ท่อเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่าง



ภาพที่ ก-4 โรตاميเตอร์วัดอัตราการไหลของอากาศ



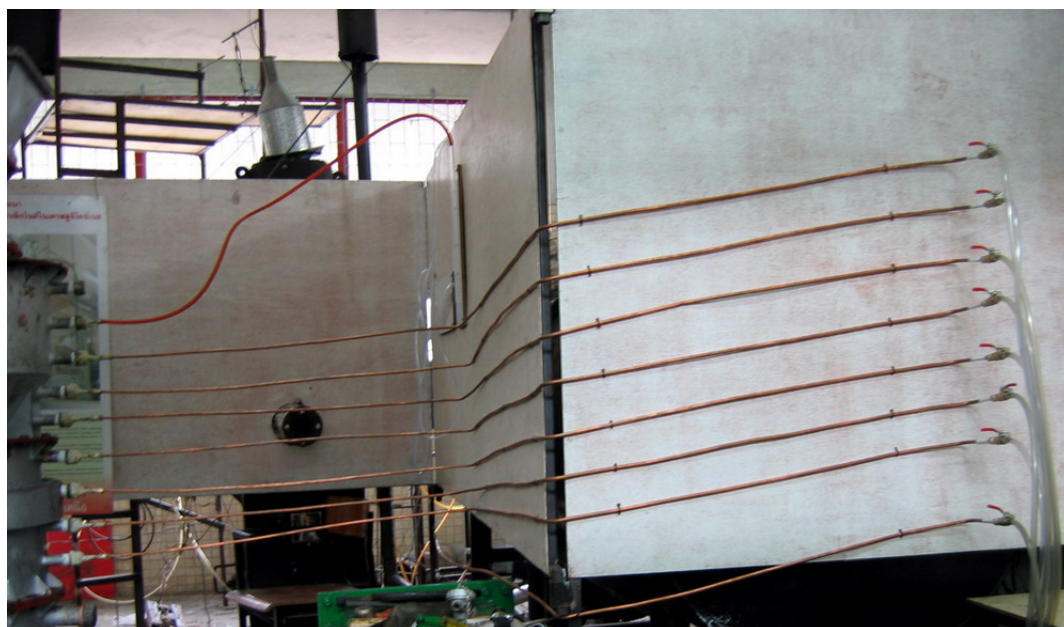
ภาพที่ ก-5 ปิเตอร์ทูปแบบ-S วัดอัตราการไหลก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ทางออก



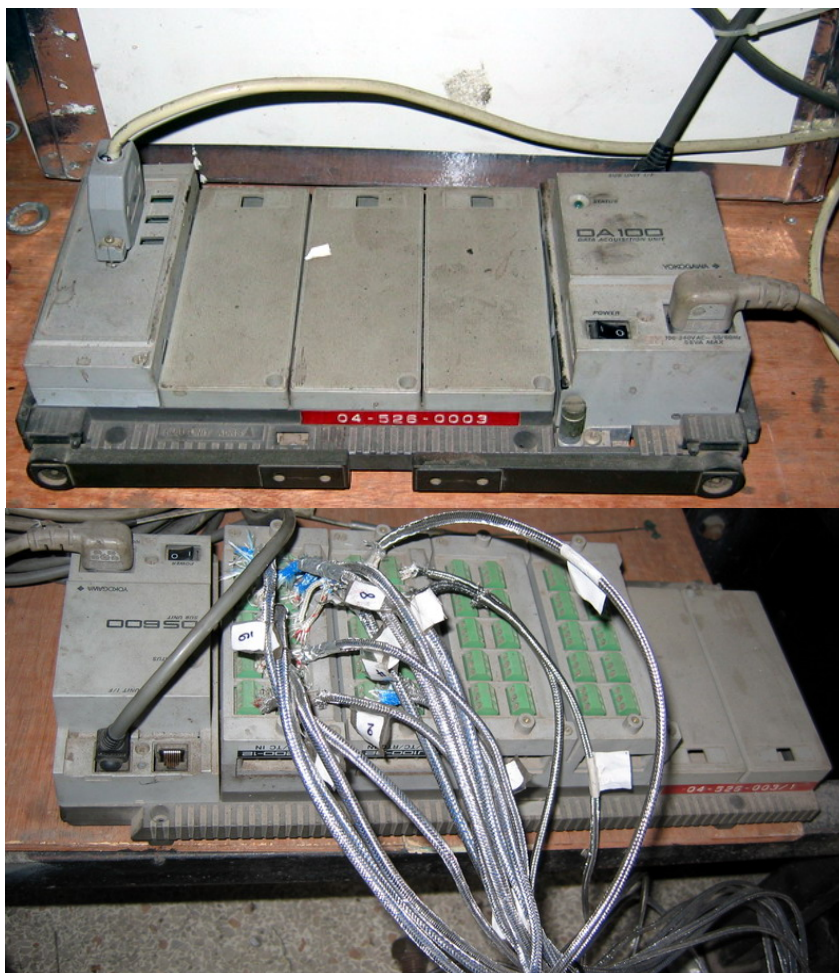
ภาพที่ ก-6 มาโนมิเตอร์แบบท่อเอียง



ภาพที่ ก-7 มาโนมิเตอร์รูปตัวยู



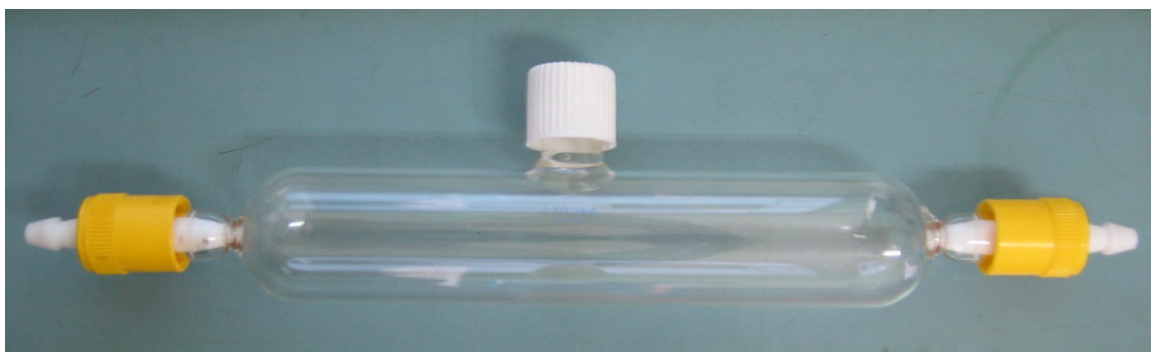
ภาพที่ ก-8 ท่อเก็บก๊าซตัวอย่างและท่อวัดความดันภายในระบบ



ภาพที่ ก-9 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger)



ภาพที่ ก- 10 Gas Chromatography (GASUKURO KOGYO: Model 370)

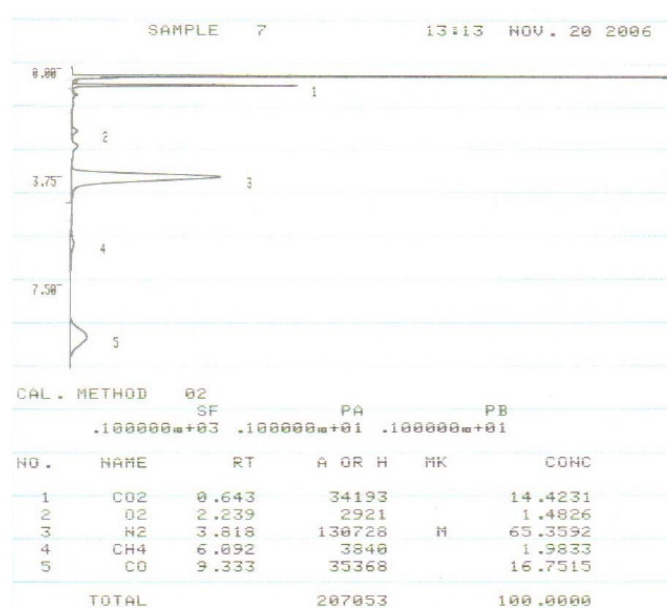


ภาพที่ ก-11 Gas Sample Bulb

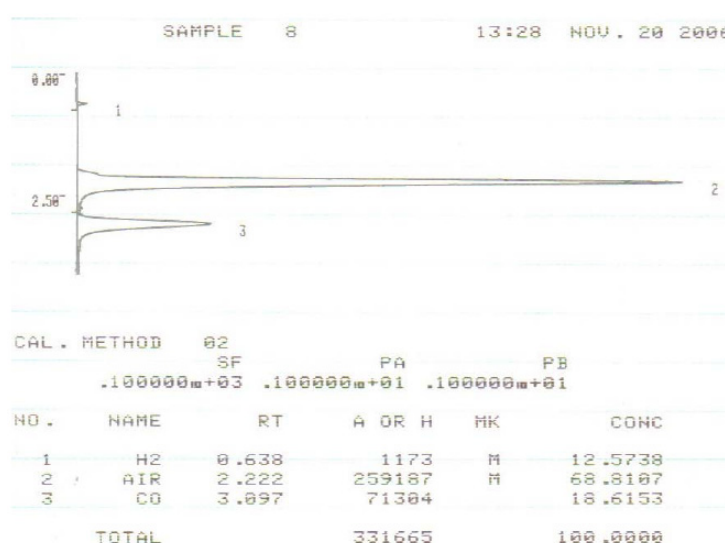
ภาคผนวก ข

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงและค่าความร้อนค่าสูงกรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 350 L/min. โดยเก็บก๊าซเชื้อเพลิงตัวอย่างที่ท่อทางออกของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จากนั้นนำตัวอย่างที่เก็บไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง ดังแสดงในภาพที่ ข-1 และ ข-2 ตารางที่ ข-1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงและค่าความร้อนค่าสูง ซึ่งคำนวณได้จากค่าความร้อนค่าสูงของก๊าซองค์ประกอบ



ภาพที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงใน Polapax N column



ภาพที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงใน Unibead column

ตารางที่ ข-1 ตัวอย่างองค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง

Gas components	Column 1	Column 2	Composition (%)	HHV (MJ/Nm ³)
CO ₂	14.17		14.17	
O ₂	2.10		2.10	
N ₂	64.31	58.05	45.85	
CH ₄	1.88		1.88	0.68
CO	17.54	29.44	23.49	2.72
H ₂		12.51	12.51	1.46
Total	100.00	100.00	100.00	4.87

ค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง คำนวณจากค่าความร้อนค่าสูงขององค์ประกอบก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งอ้างอิงที่สภาวะปกติ 25°C ความดัน 1 บรรยากาศ โดยมีค่าเท่ากับ 285,840 kJ/kmol สำหรับก๊าซไฮโดรเจน, 282,990 kJ/kmol สำหรับ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และ 890,360 kJ/kmol สำหรับ ก๊าซมีเทน[9]

ตารางที่ ข-2 องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงทั้ง 5 กรณี

Volumetric Air Flow Rate (L/min)	Gas Composition % by Volume						HHV
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	MJ/Nm ³ dry gas
250	15.57	9.98	1.73	14.79	1.66	56.27	3.60
300	14.89	14.39	1.98	14.95	1.41	52.39	4.13
350	19.99	10.34	1.73	15.12	1.62	51.20	4.15
400	14.04	9.16	1.59	14.67	2.15	58.40	3.27
450	15.52	8.88	1.76	14.09	1.35	58.41	3.47

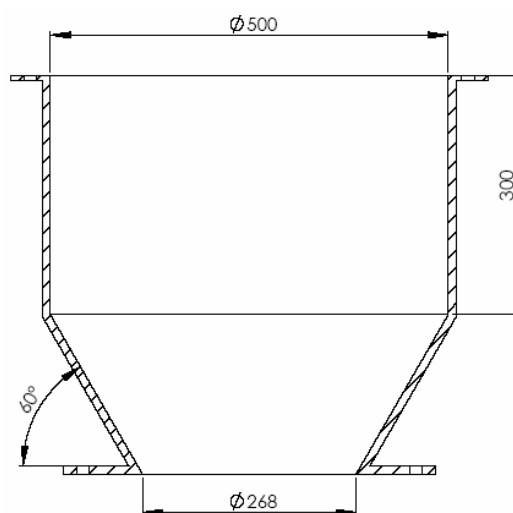
ภาคผนวก ค

สรุปการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

Wood Bulk Density 546.63 kg/m³
 Ash Density 760 kg/m³
 (Characteristics of Wood ASH/OPC Concrete M. Abdullahi)
 Wood Consumption 10 kg/hr

Pyrolysis Zone

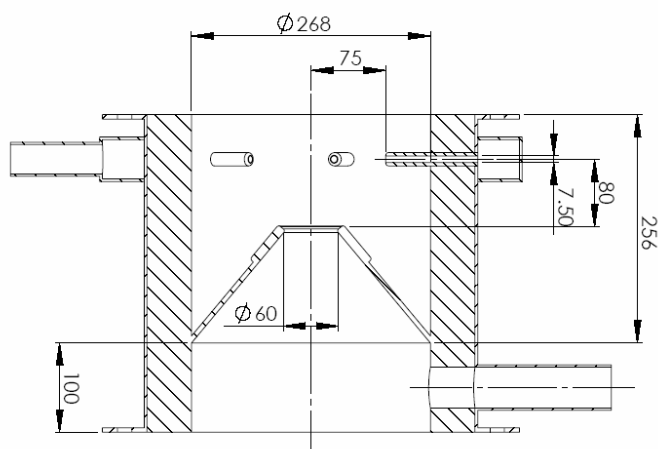
Pyrolysis Chamber 0.054 m³/hr
 Designed Volume Pyrolysis Chamber 0.083 m³



ภาพที่ ค-1 ห้องกลั่นสลาย

Gasification Zone

Gasification Chamber
 Designed 14 kg/h
 (Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System)

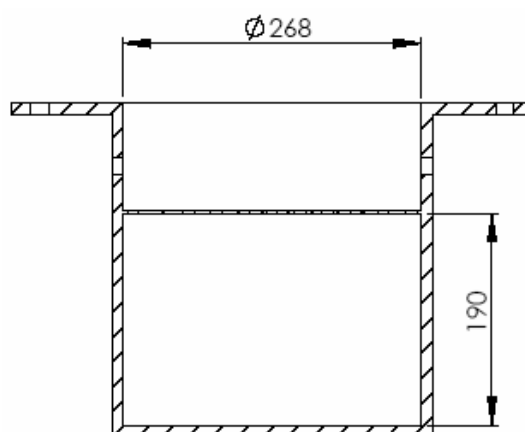


ภาพที่ ค-2 ห้องเผาไหม้

Ash Zone

Ash Chamber
Designed Volume

0.013 m³/hr
0.043 m³



ภาพที่ ค-3 ห้องถ่ายเถ้า

ตารางที่ ค-1 การออกแบบ Imbert Nozzle และ Heart Chamber Diameters[3]

dr/dh	dh	dr	dr'	h	H	R	A	dm	Am X 100	dr	h	Range of Gas Output		Maximum Wood Consumption	Air Blast Vvelocity
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	No.	mm	Ah	dh	dh	max (Nm3/h)	min (Nm3/h)	kg/h	Vm (m/s)
268/60	60	268	150	80	256	100	5	7.5	7.8	4.5	1.33	30	4	14	22.4
268/80	80	268	176	95	256	100	5	9	6.4	3.3	1.19	44	5	21	23
268/100	100	268	202	100	256	100	5	10.5	5.5	2.7	1	63	8	30	24.2
268/120	120	268	216	110	256	100	5	12	5	2.2	0.92	90	12	42	26
300/100	100	300	208	100	275	115	5	10.5	5.5	3	1	77	10	36	29.4
300/115	115	300	228	105	275	115	5	11.5	5	2.6	0.92	95	12	45	30.3
300/130	130	300	248	110	275	115	5	12.5	4.6	2.3	0.85	115	15	55	31.5
300/150	150	300	258	120	275	115	5	14	4.4	2	0.8	140	18	67	30
400/130	130	400	258	110	370	155	7	10.5	4.6	3.1	0.85	120	17	57	32.6
400/150	135	400	258	120	370	155	7	12	4.5	2.7	0.8	150	21	71	32.6
400/175	175	400	308	130	370	155	7	13.5	4.2	2.3	0.74	190	26	90	31.4
400/200	200	400	318	145	370	153	7	16	3.9	2	0.73	230	33	110	31.2

Valuables not given in figure are defined as follows:

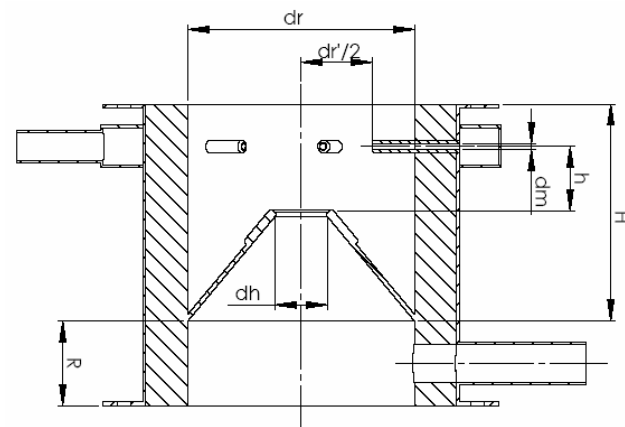
d_m = inner diameter of the tuyere

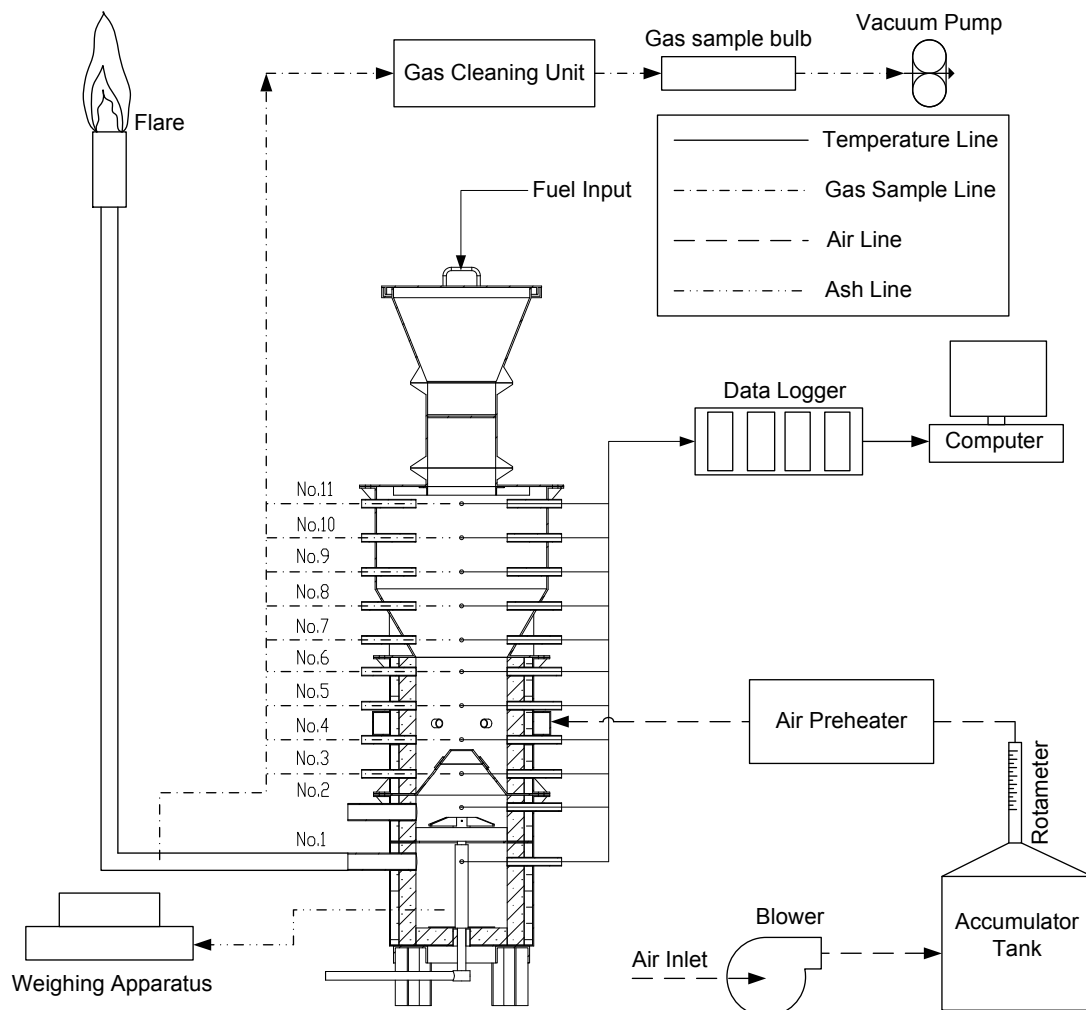
A_m = sum of cross sectional areas of the air jet openings in the tuyeres

Ah = cross sectional area of the throat

A = number of tuyeres

Source: Kaupp 1984a. Table5: Fig. 75.





ภาพที่ ค-4 แผนภาพแสดงกระบวนการระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่าง การคำนวณสมดุลมวล, ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง, อัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็ง และ Hearth Load

สมดุลมวล

คำนวณจากสมมุติฐาน ก๊าซไนโตรเจนไม่ทำปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ดังตารางที่ ง-1 ดังนั้นกรณีอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 350 L/min. ก๊าซเชื้อเพลิงจะมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 31.87 Nm³/hr

ตารางที่ ง-1 การคำนวณปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

Input		
1. Fuel		
Wood input	12.45	kg/hr
Moisture content (wb)	21.81	%
Dry wood input	9.73	kg/hr
% Nitrogen in wood	0.01	% (kg/kg dry wood)
Nitrogen in wood	3.48E-05	kmol/hr
2. Air		
Ambient temperature	30.00	° C
Pressure	101.35	kPa
Volume flow rate	21.00	m ³ /hr
Mass flow rate = (PV/RT)	24.47	kg/hr
Volume flow rate@NTP= mdRT/P	20.65	Nm ³ /hr
Molar air flow rate (1 kmol= 24.446 Nm ³)	0.84	kmol/hr
Nitrogen in air (79% of air)	0.67	kmol/hr
Total Nitrogen Input	0.67	kmol/hr
Output		
% Nitrogen in Produced Gas	51.20	% (kmol/kmol dry gas)
Produced gas		
Molar gas flow rate =Total Nitrogen Input/(% Nitrogen in Produced Gas/100)	1.30	kmol dry gas/hr
Volume gas flow rate (1 kmol= 24.446 Nm ³)	31.87	Nm ³ /hr

ประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง(Gasification Efficiency)

1. ประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่สภาวะปกติ (Cold Gas Efficiency) คำนวณจาก
สมการ ง-1

$$\text{Cold Gas Efficiency} = \frac{\text{HHV of Produced Gas} \times \text{Volumetric Gas Flow rate}}{\text{HHV of Wood} \times \text{Dry Wood feed rate}} \times 100 \quad (\text{ง-1})$$

2. ประสิทธิภาพเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่สภาวะก๊าซร้อน (Hot Gas Efficiency) คำนวณ
จากสมการ ง-2

$$\text{Cold Gas Efficiency} = \frac{(\text{HHV of Produced Gas} \times \text{Volumetric Gas Flow rate}) + \text{Sensible heat}}{\text{HHV of Wood} \times \text{Dry Wood feed rate}} \times 100 \quad (\text{ง-2})$$

ตารางที่ ง-2 การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

Volumetric Air Flow Rate (L/min)	Energy Input			Energy Output					Hot Gas Efficiency %	Cold Gas Efficiency %
	Dry wood input kg. dry wood/hr	Calorific Value kJ/kg dry wood	Gross Calorific MJ/hr	Dry Producer Gas MJ/Nm ³ dry gas	Calorific Value MJ/Nm ³ dry gas	Gross Calorific MJ/hr	Sensible Heat MJ/hr	Total Energy MJ/hr		
250	9.67	20564.32	198.92	20.70	3.60	74.48	11.65	86.13	43.30	37.44
300	9.13	20564.32	187.75	26.69	4.13	110.15	15.04	125.19	66.68	58.67
350	9.73	20564.32	200.16	31.85	4.15	132.20	17.97	150.17	75.02	66.05
400	10.68	20564.32	219.71	31.92	3.27	104.48	17.96	122.44	55.73	47.55
450	11.58	20564.32	238.16	35.90	3.47	124.76	20.17	144.92	60.85	52.38

การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็ง (Gas Yield)

การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งสามารถคำนวณได้ 2 รูปแบบดังตารางที่
ง-3 และ ง-4

ตารางที่ ง-3 การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งกรณีรวมก๊าซไนโตรเจน

Volumetric Air Flowrate L/min	Gas Output Dry Producer Gas		Wood input Dry wood input kg. dry wood/hr	Gas Yield Nm ³ /kg dry wood
	kmol dry gas/hr	Nm ³ dry gas/hr		
250	0.847	20.703	9.67	2.14
300	1.092	26.687	9.13	2.92
350	1.303	31.854	9.73	3.27
400	1.306	31.917	10.68	2.99
450	1.469	35.901	11.58	3.10

ตารางที่ ง-4 การคำนวณอัตราส่วนก๊าซเชื้อเพลิงต่อเชื้อเพลิงแข็งกรณีไม่รวมก๊าซไนโตรเจน

Volumetric Air Flowrate L/min	Total N2 in Produced Gas kmol/hr	Gas Output Dry Producer Gas (free Nitrogen)		Wood input Dry wood input kg. dry wood/hr	Gas Yield Free N2 Nm ³ /kg dry wood
		kmol dry gas/hr	Nm ³ dry gas/hr		
250	0.48	0.37	9.05	9.67	0.94
300	0.57	0.52	12.71	9.13	1.39
350	0.67	0.64	15.54	9.73	1.60
400	0.76	0.54	13.28	10.68	1.24
450	0.86	0.61	14.93	11.58	1.29

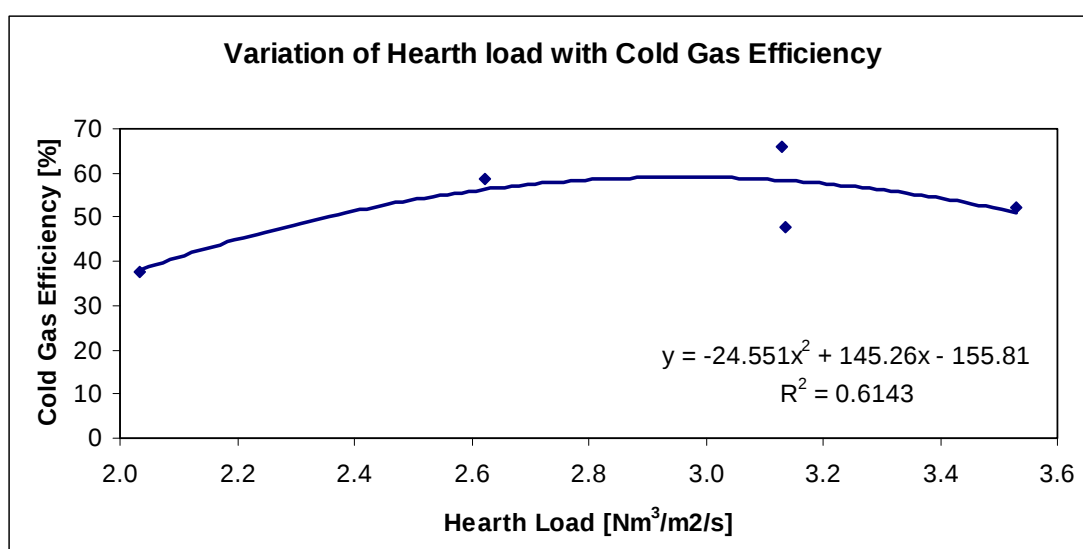
การคำนวณ Hearth Load

ค่า Hearth Load หาสมการได้จากสมการ ง-3 และค่าที่คำนวณได้จะแสดงในตารางที่ ง-5

$$\text{Hearth Load} = \text{Volumetric Gas Flow rate/Throat Area} \quad (\text{ง-3})$$

ตารางที่ ง-5 แสดงค่า Hearth Load ทั้ง 5 กรณี

	Volumetric Air flow rate (L/min.)					
	250.00	300.00	350.00	400.00	450.00	
Area Throat	2.83E-03	2.83E-03	2.83E-03	2.83E-03	2.83E-03	m ²
Volumetric Gas flow rate	20.70	26.69	31.85	31.92	35.90	Nm ³ /hr
Hearth Load	0.73	0.94	1.13	1.13	1.27	Nm ³ /cm ² /hr
	2.03	2.62	3.13	3.14	3.53	Nm ³ /m ² /hr



ภาพที่ ง-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและ Hearth Load

จากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและ Hearth Load จะได้สมการเชิงคณิตศาสตร์ดังสมการที่ ง-4

$$y = -24.551x^2 + 145.26x - 155.81 \quad (\text{ง-4})$$

โดยที่ y = ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

x = Hearth Load

จากการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดเหมาะสมสำหรับ Hearth Load โดยเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง พบว่าที่จุดเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง มีค่า Hearth Load เท่ากับ $2.96 \text{ Nm}^3/\text{m}^2/\text{s}$

การขยายขนาดของเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง จะอ้างอิงค่า Hearth Load เพื่อออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอด ซึ่งต้องทราบปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยเชื้อเพลิงไม้ 1 กิโลกรัมแห้งจะเกิดก๊าซเชื้อเพลิง 2.5 Nm^3 [10] ดังนั้นหากต้องการออกแบบเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลลง ขนาด 50 kg/hr จะผลิตก๊าซเชื้อเพลิงได้ $125 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ และจะคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดเท่ากับ 122 mm .

ภาคผนวก จ

เอกสารตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ



PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007, Phuket May10-11, 2007
Prince of Songkla University, Faculty of Engineering
 Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112

An Experimental investigation of a 15 kg/hr Downdraft Biomass Gasifier for Power Generation

Nimit Nipattamakul, Suthum Patumsawad and Somrat Kerdsuwan

The Waste Incineration Research Centre (WIRC), Department of Mechanical Engineering
 Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
 Bangkok, Thailand 10800

*Authors to correspondence should be addressed via email: srk@kmitnb.ac.th

Abstract: Energy can be harnessed from biomass by two processes namely biological and thermochemical processes. The former includes anaerobic digestion to biogas and fermentation of biomass to liquid alcohol fuel, which the later consists of combustion, pyrolysis, gasification and liquefaction. Among all thermochemical processes, the gasification deserves extensive attention because it helps in solving disposal problems, reducing environmental pollution and producing combustible fuel gas for thermal and power generation applications. This paper discusses the current work being done at The Waste Incineration Research Centre (WIRC). The main objective of our work is to integrate gasifier and engine system for power generation. A 15 kg/hr of biomass batch type has been designed, fabricated and operated on wood chips for evaluating its performance and expected to generate electricity power of about 10 kW. The performance of the gasifier is evaluated in terms of measures determined from the gas composition, material balance data and other measurements. The dry gas composition give one measure of gasifier performance and from it the calorific value of dry gas is calculated from the standard heat of combustion of the combustible components. The gas, char and tar give other measures of gasifier performance. These are calculated on the basis unit mass of dry feed to eliminate the influence of moisture variation. The cold gas efficiency is calculated as the ratio of calorific value of gas produced from 1 kg dry wood chips to the calorific value of 1 kg of dry wood chips. This quantity represented the fraction of energy content of the feed that is converted to combustible gas. The results obtained has been reported and discussed in this paper.

Key Words: Biomass, Gasification, Downdraft, Performance Evaluation

1. INTRODUCTION

Fixed-bed downdraft gasifiers have been developed and used widespread, especially in India and China. This

technology is suitable for small-scale application, i.e. < 1 MW. Its configuration has led to the key advantage of minimal tar contamination in the product gas compared to other types and therefore extensive gas cleaning is not needed. However, the drawback of this type of gasifier is the high moisture limit of the biomass feedstocks used and the reaction highly sensitive to the properties of the feedstocks.

Therefore, an intensive investigation has been carried out using a lab-scale downdraft gasifier constructed in this study to test a variety of biomass and wastes available in Thailand. The gasifier was initially run on a batch mode and has a designed capacity of about 30 kg feed per batch. In the preliminary tests, wood chips were used. The temperatures and gas compositions along the height of the gasifier have been measured.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Sample

The sample used in the preliminary tests was wood blocks. Wood chips were cubic having dimension of 1x1x1 in³. They were composed of 50.28 %C, 1.56 %H, 0.01 %N and 37.68 %O based on dry basis. The average higher heating value (HHV) was about 20,800 kJ/kg (or 4,900 kcal/kg).

2.2. Fixed-bed downdraft gasifier

The fixed-bed downdraft gasifier was designed and constructed in this study. The designed internal volume was capable of about 40 kg of feed. The schematic diagram of the gasifier is shown in Fig.1. A series of K-type thermocouples and ports for gas sampling were positioned along the height of the gasifier to observe the reaction mechanisms.

2.3. Measurement of gas composition

Gas was sampled and stored in the gas bag. Analysis of the gas compositions were conducted in a gas

chromatography with thermoconductivity detector (GC-TCD). The separation columns used were Polapax N column for CO, CO₂, N₂, O₂ and CH₄ and Unibead column for H₂, O₂, N₂, CO.

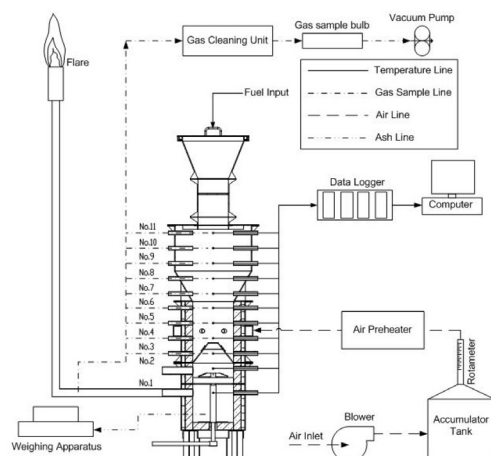


Fig.1 Downdraft fixed-bed gasifier

3. RESULTS AND DISCUSSION

Preliminary experiments have been conducted. The air flow rate and wood input used are given in Table 1.

Table 1 Air flow rate and wood input

Air inlet [L/min]	Wood input [kg]	Moisture content [% wb]	Dry Wood input [kg]
250.00	25.00	15.52	21.12
300.00	25.00	17.83	20.54
350.00	25.00	21.81	19.55
400.00	25.00	18.44	20.39
450.00	25.00	18.93	20.27

From the analysis results, the gas sampled at the exit consists of 14-15%CO₂, 1-2%O₂, 51-59% N₂, 1.5-2% CH₄, 14-20% CO and 9-14% H₂ as shown in Table 2.

Table 2 Gas composition at different air flow rate

Volumetric Air Flow Rate (L/min)	Gas Composition % by Volume					
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂
250	15.57	9.98	1.73	14.79	1.66	56.27
300	14.89	14.39	1.98	14.95	1.41	52.39
350	19.99	10.34	1.73	15.12	1.62	51.20
400	14.04	9.16	1.59	14.67	2.15	58.40
450	15.52	8.88	1.76	14.09	1.35	58.41

The effects of air flow rate on temperature distribution at different reaction zones and on heating value of produced gas are shown in Fig. 2.

From temperature distribution along the reactor height, it can roughly indicate the reaction zones; drying zone, devolatilisation zone, combustion zone and reduction zone. The drying zone occurs at 70 c.m. and higher above the grating and at temperature less than 200°C. The devolatilisation zone is in between 60-70 c.m. above the grating and at temperature in the range of 200-700°C. The combustion zone occurs at 40-50 c.m. above the grating while the reduction zone is at 20-40

c.m. and at the temperature of 700-1000°C and 600-900°C, respectively.

From Fig. 2, it can be seen that the heating value of producer gas increases as air flow rate increases starting at air flow rate of 250 LPM. The heating value increases to reach the maximum point and then decreases while air flow rate still increases. It can be said that the optimal condition to get the highest heating value of producer gas is at the air flow rate in the range of 300-350 LPM.

Fig. 2 The effect of air flow rate

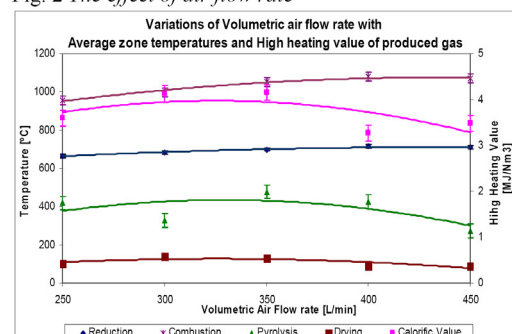


Fig. 3 shows the effect of air flow rate on gas production rate. As the air flow rate increases, the gas production rate increases from 20 Nm³/hr to 35 Nm³/hr. It implies that the higher air flow rate input, the higher gas flow rate output. To eliminate the effect of N₂ in producer gas which does not contribute to heating value of the producer gas, the gas yield as Nm³ per kg of wood input was calculated as shown in Fig 4. The highest gas yield occurs at the air flow rate of 350 LPM which is explained to the highest heating value of producer gas at this point.

Fig. 3. The variation of gas production rate

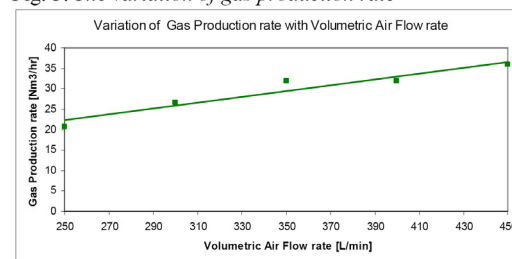


Fig. 4 The variation of gas yield

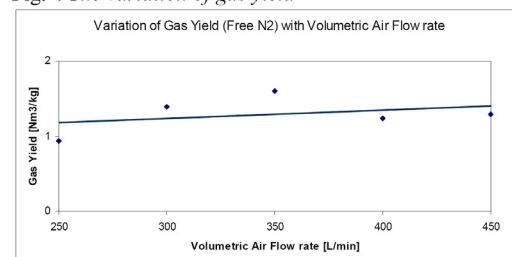
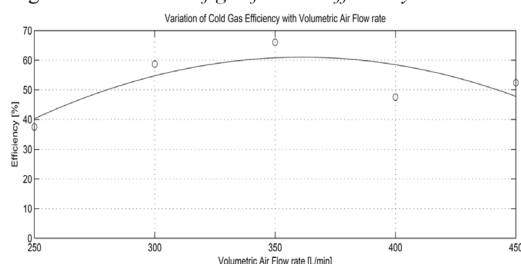


Fig. 5 shows that as the air flow rate increases, the gasification efficiency increases due to the heating value of the producer gas increases. When the heating value reaches the maximum value at the air flow rate of 350 LPM, approximately, the efficiency also is at the maximum point. After that, the efficiency decreases while the air flow rate still increases due to the decrease of heating value of producer gas.

Fig. 5 The variation of gasification efficiency



4. CONCLUSION

An experimental investigation has been carried out using a lab-scale downdraft gasifier constructed for this study. The gasifier was initially run on a batch mode and has a designed capacity of about 30 kg feed per batch. In the preliminary tests, wood chips were used. The temperatures and gas compositions along the height of the gasifier have been measured. Despite the temperature fluctuation, some observation could be made. Results of this preliminary study will be used for further study of biomass and waste gasification by down-draft gasifier for power production.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their grateful to the Waste Incineration Research Center (WIRC), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, as well as The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE) for the facilities support. Also, National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), The Ministry of Science and Technology (MOST) for financial support.

6. REFERENCE

- [1] Adnan Midilli, Murat Dogru, Colin R. Howarth, Mike J. Ling and Teoman Ayhan, Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier, *Energy Conversion and Management*, Volume 42, Issue 2, January 2001, Pages 157-172.
- [2] Murat Dogru, Adnan Midilli and Colin R. Howarth, Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis, *Fuel Processing Technology*, Volume 75, Issue 1, 18 January 2002, Pages 55-82.
- [3] Adnan Midilli, Murat Dogru, Galip Akay and Colin R. Howarth, Hydrogen production from hazelnut shell by applying air-blown downdraft gasification technique, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 26, Issue 1, January 2001, Pages 29-37.
- [4] Z.A. Zainal, Ali Rifau, G.A. Quadir, K.N. Seetharamu, Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier, *Biomass and Bioenergy*, Volume 23, 2002, pages 283 – 289.

DEVELOPMENT OF A 15 KG/HR DOWNDRAFT BIOMASS GASIFIER FOR POWER GENERATION

S. PATUMSAWAD, N. NIPATTAMAKUL AND S. KERDSUWAN

The Waste Incineration Research Centre (WIRC), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand 10800

SUMMARY: Energy can be harnessed from biomass by two processes namely biological and thermochemical processes. The former includes anaerobic digestion to biogas and fermentation of biomass to liquid alcohol fuel, which the later consists of combustion, pyrolysis, gasification and liquefaction. Among all thermochemical processes, the gasification deserves extensive attention because it helps in solving disposal problems, reducing environmental pollution and producing combustible fuel gas for thermal and power generation applications. This paper discusses the current work being done at The Waste Incineration Research Centre (WIRC). The main objective of our work is to integrate gasifier and engine system for power generation. A 15 kg/hr of biomass batch type has been designed, fabricated and operated on wood chips for evaluating its performance and expected to generate electricity power of about 10 kW. The performance of the gasifier is evaluated in terms of measures determined from the gas composition, material balance data and other measurements. The dry gas composition give one measure of gasifier performance and from it the calorific value of dry gas is calculated from the standard heat of combustion of the combustible components. The gas, char and tar give other measures of gasifier performance. These are calculated on the basis unit mass of dry feed to eliminate the influence of moisture variation. The cold gas efficiency is calculated as the ratio of calorific value of gas produced from 1 kg dry wood chips to the calorific value of 1 kg of dry wood chips. This quantity represented the fraction of energy content of the feed that is converted to combustible gas. The results obtained has been reported and discussed in this paper.

KEY WORDS : Biomass, Gasification, Downdraft, Performance Evaluation

1. INTRODUCTION

Gasification is an attractive technology due to its combined advantages of producing less emission, compared to conventional combustion, and potential for high efficiency for power generation. Gasification has also been found to be good biomass-to-energy options in term of system size flexibility. Gasification systems are in a range from as small as 20-100 kW for producing LPG substituted fuel gas or electrical power in rural areas, to 50-100 MWe large-scale power plants. Since one of the disadvantages of biomass is its geographical dispersion, transportation of naturally low bulk density can add considerable cost for operation of a large-scale biomass power plant. Distributed generation employing small-scale units is an alternative.

*Proceedings Venice 2006, Biomass and Waste to Energy Symposium
Venice, Italy, 29 November – 1 December 2006
© 2006 by CISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy*

Fixed-bed downdraft gasifiers have been developed and used widespread, especially in India and China. This technology is suitable for small-scale application, i.e. < 1 MW. Its configuration has led to the key advantage of minimal tar contamination in the product gas compared to other types and therefore extensive gas cleaning is not needed. However, the drawback of this type of gasifier is the high moisture limit of the biomass feedstocks used and the reaction highly sensitive to the properties of the feedstocks.

The knowledge of reaction zones inside a fixed-bed gasifier is well established. As shown in Figure 1., biomass is first pyrolysed to form char and volatiles. As they descend, high-temperature (i.e. as high as 1200°C) partial combustion takes place in the combustion zone where air is admitted. The combustion reactions provide heat for drying, pyrolysis and reducing reactions. The remaining char and volatiles are further gasified in the reduction zone before the product gas leaves the gasifier and the unburned carbon and ash are collected at the bottom.

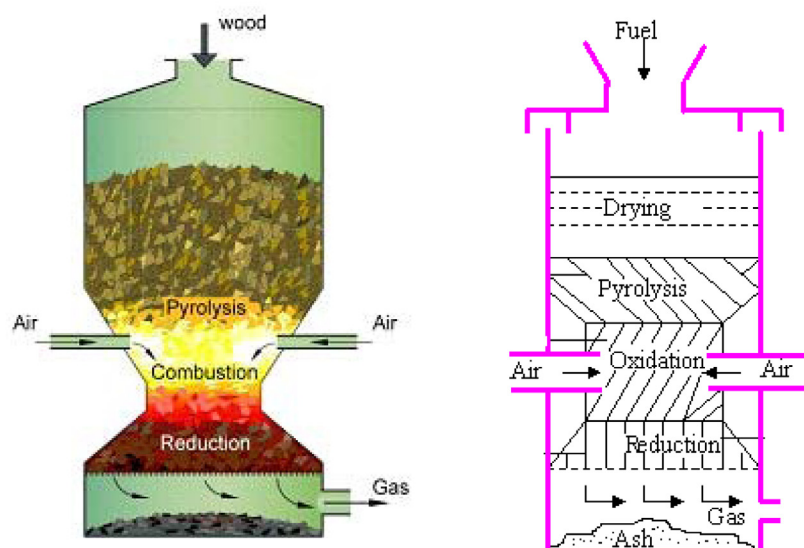


Figure 1. Diagram of a fixed-bed downdraft gasifier

Therefore, an intensive investigation has been carried out using a lab-scale downdraft gasifier constructed in this study to test a variety of biomass and wastes available in Thailand. The gasifier was initially run on a batch mode and has a designed capacity of about 30 kg feed per batch. In the preliminary tests, wood blocks were used. The temperatures and gas compositions along the height of the gasifier have been measured.

2. EXPERIMENTAL

2.1 Sample

The sample used in the preliminary tests was wood blocks. Wood blocks were cubic having dimension of 1x1x1 in³. They were composed of 50.28 %C, 1.56 %H, 0.01 %N and 37.68 %O based on dry basis. The average higher heating value (HHV) was about 20,800 kJ/kg (or 4,900

kcal/kg).

2.2 Fixed-bed downdraft gasifier

The fixed-bed downdraft gasifier was designed and constructed in this study. The designed internal volume was capable of about 40 kg of feed. The schematic diagram of the gasifier is shown in Figure 2. A series of K-type thermocouples and ports for gas sampling were positioned along the height of the gasifier to observe the reaction mechanisms.

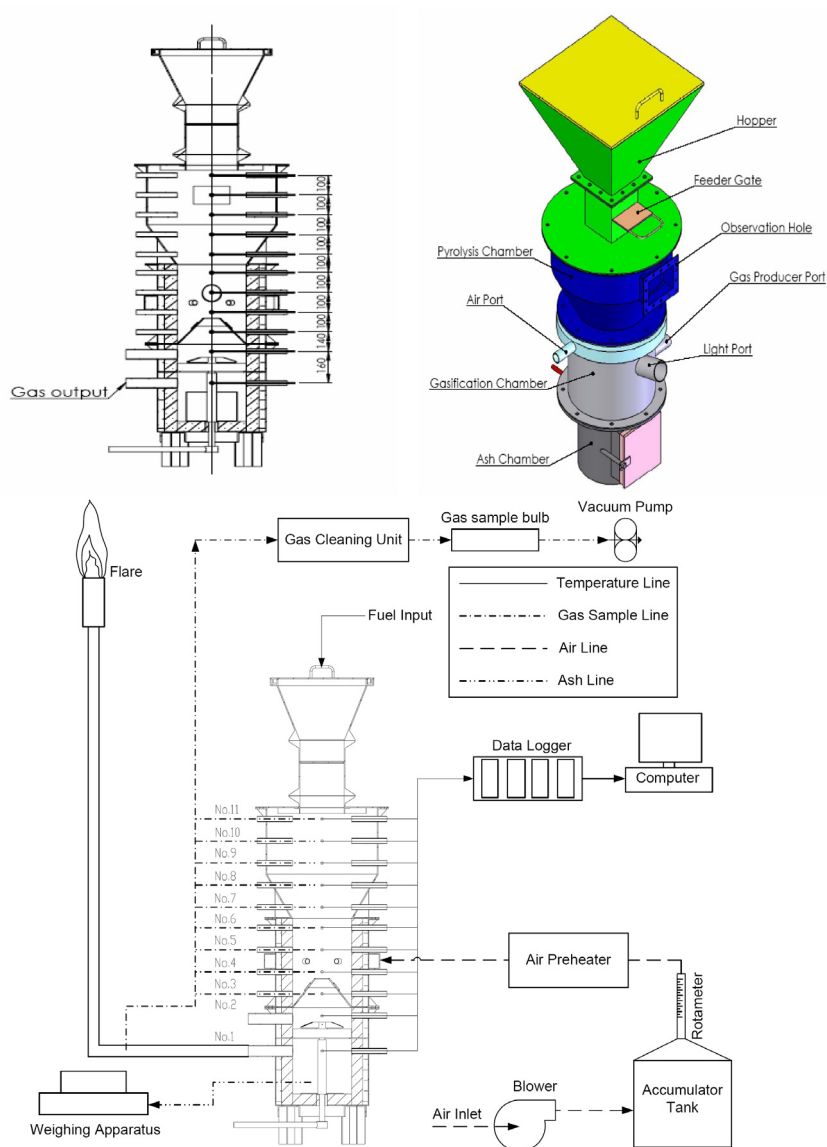


Figure 2. Schematic diagram of the downdraft fixed-bed gasifier

2.3 Measurement of gas composition

Gas was sampled and stored in the gas bag. Analysis of the gas compositions were conducted in a gas chromatography with thermoconductivity detector (GC-TCD). The separation columns used were Polapax N column for CO, CO₂, N₂, O₂ and CH₄ and Unibead column for H₂, O₂, N₂, CO.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The performance of the gasifier was evaluated in terms of variety of measure determined from the gas composition, material balance data and other measurements. The dry gas composition gave one measure of gasifier performance and from it the calorific value of dry gas was calculated from the standard heat of combustion of the combustible components. The gas and char gave other measures of gasifier performance. These were calculated on the basis of unit mass of dry feed to eliminate the influence of moisture variation. Char yield was expressed as kg of char/kg of dry wood chips and gas yield was expressed on a volumetric basis as m³/kg of dry wood chips. The cold gas efficiency was calculated as the ratio of calorific value of gas produced from 1 kg dry wood chips to the calorific value of 1 kg of dry wood chips. This quantity represented the fraction of energy content of the feed that was converted to combustible gas.

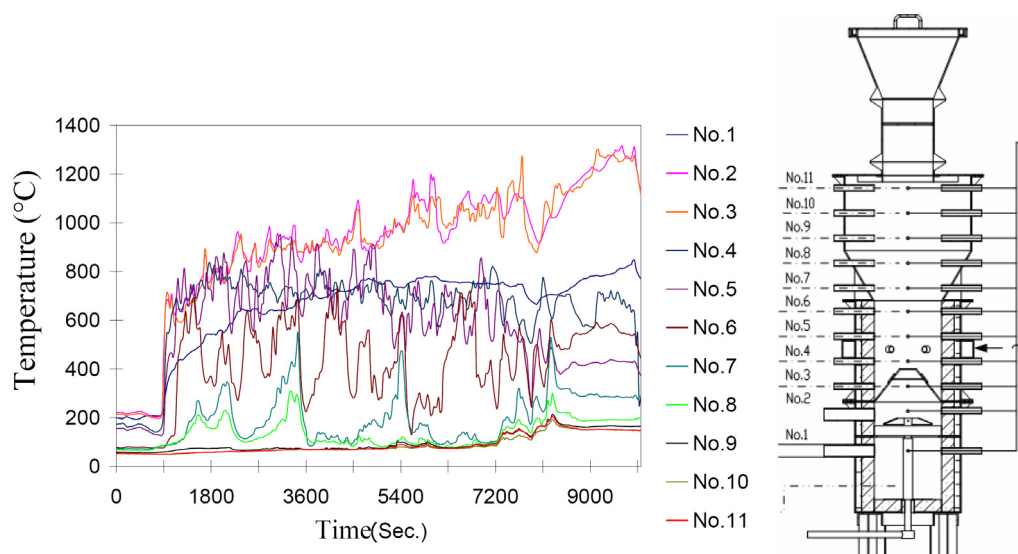


Figure 4. Evolution of Temperature at difference positions along the height of reactor

The preliminary experiments have been conducted. Temperature fluctuation could be observed, which is thought to be due to bridging and collapsing of fuels. During the operation of gasifier, after steady state is reached (as evident from constant propagation of flame) the samples were collected and gas composition and heating value were determined. The result shows that the concentration of CO, H₂, CH₄, CO₂, O₂ and N₂ are in the range of 17-20%, 12-16%, 2-3%, 12-14%, 1-3% and 47-53%, respectively. The calorific value varies between 4-6 MJ/Nm³ and cold gas efficiency in the range of 51-57%.

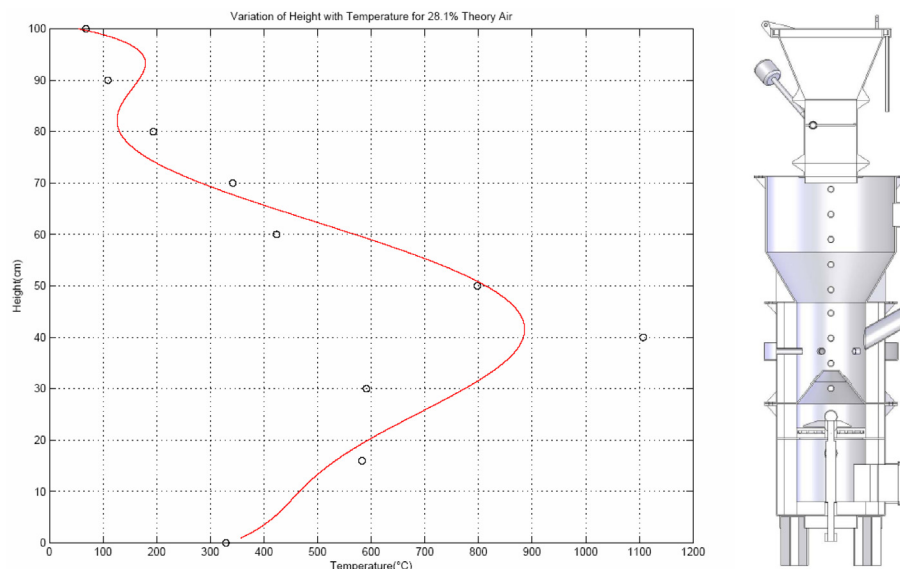


Figure 5. Temperature distribution along the height of reactor

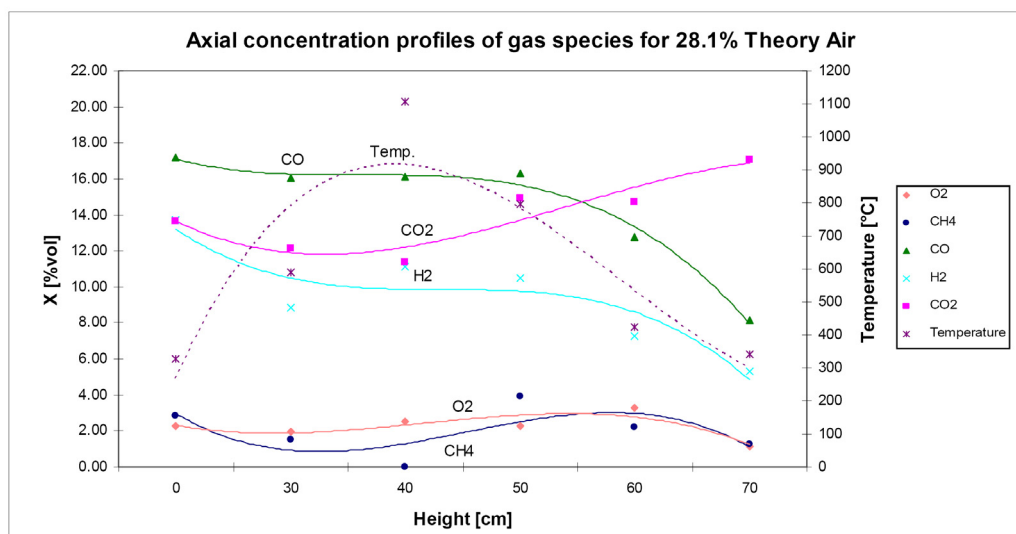


Figure 6. Variation of Gas Composition along the height of reactor

The results of the work indicate that the performance of the gasifier is remarkably consistent over a wide range of operating conditions. Future extension of the work includes the catalytic gasification of biomass to synthesis gas and upgrading of producer gas to methane/methanol via catalytic processes. Producer gas being toxic due to the presence of CO, is not recommended for domestic use for cooking and, therefore, major applications are in thermal heating and electrical power generation. However, attempts are being proposed to upgrade this gas to pipe line quality methane rich gas or the liquid methanol fuel via Fischer-Tropsch process.

4. CONCLUSIONS

A 15 kg/h capacity batch type down draft gasifier system has been designed, fabricated and operated for its performance evaluation. The performance of the system has been evaluated in term of mass and energy balance. The results obtained have been reported and discussed. The gasifier efficiency has been calculated as 51-57%.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their grateful to the Waste Incineration Research Center (WIRC), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, as well as The Joint Graduate School of Energy and Environment (JGSEE) for the facilities support. Also, National Metal and Materials Technology Center (MTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), The Ministry of Science and Technology (MOST) for financial support.

REFERENCES

- Cao Y., Wang Y., Riley J. T. and Pan W. P., A novel biomass air gasification process for producing tar-free higher heating value fuel gas, *Fuel Processing Technology*, Volume 87, Issue 4, April 2006, Pages 343-353
- Dasappa S., Sridhar H. V. , Sridhar G., Paul P. J. and Mukunda H. S., Biomass gasification—a substitute to fossil fuel for heat application, *Biomass and Bioenergy*, Volume 25, Issue 6, December 2003, Pages 637-649
- Dupont C., Boissonnet G., Seiler J. M., Gauthier P. and Schweich D., Study about the kinetic processes of biomass steam gasification, *Fuel*, Corrected Proof, Available online 21 July 2006
- Erlich C., Björnbom E., Bolado D., Giner M. and Fransson T. H., Pyrolysis and gasification of pellets from sugar cane bagasse and wood, *Fuel*, Volume 85, Issues 10-11, July-August 2006, Pages 1535-1540
- Hanaoka T., Inoue S., Uno S., Ogi T. and Minowa T., Effect of woody biomass components on air-steam gasification, *Biomass and Bioenergy*, Volume 28, Issue 1, January 2005, Pages 69-76
- Henriksen U. , Ahrenfeldt J., Jensen J. K. , Gøbel B., Bentzen J. D. , Claus Hindsgaul and Lasse Holst Sørensen, The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier , *Energy*, Volume 31, Issues 10-11, August 2006, Pages 1542-1553
- Mermoud F., Salvador S., Steene L. and Golfier F., Influence of the pyrolysis heating rate on the steam gasification rate of large wood char particles, *Fuel*, Volume 85, Issues 10-11, July-August 2006, Pages 1473-1482
- Yang W., Ponzio A., Lucas C. and Blasiak W., Performance analysis of a fixed-bed biomass gasifier using high-temperature air, *Fuel Processing Technology*, Volume 87, Issue 3, February 2006, Pages 235-245
- Yoshikawa K. , R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels, *Energy*, Volume 31, Issues 10-11, August 2006, Pages 1656-1665

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายนิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะมูลฝอย
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว

เกิดวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2525 ที่อยู่ 134 หมู่ 3 ต.สวนกล้วย อำเภอ บ้านโป่ง
 จังหวัด ราชบุรี เป็นบุตรคนที่ 4

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2548