

การวิเคราะห์และทดสอบเตาเผาทำแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิง  
ยางพาราอัดเม็ด

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WOOD PELLET  
GASIFIER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-030-214

การวิเคราะห์และทดสอบเตาเผากำเนิดแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงยางพารา  
อัดเม็ด

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WOOD PELLET  
GASIFIER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-EN-M-030-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WOOD PELLET  
GASIFIER



JUTAMARS JUMNEANSAWAS

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017  
KMITL-2017-EN-M-030-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2017**


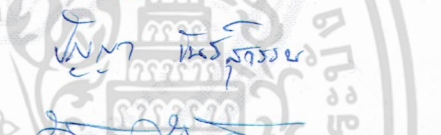


**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์และทดสอบเตาเผาทำแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงยางพาราอัดเม็ด  
Thesis Title Analytical and Experimental Investigation of Wood Pellet Gasifier  
นักศึกษา นางสาวจุฑามาศ จำเนียรสวัสดิ์  
รหัสประจำตัว 55610957  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-030-214

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.บัญชา	คังตระกูล	
รศ.ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	
ผศ.ดร.ปัญญา	จันทร์สุวรรณ	
รศ.ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.สุตาภัทร	แคว้นเขาเม็ง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 12 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และทดสอบเตาเผากำเนิดแก๊สสังเคราะห์จากเชื้อเพลิงยางพาราอัดเม็ด
นักศึกษา	นางสาวจุฑามาศ จำเนียรสวัสดิ์
รหัสประจำตัว	55610957
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์และทดสอบเตาเผากำเนิดแก๊สจากเชื้อเพลิงยางพาราอัดเม็ด ด้วยเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น เพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และอุณหภูมิภายในเตาเผาของขั้นตอนการเผาไหม้ (Combustion zone) ขั้นตอนรีดักชัน (Reduction zone) ขั้นตอนการกลั่นสลาย (Pyrolysis zone) และขั้นตอนการอบแห้ง (Drying zone) เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น (Updraft gasifier) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 มิลลิเมตร สูง 600 มิลลิเมตร หุ้มด้วยฉนวนเซรามิกไฟเบอร์หนา 2 เซนติเมตร ในการทดลองแต่ละครั้งใช้เชื้อเพลิงยางพาราอัดเม็ด 4.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง โดยมีการป้อนอัตราการไหลอากาศ 3 ระดับ คือ 90, 120, และ 150 ลิตรต่อนาที วัดค่าองค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (Fuel Gas Analyzer Model Testo รุ่น 350-XL) จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตรต่อนาที ให้ค่าองค์ประกอบของแก๊ส H<sub>2</sub> สูงสุดที่ 17.73% CO สูงสุดที่ 24.36% CO<sub>2</sub> สูงสุดที่ 11.13% NO สูงสุดที่ 0.048% NO<sub>x</sub> สูงสุดที่ 0.050% และอุณหภูมิที่โซนการเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 1274 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	Analytical and Experimental Investigation of Wood Pellet Gasifier
<b>Student</b>	Miss.Jutamars Jumneansawas
<b>Student ID.</b>	55610957
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Sutapat Kwankaomeng

### ABSTRACT

This thesis presents the analytical and experimental investigation of an updraft gasifier using rubber wood pellet as fuel. In order to study combustion characteristics, the internal temperatures of the updraft gasifier were measured by type K thermocouple instrumented at the combustion, reduction, pyrolysis, and drying zones. The updraft gasifier has diameter of 127 mm and 600 mm height insulated by ceramic fiber with 2 cm thickness. In the experiment, rubber wood pellets were feed at 4.8 kg/hr for each test. Combustions were conducted with variation of air flow rate in three levels consisting of 90, 120, and 150 l/m. Gas compositions were detected by gas analyzer (Testo Model 350-XL). The experimental results showed that the updraft gasifier at air flow rate of 120 l/m provided the highest temperature at the combustion zone of 1274 °C and volumetric gas composition of 17.73% H<sub>2</sub>, 24.36% CO, 0.048% NO, 0.050% NO<sub>x</sub> and 11.13% CO<sub>2</sub>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง และ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และ ประการณที่ตีแก่ข้าพเจ้า จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.สมมาส แก้วล้วน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำหลักการทำงานของเตาเผา แก๊สซิไฟเออร์ตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความรู้, คำแนะนำ และการช่วยเหลือด้านต่างๆ ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณห้องทดลองเครื่องยนต์สเตอร์ลิง (GEER LAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เอื้อเฟื้อสถานที่และ อุปกรณ์ในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยจนสำเร็จลงได้ และขอบคุณสมาชิก GEER LAB ทุกท่านที่ให้ คำแนะนำ, แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นใน การทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อพันศักดิ์ คุณแม่ดวงแข จำเนียรสวัสดิ์ และครอบครัว ที่ให้ กำลังใจ, คำแนะนำ และการสนับสนุนในทุกๆเรื่อง สุดท้ายนี้คุณงามความดีอันใดที่เกิดจาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้กับผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้

จุฬามาศ จำเนียรสวัสดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vi
สารบัญรูป.....	vii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	3
1.4 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 วิธีการดำเนินงาน.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับแก๊สซิฟิเคชัน.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	8
3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	8
3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	8
3.1.2 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.3 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวล.....	11
3.1.4 ถ่านและคุณสมบัติของถ่าน.....	15
3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	16
3.2.1 ปริมาณอากาศที่พอเพียงต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง.....	16
3.2.2 ความปั่นป่วนของอากาศ และแก๊สเผาไหม้.....	17
3.2.3 อุณหภูมิของการเผาไหม้.....	17
3.2.4 เวลาในการเผาไหม้.....	17
3.3 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry).....	18
3.4 หลักการของแก๊สซิฟิเคชัน.....	19
3.4.1 กระบวนการแปลงพลังงานความร้อนจากชีวมวล(Biomass Thermal Conversion Processes).....	22
3.4.2 การเผาไหม้ของชีวมวล(Combustion of Biomass).....	24
3.4.3 ลักษณะทางเคมีของการให้กำเนิดก๊าซจากชีวมวล).....	25
3.4.4 กระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันแบบตรงและแบบอ้อม(Indirect and Direct Gasification Processes).....	26
3.4.5 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดก๊าซแบบตรง.....	27
บทที่ 4 รายการคำนวณและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	30
4.1 การคำนวณหาปริมาตรอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้แบบสมบูรณ์.....	30
4.2 การคำนวณหาปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้.....	32
4.3 การคำนวณหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตา.....	32
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	33
4.4.1 Equilibrium Modeling.....	33
4.4.2 Energy Equation.....	35
บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบ.....	37
5.1 การทดสอบเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันชนิดอากาศไหลขึ้น(Up – Draft Gasifier).....	37
5.1.1. ขอบเขตการทดลอง.....	37
5.1.2. อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสอบ.....	37
5.1.3. ขั้นตอนการทดสอบเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันชนิดอากาศไหลขึ้น.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบของแก๊สของชุดการทดสอบ.....	41
5.2.1 ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหล 90 ลิตรต่อนาที.....	41
5.2.2 ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหล 120 ลิตรต่อนาที.....	42
5.2.3 ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหล 150 ลิตรต่อนาที.....	43
5.3 ผลการทดสอบของชุดการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	58
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
เอกสารอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก.....	63
ภาคผนวก ข.....	68
ภาคผนวก ค.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางแสดงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย.....	11
3.2 ตารางแสดงปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	12
3.3 ตารางแสดงการวิเคราะห์แบบเต็มสำหรับชีวมวลและเชื้อเพลิงแข็ง.....	13
3.4 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของเชื้อเพลิงไม้ยางพารา.....	14
3.5 ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของชีวมวลทั่วไป.....	25
3.6 ตารางแสดงคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซที่ผลิตจากชีวมวล.....	26
4.1 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของเชื้อเพลิงไม้ยางพารา.....	30
5.1 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T1 – T5 (อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที่).....	42
5.2 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของแก๊ส (อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที่).....	42
5.3 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T1 – T5 (อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที่).....	43
5.4 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของแก๊ส (อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที่).....	43
5.5 ตารางแสดงค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T1 – T5 (อัตราการไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที่).....	44
5.6 ตารางแสดงค่าองค์ประกอบของแก๊ส (อัตราการไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที่).....	44
5.7 ตารางแสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิของโซนการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ.....	45
6.1 ตารางแสดงเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของแก๊สที่ 3 อัตราการไหล.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ชีวมวลแกลบ.....9
3.2	ชีวมวลกากอ้อยหรือชานอ้อย.....9
3.3	ชีวมวลเศษไม้ยางพารา.....10
3.4	ชีวมวลซังข้าวโพดและลำต้น.....10
3.5	โชนของปฏิกิริยาต่างๆภายในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ Updraft และแบบ Downdraft.....20
3.6	แผนภาพแสดงสัดส่วนของคาร์บอน, ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง.....23
3.7	เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น.....28
3.8	เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลลง.....29
4.1	กระบวนการคำนวณของ Combustion Zone.....36
5.1	รูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์.....37
5.2	รูปแสดงแผนผังการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์.....38
5.3	รูปอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) รุ่น Omega FL-3940G.....38
5.4	เครื่องวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (Fuel Gas Analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 – XL.....39
5.5	เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ Datalogger รุ่น 505.....39
5.6	เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type K).....40
5.7	เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ใช้ทำการทดสอบ.....40
5.8	แสดงโชนการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้นของการทดลอง.....45
5.9	กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ.....46
5.10	กราฟแสดงอุณหภูมิของ Syngas ที่บริเวณทางออกที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ.....46
5.11	กราฟแสดงปริมาณของ CO และ CO <sub>2</sub> ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ.....47
5.12	กราฟแสดงปริมาณของ H <sub>2</sub> ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ.....48
5.13	กราฟแสดงปริมาณของ NO <sub>x</sub> , NO ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ.....48
5.14	กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโชนการเผาไหม้ต่างๆที่อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที .....48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโซนการเผาไหม้ต่างๆที่อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที่.....	49
5.16 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโซนการเผาไหม้ต่างๆที่อัตราการไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที่.....	50
5.17 แสดงค่าอุณหภูมิของ Combustion Zone เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
5.18 แสดงปริมาณ $H_2$ เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
5.19 แสดงปริมาณ Cold Gas Efficiency เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
5.20 แสดงปริมาณ $H_2$ เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
5.21 แสดงปริมาณ CO เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	54
5.22 แสดงปริมาณ $CO_2$ เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	54
5.23 แสดงปริมาณ $H_2O$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	55
5.24 แสดงปริมาณ $CH_4$ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	55
5.22 แสดงปริมาณ C ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สถานการณ์โลกปัจจุบัน ต้องยอมรับว่าเรากำลังเผชิญกับปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติ ที่ลดน้อยลง อันเกิดจากปัจจัยหลายด้าน ทั้งการเติบโตทางเศรษฐกิจ การบริโภคใช้สอยที่เกินพอดี กล่าวได้ว่า ปัญหาทรัพยากรธรรมชาตินับวันก็ยิ่งทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น และใกล้ตัวเรามากขึ้นทุกขณะ ชัดเจนที่สุดคือวิกฤติพลังงาน ยิ่งใช้สอยทรัพยากรมากอย่างฟุ่มเฟือย ทรัพยากรที่มีอยู่ก็ลดน้อยลง จึงเป็นความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องตื่นตัวกับสถานการณ์ที่เกิดขึ้น และต้องตระหนักถึงการใช้อยู่สอยทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืนเพื่อลูกหลานอีกด้วย ปี 2555 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 14 และเพิ่มขึ้นจากปี 2554 ร้อยละ 3.9 โดยใช้พลังงานเชิงพาณิชย์อันประกอบด้วยน้ำมันสำเร็จรูป แก๊สธรรมชาติ ถ่านหินและไฟฟ้าโดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.1 และใช้พลังงานหมุนเวียนอันประกอบด้วยแสงอาทิตย์ ชีวมวล ชยะและแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 23.7 [1]

จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันการพัฒนาคุณภาพชีวิตและเศรษฐกิจของประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศกำลังพัฒนาที่มีความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากทรัพยากรพลังงานภายในประเทศมีค่อนข้างจำกัดจึงต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศกว่าครึ่งหนึ่งของความต้องการและสัดส่วนการพึ่งพามีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นลำดับ [2]

จากข้อมูลในปี 2554 ที่ผ่านมามีพบว่ากว่าร้อยละ 60 ของความต้องการพลังงานเชิงพาณิชย์ขึ้นต้นมาจากการนำเข้าโดยมีสัดส่วนการนำเข้าน้ำมันสูงถึงร้อยละ 80 ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดภายในประเทศและยังมีแนวโน้มจะสูงขึ้นอีกเพราะไม่สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตปิโตรเลียมในประเทศได้ทันกับความต้องการใช้งาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงในการจัดหาพลังงานในอนาคต [2]

นอกจากนี้ราคาพลังงานก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เป็นภาระต่อผู้ใช้พลังงาน นอกจากนี้ปัญหาด้านพลังงานแล้วประเทศไทยยังต้องเผชิญกับความท้าทายด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานโดยเฉพาะผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอันเนื่องมาจากสภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นผลจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจก และเป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจและเร่งหามาตรการเพื่อควบคุม การพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่นและยังช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าของประเทศ ซึ่งเดิมต้องพึ่งพาแก๊สธรรมชาติเป็นหลักมากกว่าร้อยละ 70 โดยพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดแทนถือเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานเป้าหมายที่คาดว่าจะสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าทดแทน แก๊สธรรมชาติได้อย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลมแบบทุ่งกังหันลม, พลังน้ำขนาดเล็ก, พลังงานชีวมวล, แก๊สชีวภาพและขยะ [2]

ประเทศไทยนับว่าเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตทางการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย เศษไม้ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานได้ สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจาก ผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นชีวมวล [3]

หลังจากที่ประเทศไทยมีการส่งเสริมให้นำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ให้นำกลับมาใช้ใหม่อย่างมีคุณค่าและมีประโยชน์ขึ้นมา ทำให้การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลสามารถแพร่กระจายไปได้ในทุกภูมิภาคทั่วประเทศ ชีวมวลจึงเป็นพลังงานทดแทนที่เหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์แล้ว ยังเป็นการสร้างรายได้แก่เกษตรกรและชุมชนด้วย สำหรับประเทศไทยเทคโนโลยีการเผาไหม้ชีวมวลถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้ความร้อน และมีการรายงานว่าสมรรถนะของโครงการชีวมวลต่างๆมีส่วนช่วยในการผลิตความร้อนได้มากกว่า 4,300 ตันเทียบเท่ากับน้ำมันดิบ ผลิตพลังงานได้เกือบ 2,000 เมกะวัตต์ ในปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทยจึงถือว่าเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีในกลุ่มอาเซียน ทั้งการพัฒนาและการดำเนินงานด้านพลังงานทดแทนอย่างชีวมวลให้เกิดประโยชน์ต่อไปในอนาคต

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองศึกษาผลกระทบของสภาวะการเกิดแก๊ส และความเป็นไปได้ทางกระบวนการของเชื้อเพลิงชีวมวล ตัวแปรของการทำให้เป็นแก๊ส โดยทำการทดลองในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้น ศึกษาผลกระทบของปริมาณอากาศที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผา และองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้นให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล
2. หาค่าองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลและวิเคราะห์ปริมาณอากาศทางทฤษฎีและอุณหภูมิเปลวไฟ
3. ทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลไม่ย่างพาราอัดเม็ต
4. ทดลองหาผลกระทบของปริมาณอากาศ
  - 4.1 วัดอุณหภูมิภายในเตาเผาของ combustion zone, reduction zone, pyrolysis zone และ drying zone
  - 4.2 องค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองของอุณหภูมิเปลวไฟและองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

1. เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปในเตาเผา
2. เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น และค่าองค์ประกอบของแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน
3. ลดการสูญเสียของอุณหภูมิของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ด้วยหุ้มฉนวนรอบๆเตาเผา ซึ่งจะทำให้ได้ค่าองค์ประกอบของแก๊สที่มีค่าสูงขึ้น

### 1.4 แนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

1. การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น
2. ลดการสูญเสียพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยการหุ้มฉนวนด้วยเซรามิกซีไฟเบอร์ที่เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์
3. หาสภาวะการเผาไหม้ที่เหมาะสมระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงและปริมาณอากาศ

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นชนิดอากาศไหลขึ้น (Updraft gasifier) ขนาดปริมาตรของเตาเท่ากับ 7,596.75 ลบ.ซม
2. ใช้เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ต้นแบบในการทดสอบการเผาไหม้และวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊ส
3. อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 90 – 150 ลิตรต่อนาที
4. เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือ ชี้อ้อยไม่ยางพาราอัดเม็ด
5. วิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชี้อ้อยไม่ยางพาราอัดเม็ด ของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการทำงานและการออกแบบเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์
2. เข้าใจคุณลักษณะการเผาไหม้ของไม้ยางพาราอัดเม็ด
3. สามารถประยุกต์พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ เพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.7 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการสร้างเตาเผาของเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Up Draft
2. ศึกษาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวกับเตาเผาของเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Up Draft ทฤษฎีการเผาไหม้ และหลักการคำนวณ
3. ทดสอบการทำงานของเตาเผาของเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบ Up Draft เก็บข้อมูลบันทึกค่าองค์ประกอบของแก๊ส ศึกษาถึงผลกระทบของการเผาไหม้ และปรับปรุงแก้ไข
4. รวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผล
5. สรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากความต้องการพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในการใช้น้ำมันและแก๊สธรรมชาติต่าง ๆ นั้น ส่งผลให้ราคาของแหล่งพลังงานเหล่านี้เพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก และด้วยปริมาณของแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ไม่ สอดคล้องต่อความต้องการทั้งในปัจจุบันและอนาคต จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องตื่นตัวกับสถานการณ์ วิกฤติพลังงานที่เกิดขึ้น นอกจากนี้โลกของเรายังต้องเผชิญกับปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม ที่เป็นผลกระทบที่ เกิดจากการใช้พลังงานอีกด้วย และจากปัญหาต่างๆ ที่ได้กล่าวมานี้ จึงทำให้ผู้ที่สนใจและคิดค้นศึกษาถึง ปัญหา แนวทางการแก้ไข วิธีการรับมือในอนาคต เชื้อเพลิงชีวมวล จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถตอบ โจทย์ในแง่ของแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม และเป็นที่น่าสนใจของนักวิจัยมากมาย

##### 2.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับแก๊สซิพีเคชั่น

ในปี 2011 Kaewluan S. และ Pipatmanomai S. [4] ได้ทำการทดลองการเกิดแก๊สซิพีเคชั่น จากเศษไม้ยางพารา โดยใช้เตาเผาแก๊สซิพีเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด ขนาด 100 KW/hr. เพื่อตรวจสอบผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงและคุณสมบัติของแก๊ส สำหรับการทดลองกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศภายนอกคงที่ ในขณะที่อัตราการป้อนเศษไม้ยางพารามีอัตราส่วนสมมูลในช่วง 2.3 – 3.1 โดยมีอัตราการเพิ่มอัตราส่วนสมมูลอย่างต่อเนื่อง ค่าของอุณหภูมิมีผลทำให้ค่าองค์ประกอบของแก๊สมีค่าสูงขึ้น และทำให้เกิดของซีเถ้าและน้ำมันดินลดลง อย่างไรก็ตามถ้าค่าอัตราส่วนสมมูลมีค่าสูงก็จะทำให้แก๊สสังเคราะห์มีค่าความร้อนที่ลดลง โดยค่าอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 0.38 ได้แก๊สสูงสุดเท่ากับ 2.33 Nm<sup>3</sup> โดยที่ต่อกิโกรัมของก๊าซสังเคราะห์ของชีวมวลแห้งมีค่าความร้อนเท่ากับ 4.94 MJ/Nm<sup>3</sup> ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนเป็นคาร์บอนที่คำนวณได้และประสิทธิภาพในการทำให้เป็นแก๊สเท่ากับ 97.3% และ 80.12% ตามลำดับ การสมดุลระหว่างมวลและพลังงานของกระบวนการเกิดแก๊สพบว่า มีการกระจายมวลและพลังงานได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญโดยค่าอัตราส่วนสมมูล และการสูญเสียพลังงานคิดเป็น 25% ของพลังงานทั้งหมด การประเมินทางด้านเศรษฐกิจ การใช้ประโยชน์จากก๊าซสังเคราะห์สำหรับการผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้าโดยใช้เตาเผาแก๊สซิพีเออร์ที่มีปริมาตร 1 เมกกะวัตต์ และข้อมูลที่ได้จากการทดลองการใช้เศษไม้จากยางพาราในการผลิตแก๊สซิพีเคชั่น ในการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความน่าสนใจในการแทนที่น้ำมันเชื้อเพลิงและแก๊สธรรมชาติโดยใช้ก๊าซสังเคราะห์แทน สำหรับการให้ความร้อนในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง 70% และ 50% ต่อปีตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2011 Kaewluan S. และ Pipatmanomai S. [5] ได้ทำการศึกษาระบบแก๊สซิฟิเคชันร่วมของไม้ยางพารา กับเศษไม้ยางพาราที่มีความชื้นสูง และเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เศษไม้ยางพาราที่หั่นย่อยผสมกับเศษไม้ยางพาราที่มีความชื้น 27% นอกจากนี้พบว่ามีการเพิ่มอุณหภูมิในการทำให้เป็นแก๊สซิฟิเคชันมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 700°C อีก 70°C ค่าความร้อนของแก๊สสังเคราะห์โดยทั่วไปจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเศษไม้ยางพารา นอกจากนี้ยังทำให้อัตราส่วนการผลิต CO, CO<sub>2</sub> มีค่าสูงขึ้น ในการเพิ่มอัตราส่วนผสมและการเพิ่มเศษไม้ยางพาราทำให้เป็นผลดีต่อประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอน ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพของแก๊สซิฟิเคชันมีค่าเพิ่มขึ้นจากการเติมเชื้อเพลิง ปริมาณและค่าความร้อนของชี้ถ่านลดลงเล็กน้อย แต่ในขณะที่มีการเพิ่มอัตราส่วนเศษไม้ยางพาราหั่นย่อยจะทำให้มีเถ้าสูง ประสิทธิภาพโดยรวมและผลิตภัณฑ์จากการรวมกันของแก๊สซิฟิเคชันได้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับแก๊สซิฟิเคชันที่มีความชื้นสูงเพียงอย่างเดียว

ในปี 2014 Onthong K. และ Wasinarom K. [9] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ การประเมินปฏิกิริยาของชั้นปฏิกิริยารีดักชันโซนและการตกค้างของชี้ถ่าน ที่อัตราส่วนของแต่ละชั้นปฏิกิริยาภายในเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ทำการทดสอบ นอกจากนี้ยังใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิของโซนปฏิกิริยาและค่าองค์ประกอบของแก๊ส โดยค่า Equivalent Ratio มีค่า 3.90 ถึง 4.50 จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิของชั้นการเผาไหม้และชั้นปฏิกิริยารีดักชัน โดยทั่วไปมีอัตราการป้อนอากาศสูงขึ้น และการทำนายอุณหภูมิของปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สอดคล้องกับผลการทดลอง

### 2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเตาเผาแก๊สซิฟิเคชัน

ในปี 2010 S.J. Ojolo และ J.I. Orisaleye [7] ได้ทำการคำนวณวิจัยและออกแบบ เกี่ยวกับเตาเผาชีวมวล โดยเป็นเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลง โดยได้ออกแบบให้มีกำลังทางกลที่ 4 KW และสามารถให้ค่าความร้อนที่ 15 KW และมีการแสดงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้มีเปลวไฟเป็นสีฟ้า โดยระยะเวลาที่เปลวไฟเป็นสีฟ้านาน 15 นาที และเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันที่ออกแบบนี้ใช้เมล็ดปาล์มเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถทำการเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่องและมีเปลวไฟนาน 15 นาทีต่อเชื้อเพลิง 1 Kg อัตราการเปลี่ยนแปลงของแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้เมล็ดปาล์มเป็นเชื้อเพลิงอยู่ที่ 4 Kg/hr

ในปี 2012 Fiseha M. และ Shaharin A [8] ได้นำเสนอเกี่ยวกับไบปาล์มจากพืชชีวมวลที่มีมากในประเทศมาเลเซีย แต่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ มีการศึกษาเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันได้อ้างอิงมาจากงานวิจัยต่างๆ และเป็น ที่ทราบดีว่าเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงเป็นทางเลือกที่ดี สำหรับการศึกษาก๊าซซิฟิเคชันจากไบ ปาล์มน้ำมัน เตาเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบอากาศไหลลงได้มีการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างใหม่ โดยการเพิ่มความสูง เปลี่ยนตำแหน่งของแก๊สและช่องไอน้ำเข้า ผลพลอยได้จากแก๊สซิไฟเออร์ที่ได้จากไบโपाल์มที่มีการอุ่นอากาศ จากการให้ความร้อนก่อน ทำให้เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแก๊สสังเคราะห์มีปริมาณเพิ่มขึ้น ได้แก่  $H_2$  8.47% เป็น 10.53%, CO จาก 22.87% เป็น 24.94%,  $CH_4$  จาก 2.02% เป็น 2.03% และให้ค่าความร้อนสูงขึ้นจาก 4.66 เป็น 5.31 MJ/Nm<sup>3</sup> โดยทั่วไปแล้ว ผลการศึกษาในปัจจุบันแสดงให้เห็นว่าไบโपाल์มเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในแผนการกระจายความหลากหลายของพลังงานของประเทศมาเลเซีย

ในปี 2014 Tryner J. และ Bryan D. [6] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการประเมินผลค่าประสิทธิภาพและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการออกแบบเตาเผา และการใช้เชื้อเพลิงแต่ละประเภทของเตา 5 แบบ ที่ทำการทดสอบด้วยเชื้อเพลิง 2 ชนิด รูปแบบการสมดุลของพลังงานถูกพัฒนาโดยใช้การวัดอุณหภูมิในการระบุแหล่งที่มาของการสูญเสียประสิทธิภาพจากการปล่อยก๊าซมลพิษ และค่าประสิทธิภาพ มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขึ้นอยู่กับการออกแบบเตาเผาและชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ทดสอบ การเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์กับการเติมเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพในการวัดค่าความร้อนสูงสุดคือ 42% การปล่อยก๊าซ CO ต่ำสุดคือ 0.6 gMjd-1 และจากสมการสมดุลพลังงานแสดงให้เห็นว่า 60% ของการ ป้อนพลังงานยังคงเป็นถ่าน เพราะมีการเกิดแก๊สซิไฟเออร์ที่สูง จากผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า ควรคำนวณสมรรถนะทางความร้อนและค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเตาเผา

ซึ่งจากตัวอย่างงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดของระบบแก๊สซิไฟเคชันและการออกแบบเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์นั้น จึงนำไปสู่การศึกษาทำการทดลองศึกษาผลกระทบของสภาวะการเกิดแก๊สของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้น (Updraft gasifier) เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปฏิกิริยาต่างๆภายในเตา เช่น การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผา อัตราการป้อนอากาศ เพื่อดูค่าองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## บทที่ 3

# เชื้อเพลิงชีวมวลและทฤษฎีการเผาไหม้

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ข้าว น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพารา และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ผลผลิตบางส่วนมีเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศ สร้างรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท จึงถือว่าประเทศไทยเป็นครัวของโลก อย่างไรก็ตามระหว่างการผลิตและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ก่อให้เกิดชีวมวล หรือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เศษไม้ยางพารา แกลบ ฟางข้าว และกากอ้อย เป็นต้น ชีวมวลบางส่วนถูกนำมาแปรรูปเป็นปุ๋ย วัสดุคืบ และเชื้อเพลิง บางส่วนถูกเผาทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ พลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีเทียบเท่ากับถ่านหินลิกไนต์ 54 ล้านตัน [10]

### 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อให้ได้พลังงานอาจจะทำได้โดย นำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่างๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน [10]

#### 3.1.1 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกประเภทได้เป็น 4 ประเภท [11] คือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest Biomass) ซึ่งสามารถแยกออกเป็นไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ในเชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณของลิกไนน์ (Lignin) อยู่ประมาณ 40% ในไม้เนื้อแข็ง ตัวอย่างของเชื้อเพลิงประเภทนี้ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ และขี้เลื่อย
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบข้าว, ฟางข้าว ซึ่งชีวมวลพวกนี้จะมีสารลิกไนน์ต่ำ โดยประมาณ 0-20%
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรม (Industrial Biomass) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล คือ ขานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับประรดที่ได้จากโรงงานผลิตสับประรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้ จะมีปริมาณความชื้นสูงมาก
4. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากของเหลือใช้จากคน (Domestic waste) ได้แก่เชื้อเพลิงจากขยะเทศบาล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไปจะเป็นเชื้อเพลิงที่แตกต่างกันตามประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล และการที่เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นและองค์ประกอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีค่าความร้อน (Heating Value) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่าแตกต่างกันด้วย [11]

1. แกลบ ลักษณะทั่วไป มีขนาดเล็ก ยาวไม่เกิน 5 มม. และหนาไม่เกิน 2 มม. สีเหลือง แกลบได้มาจากการสีข้าวเปลือก ซึ่งต้องมีความชื้นไม่เกิน 15% ก่อนสี แกลบสามารถนำไปใช้งานได้หลาย ยกตัวอย่าง เช่น เป็นเชื้อเพลิง ผสมลงในดินเพื่อปรับสภาพดินก่อนเพาะปลูก และใช้โปรยใต้ร่องเลี้ยงไก่เพื่อ รองรับมูลไก่ เป็นต้น จุดเด่น มีความชื้นต่ำและขนาดเล็กเหมาะสมเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ ชี้แกลบมีมูลค่าสูงถ้าสามารถควบคุมคุณสมบัติให้ได้ตามที่ผู้ซื้อกำหนด จุดด้อย มีปริมาณชี้แกลบ 16-18 % โดยน้ำหนัก ดังนั้น ในการเผาไหม้ควรคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย อีกประการหนึ่งเนื่องจาก แกลบมีน้ำหนักเบา (1ลบ.ม. หนัก 123 กก.) ต้องมีการวางแผนในการขนส่งให้ดี



รูปที่ 3.1 ชีวมวลแกลบ

2. กากอ้อยหรือชานอ้อย ลักษณะทั่วไป มีลักษณะเป็นขุย ได้จากการผลิตน้ำตาลดิบ โดยนำอ้อยมาคั้นน้ำออก ส่วนที่เป็นน้ำนำไปผลิตเป็นน้ำตาลดิบ ส่วนที่เหลือคือกากอ้อย การนำไปใช้งานส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิต น้ำตาลดิบประมาณ 80 % ส่วนที่เหลืออีก 20 % นำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษและ MDF Board จุดด้อย น้ำหนักเบา และความชื้นสูง



รูปที่ 3.2 ชีวมวลกากอ้อยหรือชานอ้อย

3. เศษไม้ยางพารา ลักษณะทั่วไป เมื่อมีอายุถึง 20 - 25 ปีจะถูกตัดเพื่อปลูกใหม่ ไม้ยางพาราที่ถูกตัดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ รากหรือตอไม้ ปลายไม้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้วลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มา และไม้ท่อนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้วขึ้นไป ไม้ท่อนจะถูกตัดให้ได้ความยาว 1.05 ม. เพื่อส่ง โรงเลื่อย และโรงงานเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งจะได้เศษไม้หลายแบบคือ ปีกไม้ ตาไม้ (ส่วนที่มีตำหนิ) ชี้เลื่อย และซีกบ การนำไปใช้งาน ในส่วนของชี้เลื่อยจะนำไปเพาะเห็ด ทำรูป ใช้คลุมเหาด่าน เศษไม้อื่นๆจะนำไปเป็นเชื้อเพลิง สำหรับโรงบ่มยางพารา เหาด่าน ใช้ในขบวนการผลิต ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับไม้อัด ยางพารา (Plywood) Medium density board และ Chip board นอกจากนี้ ยังนำไปใช้ในงาน ก่อสร้าง เช่นเสาเข็ม ใช้ทำเป็นพาเลท ลังไม้ เป็นต้น จุดด้อย มีขนาดใหญ่ และถ้าเป็นเศษไม้สดจะมีความชื้นค่อนข้างสูง ประมาณ 50 % ดังนั้นในการเผาไหม้จึงไม่ค่อยสมบูรณ์ ดังนั้นอาจจะต้องเพิ่ม ขบวนการย่อยและลดความชื้นก่อนนำไปเผา



รูปที่ 3.3 ซิวมวลเศษไม้ยางพารา

4. ชังข้าวโพดและลำตัน ลักษณะทั่วไป ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพด เพื่อนำเมล็ดมาใช้งาน ส่วนใหญ่เป็นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในส่วนของลำตันจะถูกตัดหลังจากการเก็บเกี่ยวแล้ว จุดเด่น ชังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูง เมื่อเทียบกับชีวมวลอื่น ๆ



รูปที่ 3.4 ซิวมวลชังข้าวโพดและลำตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย

เชื้อเพลิงชีวมวล	ส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์	ค่าความร้อน (MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	14.40
	ยอดและใบ	17.39
ข้าว	แกลบ	14.27
	ฟางข้าว	10.24
เชื้อเพลิงชีวมวล	ส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์	ค่าความร้อน (MJ/kg)
น้ำมันปาล์ม	ทะลายปาล์ม	17.86
	เส้นใย	17.62
	กะลา	18.46
มะพร้าว	เปลือก	16.23
	กะลา	17.93
	ทะลาย	15.40
มันสำปะหลัง	ลำต้น	18.42
ขี้ังโพด	ขี้ัง	18.04

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

### 3.1.3 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวล

#### 1 การวิเคราะห์แบบใกล้เคียงและแบบเต็มที [12]

มีการวิเคราะห์สองแบบ คือ Proximate and Ultimate มีประโยชน์ สำหรับการกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและการเป็นเชื้อเพลิงของวัตถุดิบชีวมวล การวิเคราะห์เหล่านี้ได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกสำหรับถ่านหินและมีใช้กันแพร่หลายในห้องปฏิบัติการเชิงพาณิชย์ทั่วไป การวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis ทำได้ค่อนข้างง่าย และสามารถกระทำได้ด้วยเตาอบแห้ง เตาเผาในห้องปฏิบัติการ และเครื่องชั่ง ส่วนการวิเคราะห์แบบ Ultimate Analysis เป็นเทคนิคขั้นสูงทางเคมี การวิเคราะห์ทั้งสองแบบ สามารถทำได้ตามห้องปฏิบัติการเชิงพาณิชย์ทั่วไป

การวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis เป็นการหาค่า ความชื้น (Moisture M) สารระเหย (volatile matter VM) ขี้เถ้า (Ash) และเนื้อคาร์บอนคงที่ (Carbon C) ของเชื้อเพลิง โดยใช้การทดสอบมาตรฐาน ASTM (D 7582, D 5373, D 4239 และ D 5865) ความชื้นวิเคราะห์ได้จากการสูญเสียน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 110°C สารระเหยได้มาจากการให้ความร้อนอย่างช้าแก่บ้ำหลอมปิดจนถึงอุณหภูมิ 950°C และนำตัวอย่างมาชั่งอีกครั้งหนึ่ง อัตราการให้ความร้อนที่สูงที่พบในเครื่องกำเนิดแก๊สจริงจะทำให้ได้ปริมาณไอระเหยที่สูงกว่าและปริมาณคาร์บอนคงที่ที่ต่ำกว่าอัตราการให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนที่เข้าที่ใช้ในการวัดของ ASTM แต่ถ่านที่ได้จากเครื่องกำเนิดแก๊สนั้น คาดว่าจะเป็นสัดส่วนกับถ่านที่ได้จากการทดสอบของ ASTM

**ตารางที่ 3.2** ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล [12]

Biomass Fuel	Moisture Content	
	wt % Wet Basis	wt % Dry Basis
Woody biomass, green	40 – 60	67 - 150
Woody biomass, dried	15	17
Biomass Fuel	Moisture Content	
	wt % Wet Basis	wt % Dry Basis
Straws	15	17
Stalks, cobs, hulls	15	17
Bagasse	70	230
Municipal refuse	35	55
Peat	90	900
Air dry feedlot waste	11	12

การวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis จะทำให้ได้องค์ประกอบทางเคมีและค่าการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงที่สูงกว่า การวิเคราะห์ทางเคมีมักจะแสดงรายการต่างๆของ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจนกำมะถัน และเถ้าของน้ำมันเชื้อเพลิงแห้งตามสัดส่วนเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก การวิเคราะห์แบบเต็มที่สมบูรณ์แบบสำหรับชีวมวลจำนวนมากและเชื้อเพลิงแข็งชนิดอื่นๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์แบบเต็มที่สมบูรณ์แบบสำหรับชีวมวลจำนวนมากและเชื้อเพลิงแข็งชนิด

Biomass Fuel	Volatile MaHer (VM)	Fixed Carbon (FC)	Ash
<b>Coals</b>			
Pittsburgh seam coal	33.9	55.8	10.3
Wyoming Elkol coal	44.4	51.4	4.2
Lignite	43.0	46.6	10.4
<b>Oven Dry Woods</b>			
Western hemlock	84.8	15.0	0.2
Douglas fir	86.2	13.7	0.1
White fir	84.4	13.1	0.5
<b>Oven Dry Barks</b>			
Western hemlock	74.3	24.0	1.7
Douglas fir	70.6	27.2	2.2
White fir	73.4	24.0	2.6
Biomass Fuel	Volatile MaHer (VM)	Fixed Carbon (FC)	Ash
<b>Pyrolysis Chars</b>			
Redwood(790°to1020°F)	30.0	67.7	2.3
Redwood(800°to1725°F)	23.9	72.0	4.1
Oak (820°to1135°F)	25.8	59.3	14.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุของเชื้อเพลิง (ไม้ยางพารา)

คุณสมบัติ	สภาพน้ำส่ง (%)	สภาพน้ำหนักแห้ง (%)
ความชื้น	5.81	-
สารระเหย	76.68	81.41
ถ่านคงตัว	15.23	16.16
เถ้า	2.28	2.43
ไฮโดรเจน	6.31	6.01
คาร์บอน	45.42	48.22
ไนโตรเจน	0.45	0.48
ออกซิเจน	45.54	42.86
ซัลเฟอร์	0.00	0.00
ค่าความร้อนสูง (kcal/kg)	4,180	4,440
ค่าความร้อนต่ำ (kcal/kg)	3,860	4,100

ที่มา : รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

ค่าการทำความร้อนที่สูงขึ้นของเชื้อเพลิงจะหาได้จากการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงด้วยออกซิเจนในเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (bomb calorimeter) และการวัดความร้อนที่ปล่อยออกมาเป็นปริมาณน้ำที่ทราบค่าได้ ความร้อนที่ปล่อยออกมาในขั้นตอนนี้หมายถึงปริมาณพลังงานสูงสุดที่สามารถได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและเป็นค่าที่จำเป็นสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของการทำให้เป็นแก๊ส ค่าการให้ความร้อนสูง (HHV Higher heating value) วัดได้จากการทดสอบแบบนี้เนื่องจากน้ำที่เป็นของเหลวถูกผลิตขึ้นมา อย่างไรก็ตามค่าการให้ความร้อนต่ำ (LHV Lower heating value) มีความสัมพันธ์มากกว่ากับปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่า HHV

ความร้อนของการเผาไหม้จะพิจารณาจากองค์ประกอบของชีวมวลและในความเป็นจริงสามารถคำนวณได้จาก [12]

$$\text{HHV} = [34.1 C + 132.2 H + 6.8 S - 1.53 A - 12.0 (O+N)] \text{ kJ/g} \quad (3.1)$$

$$\text{HHV} = [146.6 C + 568.8 H + 29.4 S - 6.6 A - 51.5 (O+N)] \times 102 \text{ Btu/lb} \quad (3.2)$$

โดยที่ C, H, S, A, O, และ N คือ น.น.% ของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, กำมะถัน, เถ้า, ออกซิเจน และไนโตรเจนในเชื้อเพลิง ค่าที่คำนวณได้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้โดยมีข้อผิดพลาดสัมบูรณ์ที่ 2.1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ถ่านและคุณสมบัติของถ่าน

คาร์บอน คือชื่อที่ใช้กับธาตุเคมีที่เกิดขึ้นในหลายรูปแบบทั้งบริสุทธิ์ (เช่นเพชรและแกรไฟต์) และไม่บริสุทธิ์ (เช่นถ่านโค้ก ถ่านหินและเขม่า) ถ่านหมายถึงผลิตภัณฑ์คาร์บอนของแข็ง 10% ถึง 30% จาก การกลั่นสลาย (pyrolysis) ของชีวมวล องค์ประกอบของมันมีต่างๆกัน จากคาร์บอน 50% จนถึงคาร์บอนมากกว่า 80% ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาพของการกลั่นสลาย (pyrolysis)

การผลิตถ่านเริ่มมีมาตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์และเป็นอุตสาหกรรมที่มีการพัฒนามายาวนานในปัจจุบันโดยมีมาตรฐานสำหรับการทำงานที่หลากหลาย ถ่านก่อให้เกิดแก๊สได้ง่ายกว่าและ การทำความสะอาดแก๊สสำหรับเครื่องยนต์ทำได้ง่ายมากกว่าแก๊สชีวมวล เนื่องจากปริมาณไอระเหย ของถ่านมีต่ำ

ในตอนต้นของสงครามโลกครั้งที่สอง เครื่องกำเนิดแก๊สซิไฟเออร์ส่วนใหญ่จะใช้ถ่าน อย่างไรก็ตาม การผลิตถ่านทำให้เสียพลังงานประมาณ 50% ของมวลชีวภาพและมักใช้ไม้เนื้อแข็งเป็นวัสดุ เริ่มต้น ในตอนท้ายของสงครามโลกครั้งที่สองเครื่องกำเนิดแก๊สซิไฟเออร์ส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลไม้แทน ถ่าน (Gengas 1950) ปัจจุบันเครื่องกำเนิดแก๊สซิไฟเออร์จำนวนมากที่สร้างขึ้นในฟิลิปปินส์จะใช้ถ่าน และถ่านก็ถูกใช้ในประเทศอื่นๆ เช่นกัน ดูเหมือนจะเป็นเรื่องที่ชาญฉลาดและน่าจะเป็นไปได้ทีเดียวว่า การพัฒนาเครื่องกำเนิดแก๊สชีวมวลในระยะยาวนั้น ในท้ายที่สุดก็จะกลับมาใช้ชีวมวลแทนที่จะใช้ถ่าน อีกครั้ง

เนื่องจากถ่านจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สในเครื่องกำเนิดแก๊ส ปริมาณของเถ้าจึงเพิ่มขึ้น เราใช้คำว่า “เถ้าถ่าน” (char-ash) เพื่ออธิบายถึงผลผลิตตัวสุดท้ายที่ได้จากการให้กำเนิดแก๊สจากถ่าน แม้ว่าเถ้า ถ่านจะยังคงเป็นสีดำแต่ก็อาจมีปริมาณเถ้าได้ถึง 50% สำหรับการใช้ของ ออกซิเจน / อากาศ / ไอน้ำที่เข้ามาในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลขึ้น (updraft gasifier) จะสัมผัสกับเถ้าถ่านที่ตะแกรง และเผาผลาญคาร์บอนออกมาและเหลือไว้เพียงเถ้าสีขาวไว้ ปัญหาหลักในเครื่องกำเนิดก๊าซแบบ อากาศไหลขึ้นคือจะต้องหลีกเลี่ยงการตกตะกอน (หลอมละลาย) ของซีเถ้าเนื่องจากซีเถ้าจะอุด ตะแกรง ส่วนในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลง (downdraft gasifier) เถ้าถ่านจะทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและไม่สัมผัสกับออกซิเจน ดังนั้นคาร์บอนโดยปกติจึงไม่ถูกใช้ในเครื่อง กำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลงจนหมด ผลที่ได้จึงเป็นเถ้าถ่านดำที่มีคาร์บอน 70% ถึง 80% คาร์บอน แบบนี้ให้ความต้านทานต่อการตกตะกอนได้ดี อย่างไรก็ตาม เชื้อเพลิงที่มีเถ้าสูงสามารถทำให้เกิดการ ตกตะกอน ในบริเวณท่อ tuyeres เมื่อมีการใช้งาน ดังนั้น ในการเผาไหม้และในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบ อากาศไหลขึ้นเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีขั้นตอน ดังนี้

ชีวมวล → ถ่าน → เถ้า-ถ่าน → เถ้า → ตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักสุดท้ายของเศษเหลือทิ้งของถ่าน-ถ่านมักจะมีประมาณ 2% ถึง 10% ของน้ำหนักชีวมวล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเอาถ่าน-ถ่านออกและความหนาแน่นของถ่าน อย่างไรก็ตาม เศษเหลือทิ้งของถ่าน-ถ่านมีความหนาแน่นต่ำมากและอาจใช้ปริมาณสารชีวมวลได้ถึง 20% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ในการให้กำเนิดแก๊ส เนื่องจากถ่านมักมีมูลค่าสูงบางครั้งตัวให้กำเนิดแก๊สจึงถูกดำเนินการบางอย่างเพื่อผลิตก๊าซให้ได้ถึง 10% ของถ่าน โดยนำถ่านออกวางที่จุดสิ้นสุดเขตการเผาไหม้ ที่เผาไหม้ลักษณะเช่นนี้ จะลดความต้องการออกซิเจน (อากาศ) และเพิ่มคุณภาพของก๊าซได้มากกว่า  $6.8 \text{ MJ} / \text{Nm}^3$  แต่ยังคงช่วยเพิ่มปริมาณน้ำมันดินด้วย

### 3.2 ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นขบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของโมเลกุล ระหว่างเชื้อเพลิง (Fuel) กับออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งจะทำให้ความร้อนออกมาระหว่างกระบวนการเผาไหม้ โดยปกติโมเลกุลของคาร์บอน, ไฮโดรเจน หรือของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งจะเกิดขึ้นเร็วมากภายใต้อุณหภูมิสูง พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมาหรือเป็นขบวนการคายความร้อน (Exothermic process) ถ้าพลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีค่ามากเพียงพอจะทำให้ขบวนการการเผาไหม้ดำเนินต่อไปด้วยตัวเอง (Self sustaining) อย่างต่อเนื่องพร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานในรูปของความร้อนและแสงสว่างออกมาอย่างเพียงพอแก่การใช้ประโยชน์ได้ การเผาไหม้ยังถือเป็นเรื่องเกี่ยวกับจลนศาสตร์เคมี (Chemical kinetics) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความเร็วและกลไกของปฏิกิริยาทางเคมีของสาร ขณะที่เกิดการสลายตัวไปเป็นสารใหม่ พร้อมกับมีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างพลังงานทางเคมีและพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว [13]

การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีสถานะที่เหมาะสม และการเผาไหม้ที่ดี ที่สุด เกิดมลพิษน้อยที่สุด ก็คือการเผาไหม้ที่ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 4 ประการ คือ [14]

#### 3.2.1 ปริมาณอากาศที่พอเพียงต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ปริมาณอากาศหรือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air Fuel Ratio , AF) ที่เหมาะสมจะช่วยให้มีออกซิเจนอย่างพอเพียงที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอน, ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง ผลกระทบของปริมาณอากาศ หรือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง มีดังนี้

1. ถ้าปริมาณอากาศน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี หรือ AF จริง น้อยกว่า AF ทางทฤษฎี การเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ได้ความร้อนน้อย และก่อให้เกิดมลพิษ (มี CO เกิดขึ้น)
2. ถ้าปริมาณอากาศมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี หรือ AF จริง มากกว่า AF ทางทฤษฎี จะทำให้โอกาสที่จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มีความเป็นไปได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ความปั่นป่วนของอากาศ และแก๊สเผาไหม้

สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปแล้ว อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของออกซิเจน จากอากาศเผาไหม้ไปสู่ผิวของเชื้อเพลิงแข็ง เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของเชื้อเพลิง โดย ออกซิเจนต้องแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของแก๊สเผาไหม้ (Gas Film) หรือที่เรียกกันว่าชั้นขอบเขตของแก๊สเผาไหม้ (Boundary Layer) ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผิวของชั้นขอบเขตจะมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศที่อยู่โดยรอบเชื้อเพลิง และความเข้มข้นของออกซิเจนนี้จะลดลงไปตามระยะทางความหนาของชั้นขอบเขต เพราะออกซิเจนจะถูกใช้ไปเรื่อยๆ ความหนาของชั้นขอบเขตและชั้นของชี้้้้้เปรียบเสมือนความต้านทานการแพร่ของออกซิเจนจากอากาศไปยังผิวของเชื้อเพลิงแข็ง ถ้าความหนาของทั้งสองชั้นยังมีน้อย ก็จะทำให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวของเชื้อเพลิงแข็งได้โดยง่าย ซึ่งการที่จะทำให้ชั้นขอบเขตของแก๊สและชั้นชี้้้้้ สามารถทำได้โดยการทำให้กระแสอากาศและแก๊สเผาไหม้มีการไหลแบบปั่นป่วน

### 3.2.3 อุณหภูมิ ของการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะแปรผันตามอุณหภูมิเริ่มแรกจะเกิดขึ้นเป็นแบบช้าๆ และเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ความร้อนที่ได้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้นทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้นดังนั้นปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เพียงพอสำหรับการเริ่มปฏิกิริยาเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเผาไหม้ และจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้นต้องการให้มีอุณหภูมิต่ำที่เท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อาจมีข้อจำกัด คือ ชนิดของเชื้อเพลิงจะให้อุณหภูมิได้อย่างจำกัดที่ปริมาณแตกต่างกัน นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน ซึ่งเป็นแก๊สพิษ และเกิดแผลกเกาะติดผนังเตาทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนที่ผนังเตา ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ และโครงสร้างเตาเสียหายได้

### 3.2.4 เวลาในการเผาไหม้

เวลาเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบที่สำคัญ ถ้าระยะเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาสั้นเกินไป ก็จะทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ไม่หมด เมื่อเชื้อเพลิงอยู่ในเตาจึงจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่มากกว่าเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติเวลาที่ทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์นั้นต้องยาวนานมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มความสูงของห้องเผาไหม้เพื่อให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานมากขึ้น แต่จะส่งผลไปถึงเงินลงทุนที่สูงขึ้นด้วย การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะต้องมีเปลวไฟ (Flame) คือ บริเวณบางๆที่เกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน (Exothermic chemical reaction) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เปลวไฟมี 2 แบบอยู่ด้วยกัน คือ เปลวไฟแบบผสมกันมาก่อน (Premixed flame) และเปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion flame) แต่ละแบบอาจจำแนกย่อยได้เป็นเปลวไฟที่อยู่นิ่งกับที่ (Stationary flame) และเปลวไฟลุกลามเคลื่อนที่ (Propagating flame) และเปลวไฟต้องมีความเร็วการเผาไหม้ (Burning Velocity) อาจเป็นความเร็วการเผาไหม้แบบราบเรียบ (Laminar burning velocity) มีค่าต่ำประมาณ

เอกสารนี้ 0.5 m/s หรือความเร็วการเผาไหม้แบบปั่นป่วน (Turbulent burning velocity) มีค่าสูง บางทีอาจมีไม่ต่ำกว่า 10 m/s ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า 2 ถึง 10 เท่าของความเร็วกการเผาไหม้แบบราบเรียบ การเผาไหม้เกิดขึ้นในอัตราเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ พื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิง การไหลของแก๊สเชื้อเพลิง อุณหภูมิ เป็นต้น โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) แปรผันกับอุณหภูมิ แม้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่อัตราการเผาไหม้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมการเผาไหม้จึงเกิดขึ้นเมื่อส่วนผสมทำให้ร้อนขึ้นอย่างพอเหมาะ การเผาไหม้อาจทำให้เกิดการระเบิดได้ ถ้าอัตราการปลดปล่อยความร้อนสูงกว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนออกไประบบ จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงทำให้อัตราการปลดปล่อยความร้อนยิ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนระเบิด การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และแก๊สมีขั้นตอนแตกต่างกัน แต่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเหมือนกัน คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้โลกของเราอุ่นขึ้น ดังนั้นการเผาไหม้ที่ดีต้องเป็นระบบที่ปลดปล่อยมลพิษต่ำและเข้ากันได้กับสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันมีการคิดค้นและวิจัยเพื่อนำเตาเผาไหม้หลายๆ แบบมาประยุกต์ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบต่างๆ และเพื่อใช้ ทรัพยากรเชื้อเพลิงของสิ่งแวดล้อมให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด

### 3.3 สตอยชิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry)

การควบคุมในปฏิกิริยาการเผาไหม้สามารถคำนวณหาได้โดยใช้หลักการสตอยชิโอเมตรี ของการเผาไหม้ (Combustion Stoichiometry) ช่วยให้สามารถคำนวณหาปริมาณของออกซิไดเซอร์หรืออากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ การทำสตอยชิโอเมตรีจำเป็นต้องทราบลักษณะการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเสียก่อน ซึ่งการรายงานผลการวิเคราะห์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสถานะของเชื้อเพลิง เช่น แก๊สเชื้อเพลิงจะใช้การวิเคราะห์โดยประมาณและรายงานผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละโดยปริมาตรหรือโมลของแต่ละแก๊สที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สเชื้อเพลิงผสมนั้นๆ ส่วนเชื้อเพลิงแข็งหรือเชื้อเพลิงเหลวจะใช้การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและรายงานผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละโดยมวลของธาตุต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น เช่น C H N O และ S เป็นต้น สำหรับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ( $C_xH_y$ ) จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ดังนี้



สัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศซึ่งมักนิยมพิจารณาให้อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เป็นอากาศแห้งประกอบไปด้วยออกซิเจน 21% โดยปริมาตร และไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร นั่นคือแต่ละโมลของออกซิเจนมีไนโตรเจน 3.76 โมล ซึ่งการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ตามทฤษฎีหรือตาม stoichiometry สามารถหาได้จาก

$$(A/F)_{stoic} = \left( \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) = \frac{efr}{werwe}$$

$$(A/F)_{stoic} = \left( \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right) = \frac{7.76a}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $M_{air}$  และ  $M_{fuel}$  เป็นน้ำหนักโมเลกุลของอากาศ และเชื้อเพลิงตามลำดับนอกจากนี้ยังมีปริมาณอื่นๆที่เกี่ยวข้องดังนี้

อัตราส่วนสมมูล (equivalent ratio,  $\phi$ ) เป็นค่าที่ใช้บ่งบอกว่าส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบ stoichiometry หนา หรือบาง ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{(A/F)} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (3.5)$$

โดยที่ Fuel – rich mixtures  $\phi > 1$  คือ มีเชื้อเพลิงมาก อากาศน้อย

Fuel – lean mixtures  $\phi < 1$  คือ มีเชื้อเพลิงน้อย อากาศมาก

Stoichiometric mixtures  $\phi = 1$  คือ ปริมาณอากาศที่ใช้เท่ากับปริมาณที่ต้องใช้ทางทฤษฎี

ซึ่งอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์มากในการบ่งบอกสมรรถนะของพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ % stoichiometry air คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้คิดเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอากาศตามทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนสมมูลดังนี้

$$\%stoichiometry\ air = \frac{100\%}{\phi} \quad (3.6)$$

และเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน (% excess air) คือปริมาณที่บอกให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์โดยคิดจากอากาศทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 100

$$\%excess\ air = \frac{(1-\phi)}{\phi} \cdot 100\% \quad (3.7)$$

### 3.4 หลักการของแก๊สซิฟิเคชัน (Principle of Gasification)

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Technology) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นการเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในที่จำกัดอากาศ โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะเร่งปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องกลายเป็นเชื้อเพลิงแก๊ส (Fuel Gas) มีองค์ประกอบหลักคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) และแก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) [12]

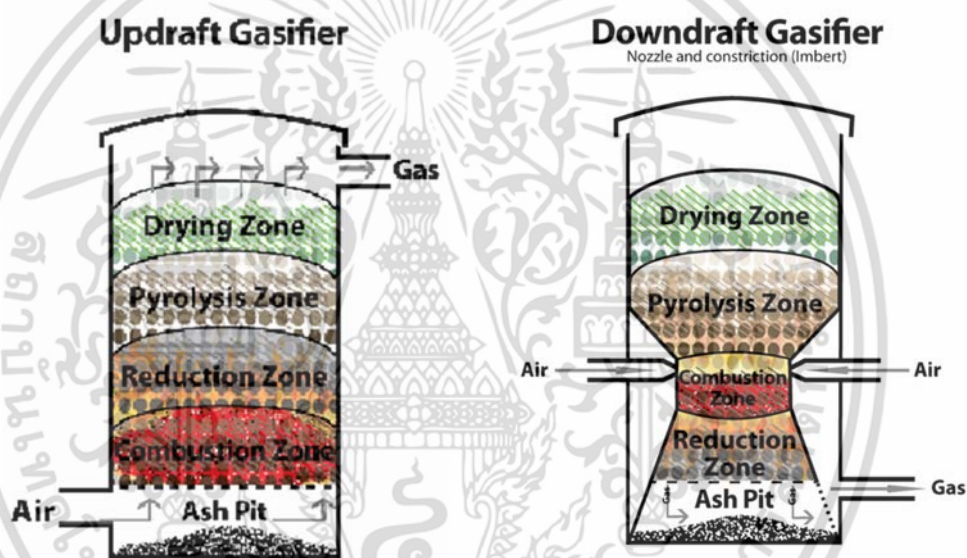
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรตีนเซอร์แก๊สสามารถผลิตได้ 4 วิธีด้วยกัน

วิธีที่ 1 อาศัย  $O_2$  บริสุทธิ์ในการเปลี่ยน เชื้อเพลิงแข็งให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแก๊ส (Oxidation Gasification)

วิธีที่ 2 เป็นการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สโดยอาศัยอากาศในการเผาไหม้ (Air Blown Gasification) ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตแก๊สที่มีส่วนผสมของ  $CO$ ,  $H_2$ , และ  $CH_4$

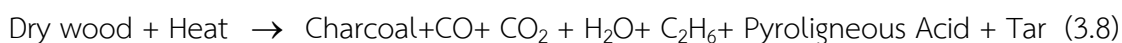
วิธีที่ 3 ใช้  $H_2$  ในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงโดยอาศัยความดันสูงและอุณหภูมิประมาณ  $750^\circ C$  และโปรตีนเซอร์แก๊สที่ได้มี  $CH_4$  อาศัยไอน้ำในการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง (Steam Gasification) ซึ่งจะให้ส่วนประกอบหลักคือ  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  และน้ำมันดิน (Tar) แต่วิธีแรกมักจะได้รับคามนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่านั่นเอง กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) ที่เกิดขึ้นในแก๊สซิไฟเออร์แบ่งออกเป็นโซนของปฏิกิริยาต่างๆ 4 โซนดังนี้ [15]



รูปที่ 3.5 โซนของปฏิกิริยาต่างๆภายในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ Updraft และแบบ Downdraft

1. ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying Zone) บริเวณนี้ไอน้ำที่แทรกตัวอยู่ในเชื้อเพลิงจะโดนไล่ออกด้วยความร้อนที่มาจากโซนการเผาไหม้ของเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ประมาณ  $100^\circ C - 135^\circ C$

2. ขั้นตอนการกลั่นสลาย (Pyrolysis Zone) เป็นขั้นตอนแรกของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยอาศัยความร้อนจากโซนการเผาไหม้ ทำให้สารประกอบอินทรีย์ในเชื้อเพลิงชีวมวลจะแตกตัวออกอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส อุณหภูมิในชั้นนี้จะประมาณ  $135^\circ C - 600^\circ C$  ของแข็งที่เหลือจากขบวนการนี้คือคาร์บอนในรูปถ่าน Fix Carbon ดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นตอนการเผาไหม้ (Combustion Zone) เป็นขั้นตอนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการเผา โดยจ่ายอากาศเข้าไปในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็งที่มาจากขั้นตอนการกลั่นสลาย เพื่อให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และโมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) ด้วยปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในขั้นเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิในขั้นนี้อยู่ระหว่าง 900°C - 1000°C ความร้อนที่เกิดขึ้นในขั้นนี้ถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนใน ขั้นรีดักชัน และ ขั้นกลั่นสลาย ผลผลิตหลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาในขั้นเผาไหม้คือ ความร้อนและเถ้าและถ่าน

4. ขั้นตอนรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone) เป็นขั้นตอนปฏิกิริยาการก่อเกิดแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวล ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สองของการเผาไหม้แบบจำกัดอากาศ แก๊ส CO<sub>2</sub> และไอน้ำที่ได้จากการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ขั้นรีดักชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นนี้เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแก๊ส CO<sub>2</sub> และไอน้ำ ให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่เผาไหม้โดยแก๊ส CO<sub>2</sub> จะไหลผ่านคาร์บอนที่ร้อนและเกิด CO ดังสมการที่ (3.11) อุณหภูมิที่เหมาะสมในขั้นนี้อยู่ที่ประมาณมากกว่า 500°C - 1000°C



ปฏิกิริยาในสมการที่ (3.11) เรียกว่า Boudouard Reduction Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณ CO สามารถทำได้โดยสามารถฉีดไอน้ำร้อนเข้าไป ซึ่งไอน้ำจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนดังสมการที่ (3.12) ได้แก๊ส CO และ H<sub>2</sub> เพิ่ม ซึ่งปฏิกิริยานี้ เรียกว่า Watergas Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800°C สำหรับปฏิกิริยาที่ (3.13) จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500°C - 600°C ปฏิกิริยานี้ทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนใน Producer Gas มีมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของแก๊สสูงขึ้นแต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไป ไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับ คาร์บอนมอนนอกไซด์ ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนตามปฏิกิริยาที่ (3.14) เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Water Shift Reaction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้ลดลงปริมาณของไฮโดรเจนจะสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของรีดักชันอยู่ประมาณ 700°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณของไฮโดรเจนจะลดลงเรื่อย ๆ แต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้น แต่ภายใต้ความดันสูง  $H_2$  อาจเข้าไปรวมตัวกับคาร์บอนและเกิดผลิต  $CH_4$  ออกมาซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Methane Reaction ดังสมการที่ (3.15) โดยจะเกิดได้ดีที่ความดันสูง ๆ และอุณหภูมิไม่สูงมากนัก

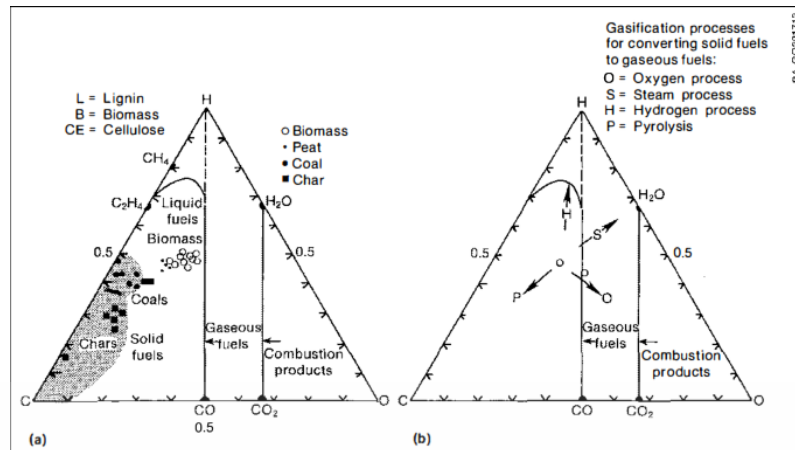
### 3.4.1 กระบวนการแปลงพลังงานความร้อนจากชีวมวล (Biomass Thermal Conversion Processes)

1 กระบวนการแปลงพลังงานความร้อนจากชีวมวล มีกระบวนการดังต่อไปนี้

- การกลั่นสลาย (Pyrolysis) : ชีวมวล + ความร้อน  $\rightarrow$  ถ่าน, น้ำมัน, ก๊าซ
- การให้กำเนิดก๊าซ (Gasification) : ชีวมวล + ออกซิเจนปริมาณจำกัด  $\rightarrow$  ก๊าซเชื้อเพลิง
- การเผาไหม้ (Combustion) : ชีวมวล + ออกซิเจนในอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric)  $\rightarrow$  ผลต่างๆที่เกิดจากการเผาไหม้

อย่างไรก็ตาม ในกลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ (จำนวนมาก)  $CH_{0.9}O_{0.1}$  จะมีอัตราส่วนอะตอมที่คงที่ของ (อัตราส่วนจะแตกต่างกันไปเล็กน้อยกับสายพันธุ์ ถ่านหินโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ  $CH_{0.9}O_{0.1}$  แต่แตกต่างกันไปในองค์ประกอบมาก) ความสัมพันธ์ระหว่างของแข็ง ของเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส จะเห็นได้ง่ายในรูปที่ 3.5 (a) เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคอะตอมของคาร์บอนไฮโดรเจนและออกซิเจนถูกพล็อตไปตามความหลากหลายของชนิดเชื้อเพลิง ในที่นี้ จะเห็นได้ชัดว่าเชื้อเพลิงแข็งชีวมวล ถ่านหินและถ่านไม้ อยู่ในส่วนล่างซ้ายของแผนภาพ เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนแบบแก๊สและแบบเหลวอยู่ที่ส่วนบนซ้าย ส่วน  $CO$  และ  $H_2$  จะเชื่อมรวมกันด้วยส่วนครึ่งของรูปสามเหลี่ยม และผลจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง  $CO_2$  และ  $H_2O$  อยู่บนเส้นแนวตั้งด้านขวา

กระบวนการเปลี่ยนความร้อนสำหรับชีวมวลจะแสดงด้วยลูกศรต่างในรูปที่ 3.5 (b) ในที่นี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการแปลงเปลี่ยนจะเคลื่อนย้ายองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลไปยังพื้นที่ๆเป็นของเหลวหรือของแข็งโดยวิธีทางชีวภาพหรือวิธีทางความร้อน ในบางกรณี (เช่นการให้กำเนิดแก๊สโดยออกซิเจน / อากาศ) กระบวนการต่างๆจะเกิดขึ้นเอง ในขณะที่กรณีอื่น ๆ (เช่นการให้กำเนิดแก๊สโดยไอน้ำ) ต้องใช้พลังงานมากพอสมควรเพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.6 (a) แผนภาพแสดงสัดส่วนของคาร์บอน,ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งของเหลว และแก๊ส (b) แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ระหว่างกระบวนการแปรรูปชีวมวล

## 2 กระบวนการไพโรไลซิสเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องและต่อเนื่องกันในการเปลี่ยนชีวมวลซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ให้กลายเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นการเผาไหม้อินทรีย์สารแบบจำกัดปริมาณออกซิเจน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ [16]

ข้อดีของกระบวนการไพโรไลซิส คือ สามารถเปลี่ยนชีวมวล และของเหลือทิ้งที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบใน สถานะของแข็งให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงในสถานะของเหลวได้ ทำให้สามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่ายกว่าเชื้อเพลิงในสถานะอื่นๆ กระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ

### 2.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า เป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียสมีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลว 30-50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25-35 เปอร์เซ็นต์ ไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (carbonization pyrolysis) และ ไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชัน ไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานาน โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวันได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะแก๊สจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15-30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และแก๊สไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิส

แบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิง ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามเราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีซิวหรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

## 2.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

เป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลวเรียกว่า น้ำมันชีวภาพประมาณ 60 - 75 เปอร์เซ็นต์ ของแข็ง 15 - 25 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สไม่กลั่นตัว 10 - 15 เปอร์เซ็นต์ และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพ 10 - 30 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล องค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพจากวัตถุดิบประเภทชีวมวล อย่างไรก็ตามเนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจึงสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีได้หลายประเภท โดยสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวภาพมีมากกว่า 3,000 ชนิด

สิ่งที่สำคัญที่สุดของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง และออกแบบให้ออกลั่นตัวเป็นของเหลวโดยเร็วที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมัน 70 - 80 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้มีการกำจัดถ่านและเถ้าออกจากผลิตภัณฑ์ให้มากที่สุดเพื่อได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาด

### 3.4.2 การเผาไหม้ของชีวมวล (Combustion of Biomass)

การเผาไหม้ของชีวมวลมีความซับซ้อนกว่าการกลั่นสลาย (pyrolysis) หรือการให้กำเนิดแก๊ส เพราะชีวมวลจะต้องไพโรไลซ์ก่อนและเผาไหม้ (ให้กำเนิดแก๊ส) บางส่วนก่อนแล้วจึงจะเผาไหม้โดยสมบูรณ์ การนำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาโดยตรงให้เกิดกาเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ แต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาตร หรือ 23% โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาโดยรวมของการเผาไหม้ของชีวมวล มีสมการเคมีดังนี้



เมื่อ  $\text{CH}_{1.4}\text{O}_{0.6}$  คือสูตรของชีวมวลทั่วไป การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงครั้งนี้จะทำให้เกิดความร้อน 20.9 kJ/g (8990 Btu/lb) เมื่ออุณหภูมิของผลที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำพอที่จะทำให้ของเหลวนั้น

กลายเป็นน้ำ และค่าดังกล่าวนี้จะถูกวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (bomb calorimeter) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

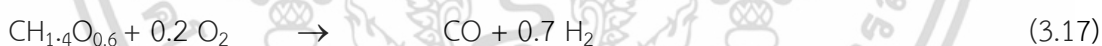
และรายงานเป็นค่าความร้อนสูงของการเผาไหม้หรือค่า HHV เช่นในตาราง 3.5 ในอุปกรณ์การเผาไหม้ในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ น้ำจะกลายเป็นก๊าซ สู่ชั้นบรรยากาศเป็นก๊าซ และความร้อนจากการระเหยของน้ำจะไม่พินตัวในกรณี เช่นนี้ ค่าความร้อนต่ำ LHV 20.4 kJ / g (8770 Btu / lb) อาจจะเป็นค่าความร้อนสูงสุดที่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ สำหรับไม้แห้งแล้วความแตกต่างระหว่าง LHV กับ HHV จะมีไม่มาก แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามค่าความชื้นของไม้

**ตารางที่ 3.5** คุณสมบัติทางความร้อนของชีวมวลโดยทั่วไป [12]

CH <sub>1.4</sub> O <sub>0.6</sub> คือสูตรของชีวมวลทั่วไป	ค่าองค์ประกอบของธาตุ		
	C	H	O
Composition (weight %)	52.2	4.3	41.7
Composition (mole %)	33.3	46.7	20.0
High Heating Value	20.9 kJ/g (8990 Btu/lb)		
Low Heating Value	20.4 kJ/g (8770 Btu/lb)		

### 3.4.3 ลักษณะทางเคมีของการให้กำเนิดแก๊สจากชีวมวล

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่ผลิตโดยอากาศหรือแก๊สออกซิเจนของปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 (b) โดยควรเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่น้อยที่สุดเพื่อนำส่วนประกอบของแข็งเข้าสู่องค์ประกอบของ O ในรูปที่ 3.5 (b) ซึ่งเป็นส่วนผสมของ CO และ H<sub>2</sub> ตามสูตร



แต่น่าเสียดายที่พลังงานที่มีอยู่ใน CO และ H<sub>2</sub> มากกว่าในชีวมวล จนปฏิกิริยานี้อาจจำเป็นต้องใช้การถ่ายเทพลังงานจากแหล่งภายนอกบางอย่าง ซึ่งจะทำให้กระบวนการนี้ซับซ้อนมากขึ้น ในทางปฏิบัตินั้นจะมีการเพิ่มออกซิเจนส่วนเกินเข้าไปในกระบวนการให้กำเนิดแก๊ส (ที่นำปฏิกิริยาไปสู่จุด O ตามรูป 3.5 (b) ซึ่งทำให้ได้ CO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O ส่วนหนึ่ง ตามสมการ:



โดยปกติแล้วจะมีเปอร์เซ็นต์ของมีเทนที่เกิดขึ้นบ้างเล็กน้อยด้วย คุณสมบัติทั่วไปของก๊าซที่ผลิตจากชีวมวลแสดงไว้แล้วในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติทั่วไปก๊าซที่ผลิตจากชีวมวล

Compound	Symbol	Gas (vol. %)	Dry Gas vol. %
Carbon monoxide	CO	21.0	221.
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	9.7	10.2
Hydrogen	H <sub>2</sub>	14.5	15.2
Water	H <sub>2</sub> O	4.8	-
Methane	CH <sub>4</sub>	1.6	1.7
Nitrogen	N <sub>2</sub>	48.4	50.8
<b>Gas High Heating Value:</b>			
Generator gas (wet basis)	5506 kJ/Nm <sup>3</sup> (135.4 Btu/scf)		
Generator gas (dry basis)	5800 kJ/Nm <sup>3</sup> (142.5 Btu/scf)		
<b>Air Ratio Required for</b>			
Gasification:	2.38 kg wood/kg air (lb/lb)		
<b>Air Ratio Required for</b>			
Gas Combustion:	1.15 kg wood/kg air (lb/lb)		

### 3.4.4 กระบวนการเกิดแก๊สซิฟิเคชันแบบตรงและแบบอ้อม (Indirect and Direct Gasification Processes)

1. การให้กำเนิดแก๊สแบบอ้อม (แบบไพโรไลติก) การให้กำเนิดแก๊สแบบไพโรไลติกจะสามารถทำได้เมื่อเชื้อเพลิงหรือถ่านส่วนหนึ่งถูกเผาในภาชนะภายนอกที่มีอากาศและความร้อนที่เกิดขึ้นจะนำไปใช้ในการจ่ายพลังงานที่จำเป็นในการทำไพโรไลซ์ชีวมวล ประโยชน์หลักของกระบวนการนี้คือแก๊สพลังงานปานกลางจะถูกผลิตโดยไม่มีออกซิเจน สำหรับการส่งแก๊สทางไกลผ่านท่ออาจจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงขึ้น ข้อเสียคืออาจมีเศษของน้ำมันดินที่ผลิตได้มากอย่างชัดเจนและจำเป็นต้องใช้ความร้อนทางอ้อมหรือการถ่ายเทมวล ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์และกระบวนการนี้มีความซับซ้อน

2. การให้กำเนิดแก๊สแบบตรง กระบวนการการกลั่นสลาย (pyrolysis) และการให้กำเนิดแก๊สเป็นกระบวนการที่ดูดความร้อน นั่นคือต้องดูดความร้อนไปใช้เพื่อให้กระบวนการเกิดขึ้นที่จริงแล้วความร้อนที่ทำให้เกิดการกลั่นสลาย (pyrolysis) และยกระดับอุณหภูมิของผลต่างๆที่ออกมาให้สูงถึง 600°C จะอยู่ที่ประมาณ 1.6 - 2.2 kJ/g (700 - 500 Btu/lb) ซึ่งก็คือประมาณ 6% ถึง 10% ของความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ชีวมวลแบบแห้ง ความร้อนนี้จะถูกใช้โดยตรงจากบางส่วนของ

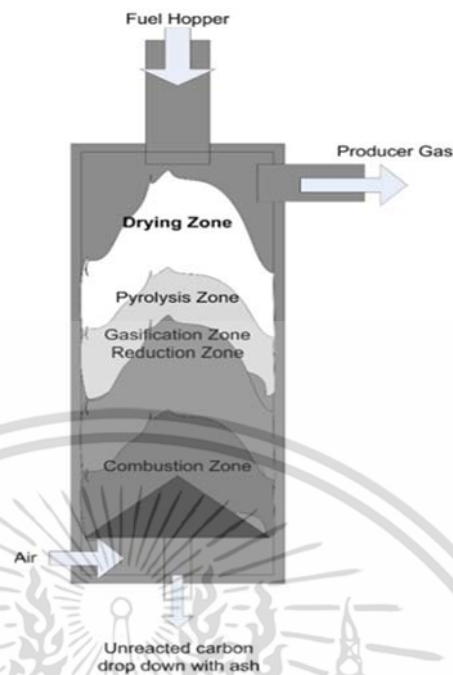
ของการเผาไหม้ดินน้ำมันระเหยได้ในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลง (downdraft gasifier) ส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลขึ้น (updraft gasifier) นั้นจะมาจากความร้อนของแก๊สต่างๆที่มาจากกาให้กำเนิดแก๊สจากถ่านไม้ การเผาไหม้จะเจือจางแก๊สที่ผลิตได้ด้วย  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งเป็นผลผลิตจากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน ถ้าเป็นการเผาไหม้ที่ทำได้ด้วยอากาศ แก๊สจะถูกเจือจางด้วยไนโตรเจนประมาณ 50% จากอากาศ

ข้อดีประการหลักๆของการให้กำเนิดแก๊สแบบตรงก็คือว่า กระบวนการขั้นตอนแบบขั้นตอนเดียว (one-stage process) เป็นเรื่องที่ย่างมาก การถ่ายโอนความร้อนโดยตรงจากแก๊สไปสู่ชีวมวลมีประสิทธิภาพสูง และกระบวนการนี้ส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการที่ควบคุมระบบตัวเอง (self-regulating) หากเป็นการใช้อากาศ แก๊สที่ได้จะถูกเจือจางด้วยไนโตรเจนในบรรยากาศ ให้เป็นค่าแก๊สที่ผลิตได้ (producer gas value) ที่ 5800-7700 kJ/Nm<sup>3</sup> (150200 Btu/scf) หากเป็นการให้กำเนิดแก๊สโดยใช้ออกซิเจนจะได้แก๊สที่มีพลังงานปานกลางที่ 11.500 kJ/Nm<sup>3</sup> (300 Btu/scf) ก๊าซพลังงานปานกลางสามารถกระจายไปแบบประหยัดได้ในระยะทางที่สั้น โดยผ่านท่อลำเลียง แก๊สนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแก๊สสังเคราะห์ เนื่องจากสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สารเคมี เมทานอล สารแอมโมเนีย มีเทน และน้ำมันเบนซิน ได้ในส่วนของออกซิเจนจะต้องซื้อหรือผลิตขึ้นเอง ทำให้ประหยัดได้ในที่ๆมีการติดตั้งอุปกรณ์ขนาดใหญ่เท่านั้น

#### 3.4.5 หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดแก๊สแบบตรง

1. การทำงานของเครื่องกำเนิดก๊าซแบบอากาศไหลขึ้น (Operation of the Updraft Gasifier) เครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลขึ้นมีการทำงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 กล่าวคือ อากาศจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างไหลขึ้นด้านบนในขณะที่เชื้อเพลิงจะเคลื่อนที่ลงด้านล่างลักษณะสวนทางกัน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Counter Current Gasifier ชั้นของปฏิกิริยาจะแบ่งเป็นลำดับ จากระดับอุณหภูมิสูงใน Combustion Zone ไปสู่ระดับอุณหภูมิต่ำใน Drying Zone เนื่องจากแก๊สร้อนที่เกิดจาก Combustion Zone ไหลผ่านชั้นเชื้อเพลิง ความร้อนสัมผัสจะถูกถ่ายเทให้กับเชื้อเพลิงก่อนไหลลงสู่ Reduction Zone และ Pyrolysis Zone ต่อไป [17]



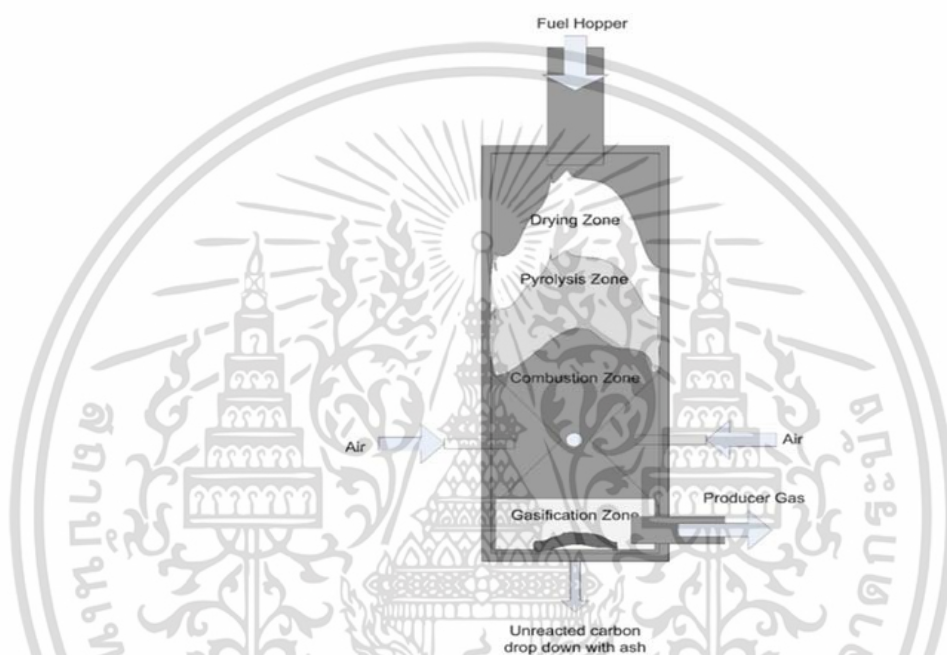
รูปที่ 3. เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น

ฉะนั้น Updraft Gasifier จึงมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง แต่เมื่อแก๊สออกจากเตาผลิตแก๊ส อุณหภูมิโปรดิวเซอร์แก๊สจะลดลง Tar และ Oil จะกลั่นตัวเป็นของเหลว ดังนั้นโปรดิวเซอร์แก๊สจึงมีสิ่งปนเปื้อนสูง การผลิตแก๊สด้วยวิธีนี้อาจจะป้อนไอน้ำช่วยในการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณ  $H_2$ , CO และช่วยควบคุมอุณหภูมิ Combustion Zone กรณีเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงไม่จำเป็นต้องป้อนไอน้ำ พารามิเตอร์ที่สำคัญประกอบด้วย วิธีการป้อนอากาศ ตำแหน่งแก๊สไหลออก ชนิดและขนาดของตะแกรง การบุฉนวน ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง และค่า Specific Gasification Rate (SGR)

SGR (Specific Gasification Rate) หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยาผลิตแก๊สในเวลา 1 ชั่วโมง (kg/hr) ต่อพื้นที่หน้าตัดของตะแกรง ( $m^2$ ) ขึ้นอยู่กับชนิดเชื้อเพลิง การออกแบบและการทำงานของเครื่องกำเนิดแก๊ส ค่า SGR ของการผลิตแก๊สด้วยวิธีนี้อยู่ระหว่าง  $100 - 300 \text{ Kg/hr-m}^2$

2. การทำงานของเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลง (Operation of the Downdraft Gasifier) กล่าวคือ อากาศไหลลงทิศทางการไหลลงของเชื้อเพลิงจึงอาจเรียกว่า Co-current Gasifier เครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลงประสบความสำเร็จอย่างมาก เพราะปริมาณน้ำมันดิน (Tar) ที่เกิดมีน้อย ในการทำงานเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลงตามรูป 3.7 อากาศจะสัมผัสกับชีวมวลที่กำลังกลั่นสลาย ก่อนที่จะสัมผัสกับถ่านและทำให้เกิดเปลวไฟ ความร้อนจากสารระเหยที่เผาไหม้จะยังคงรักษาการกลั่นสลาย (pyrolysis) ไว้ได้ เมื่อปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในเครื่องกำเนิดแก๊สอากาศที่มีอยู่จำกัดจะถูกเผาผลาญอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้เปลวไฟมากขึ้น ขณะที่กำลังกลั่นสลาย (pyrolysis) ในตอนท้ายของเขตการกลั่นสลาย (pyrolysis) แก๊สส่วนใหญ่จะประกอบด้วย  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  และ  $\text{H}_2$  เท่ากัน เราเรียกเปลวไฟนี้ว่า " การกลั่นสลายแบบมีเปลว (flaming pyrolysis)" ซึ่งทำให้มันแตกต่างจากเปลวไฟจากไม้ในที่เปิดโล่งและอากาศเข้าถึงได้ไม่จำกัด การกลั่นสลายแบบมีเปลว (pyrolysis) ก่อให้เกิดแก๊สที่พร้อมเผาไหม้ได้มากที่สุด ในช่วงของการให้กำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลงและมีน้ำมันดินถึง 99% ซึ่งการกลั่นสลายแบบนี้ก็คือกลไกสำคัญในการผลิตแก๊สในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบอากาศไหลลง

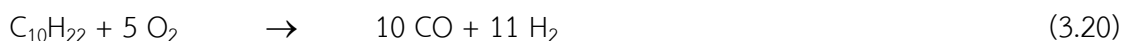


รูปที่ 3.8 เตาเผาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดอากาศไหลลง

หากถือว่าสูตรโดยประมาณของน้ำมันชีวมวลคือ  $\text{CH}_{1.2}\text{O}_{0.5}$  แล้ว ปฏิกิริยาการเผาไหม้บางส่วนโอระเหยเหล่านี้ จะมีสมการดังนี้



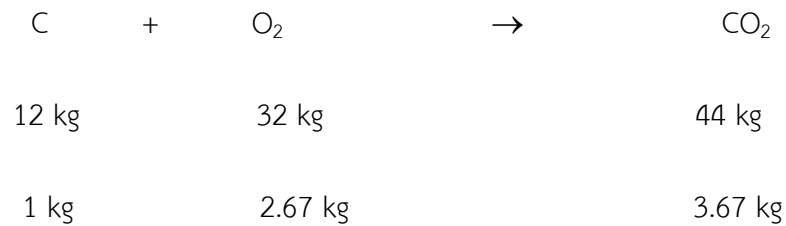
แม้ว่าการกลั่นสลายแบบมีเปลว (flaming pyrolysis) คือแนวคิดใหม่ ที่ใช้อธิบายการให้กำเนิดก๊าซจากชีวมวล แต่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและใหญ่บางส่วนก็คือกระบวนการทางอุตสาหกรรมมาตรฐานอย่างหนึ่งที่เคยใช้เครื่องกำเนิดก๊าซออกซิเจนเพื่อออกซิไดซ์ไฮโดรคาร์บอนให้เป็น  $\text{CO}$  และ  $\text{H}_2$  ดังสมการปฏิกิริยาสำหรับน้ำมันทั่วไป ข้างล่างนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

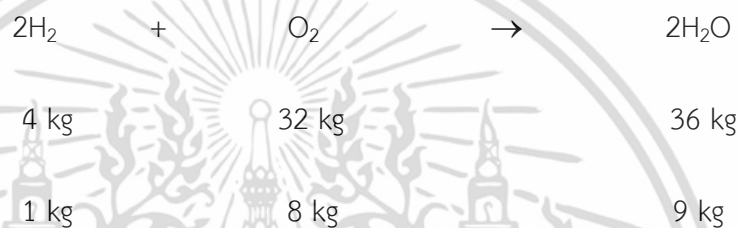


จากสมการที่ 3.9 เขียนสมการการเผาไหม้สมบูรณ์ เพื่อหาปริมาณ  $O_2$  ทางทฤษฎีดังนี้



ดังนั้น ไม้ยางพาราอัดแท่ง 0.47 kg C จะใช้  $O_2 = 2.67 \times 0.47 = 1.254 \text{ kg}_O / \text{kg}_f$

จากสมการที่ 3.10



ดังนั้น ไม้ยางพาราอัดแท่ง 0.059 kg H จะใช้  $O_2 = 8 \times 0.059 = 0.472 \text{ kg}_O / \text{kg}_f$

ดังนั้น ปริมาณ  $O_2$  ที่ใช้ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของไม้ยางพาราอัดแท่ง

ปริมาณ  $O_2$  ของไม้ยางพาราอัดแท่ง =  $1.254 + 0.472 = 1.726 \text{ kg}_O / \text{kg}_f$

เนื่องจาก ไม้ยางพาราอัดแท่งมีปริมาณ  $O_2 = 0.405 \text{ kg}$

ดังนั้น ปริมาณ  $O_2$  ที่ต้องการจากอากาศ =  $1.726 - 0.405 = 1.32 \text{ kg}_O / \text{kg}_f$

ปริมาณอากาศประกอบด้วย  $O_2 = 23.2\%$  โดยน้ำหนัก

ดังนั้น ปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้องการของไม้ยางพาราอัดแท่ง

$$\text{ไม้ยางพาราอัดแท่ง} = \frac{1.32}{0.232} = 5.68 \text{ kg}_{\text{Dry air}} / \text{kg}_f$$

ปริมาณที่ใช้จริงต่อเชื้อเพลิง 1 kg ( $A/F_{\text{stoi}}$ )

( $A/F_{\text{stoi}}$ ) ของไม้ยางพาราอัดแท่ง = 5.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การคำนวณหาปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

เมื่ออัตราส่วนสมมูล  $\phi_{fuel} = 0.34$  และ  $0.43$  โดยเชื้อเพลิงอ้างอิงจากการคำนวณไม้ยางพาราอัดแห้ง

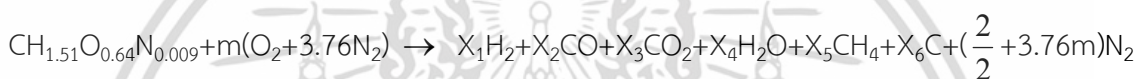
$$\text{จากสมการ } \phi_{fuel} = \frac{Y_{fuel}/Y_{air}}{Y_{fuel}/Y_{air\ stoichiometric}}$$

$$\text{และ } A/F = \phi_{fuel} \times A/F_{stoichiometric}$$

ดังนั้น รายการคำนวณโดยใช้ไม้ยางพาราอัดแห้ง

$$A/F_{stoichiometric} = \text{ของไม้ยางพาราอัดแห้ง ต่อเชื้อเพลิง 1 kg} = 5.68$$

สูตรทางเคมีของเชื้อเพลิงขี้เลื่อยไม้ยางพาราอัดเม็ด คือ  $CH_{1.51}O_{0.64}N_{0.009}$



$$\text{ดังนั้น } K_{mole\ Pellet} = 5.68 \text{ Kg}_{air} / 1 \text{ Kg}_{fuel}$$

$$MW_{air} = 28.85 \text{ Kg} / K_{mole}$$

$$\begin{aligned} MW_{fuel} &= 12 + 1.51 + (16 \times 0.64) + (14 \times 0.009) \\ &= 23.51 \text{ Kg} / K_{mole} \end{aligned}$$

กรณี  $m = 0.34$  (ที่อัตราค่าไหล 120 ลิตรต่อนาที)

$$\begin{aligned} \phi &= A/F_{stoichiometric} / A/F \\ &= 5.68 / ((0.34 \times 137.28) / 23.51) \\ &= 2.86 \end{aligned}$$

กรณี  $m = 0.43$  (ที่อัตราค่าไหล 150 ลิตรต่อนาที)

$$\begin{aligned} \phi &= A/F_{stoichiometric} / A/F \\ &= 5.68 / ((0.43 \times 137.28) / 23.51) \\ &= 2.26 \end{aligned}$$

## 4.3 การคำนวณหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตา

จากสมการการออกแบบเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์

$$FCR = Q_n / (HV_f \times \epsilon)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ FCR คือ อัตราการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง kg/s
- $Q_n$  คือ ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องการ kW
- $HV_f$  คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง kJ/kg
- $\epsilon_g$  คือ ประสิทธิภาพของเตาแก๊สซีฟิเออร์

จากข้อมูลในตารางที่ 3.4 เชื้อเพลิงไม้ยางพาราอัดแท่ง มีค่า HHV = 4,360 kcal/kg เท่ากับ 18,254.45 KJ/kg

- เมื่อ  $Q_n$  คือ  $m^{\circ}$  HHV

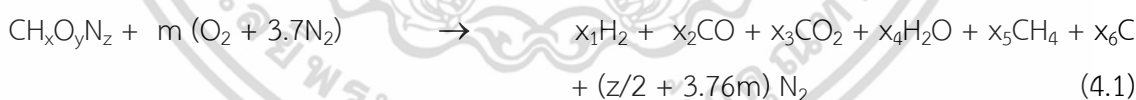
อัตราการถ่ายเทความร้อนของเชื้อเพลิงในเตาเท่ากับ 24.339 kw

$$FCR = \frac{Q_n}{(HV_f \times \epsilon)} = \frac{24339}{18254 \times 0.6} = 2.22225 \text{ kg/s}$$

#### 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 4.4.1 Equilibrium Modeling

สมการการเผาไหม้ของปฏิกิริยาของแก๊สซีฟิเออร์สามารถเขียนได้ดังนี้



- เมื่อ  $x, y, z$  คือ จำนวนอะตอมของ Hydrogen, Oxygen, Nitrogen
- $m$  คือ ปริมาณโมลของอากาศ

ปริมาณโมลของอากาศ 6 ตัวแปรพจน์ขวามือของสมการที่ 4.1 ได้  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  คือ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของแต่ละสาร สมการที่ 4.1 สามารถดุลอะตอมของ Carbon, Hydrogen, Oxygen ได้จากสมการเคมี ดังแสดงในสมการที่ 4.2 – 4.4 ส่วน Nitrogen จากอากาศที่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$(z/2 + 3.76m) \text{N}_2$  เพื่อไปใช้ในการคำนวณ Mass fraction, Mole fraction, Energy balance, Kinetic rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Carbon balance

$$x_2 + x_3 + x_5 + x_6 - 1 = 0 \quad (4.2)$$

Hydrogen balance

$$2x_1 + 2x_4 + 4x_5 - x = 0 \quad (4.3)$$

Oxygen balance

$$x_2 + 2x_3 + x_4 - y - 2m = 0 \quad (4.4)$$

ไนโซนาการเผาไหม้จะเกิด 3 ปฏิกิริยาหลักได้แก่



สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการ Equilibrium เพื่อใช้ในการคำนวณองค์ประกอบของ Syngas ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

Equilibrium constant for boudouard combustion

$$K_1 = X_2^2 / X_3 X_{total} \quad (4.5)$$

Equilibrium constant for CO shift combustion

$$K_2 = X_3 X_1 / X_2 X_4 \quad (4.6)$$

Equilibrium constant for methanation combustion

$$K_3 = X_5 X_{total} / X_1^2 \quad (4.7)$$

เมื่อ  $X_{total}$  คือจำนวน Mole ของผลิตภัณฑ์ในสมการที่ 4.1 ดังนั้นนำค่า  $X_{total}$  ไปเขียนเป็นสมการใหม่และทำการรวม Mole ของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในสมการที่ 4.8 ส่วนค่า  $X_6$  คือ Un-burn solid carbon ในผลิตภัณฑ์ตั้งนั้นในการคิดค่า  $X_{total}$  จะทำการยกเว้น  $X_6$  ซึ่งในสมการที่ 4.8 จะเหลือเฉพาะผลรวมของ Gas phase เท่านั้น

$$X_{total} = X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + x_5 + (z/2 + 3.76m) \quad (4.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านกึ่งการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Equilibrium constant อุณหภูมิและความดันคงที่ใช้ค่า Gibbs function ดังแสดงในสมการที่ 4.9

$$K_1 = e^{\frac{-\Delta G_T^0}{RT}}, \quad l = 1, 2, 3 \quad (4.9)$$

#### 4.4.2 Energy Equation

การคำนวณอุณหภูมิของโซนปฏิกิริยาจะใช้สมการ Energy balance ร่วมกับค่าองค์ประกอบของ  $x_1$ - $x_2$  ในสมการที่ 4.1

$$\sum_{i=\text{reactants}} x_i h_{f,i}^0 = \sum_{j=\text{products}} x_j (h_{f,j}^0 + \Delta h_T) \quad (4.10)$$

เมื่อ  $x_i$  คือ จำนวน mole ของสารตั้งต้น

$h_{f,i}^0$  คือ Enthalpy of formation ของสารตั้งต้น

$x_j$  คือ จำนวน mole ของผลิตภัณฑ์

$h_{f,j}^0$  คือ Enthalpy of formation ของผลิตภัณฑ์

$\Delta h_T$  คือ sensible enthalpy ของผลิตภัณฑ์

ซึ่งจากสมการที่ 4.10 สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 4.11 ดังนี้

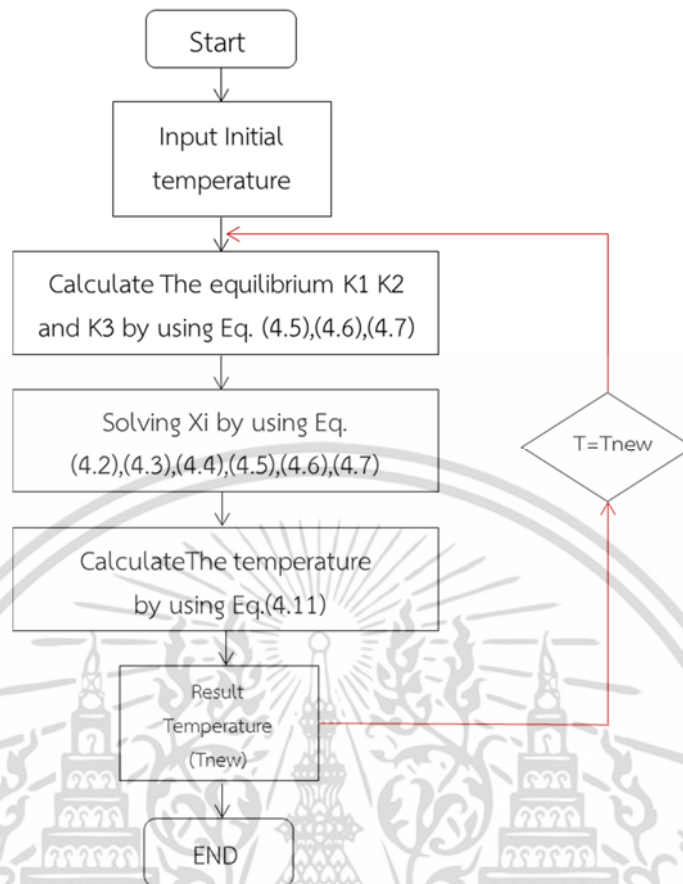
$$\begin{aligned} \Delta h_{\text{feedstock}}^0 + m h_{f,O_2}^0 + 3.76m h_{f,N_2}^0 = & x_1 (h_{f,H_2}^0 + C_{p,H_2} \Delta T) + x_2 (h_{f,CO}^0 + C_{p,CO} \Delta T) + x_3 (h_{f,CO}^0 \\ & + C_{p,CO_2} \Delta T) + x_4 (h_{f,H_2O}^0 + C_{p,H_2O} \Delta T) + x_5 (h_{f,CH_4}^0 + C_{p,CH_4} \Delta T) + x_6 (h_{f,C}^0 + C_{p,C} \Delta T) + (z/2 + \\ & 3.76m) (h_{f,N_2}^0 + C_{p,N_2} \Delta T) \end{aligned} \quad (4.11)$$

เมื่อ  $C_p$  = Specific heat at constant pressure

$T$  = change in temperature with respect to reference temperature

ค่า Enthalpy of formation ( $h_f^0$ ) ของ  $O_2$  และ  $N_2$  มีค่าเท่ากับ 0 ทำให้ 2 ตัวแปรในพจน์ซ้ายมือในสมการที่ 4.11 มีค่าเท่ากับ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กระบวนการคำนวณของ Combustion Zone

รูปที่ 4.1 แสดงกระบวนการคำนวณโดยเริ่มทำการสมมติค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (C) ในสมการ Atom balance and Equilibrium Equation (สมการ ที่ 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7) เพื่อใช้ในการคำนวณองค์ประกอบของ Syngas เมื่อได้ค่าองค์ประกอบของ Syngas ก็จะนำค่าองค์ประกอบของ Syngas ไปใช้กับสมการ Energy equation (สมการที่ 4.11) เพื่อใช้ในการหาค่าอุณหภูมิที่แท้จริง ถ้าหาค่าอุณหภูมิที่คำนวณจากสมการ Energy equation ตรงกับค่าอุณหภูมิที่สมมติขึ้นในตอนแรกก็เป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการ แต่ถ้าหาค่าอุณหภูมิที่ได้จากสมการ Energy equation ไม่ตรงกับค่าอุณหภูมิที่สมมติขึ้นให้ทำการสมมติอุณหภูมิขึ้นมาใหม่ ทำซ้ำจนค่าอุณหภูมิที่สมมติขึ้นจะตรงกับค่าอุณหภูมิที่คำนวณจากสมการ Energy equation ตรงกันซึ่งในกระบวนการคำนวณจะมีสมมติฐานดังนี้

1. เชื้อเพลิงแห้งปราศจากความชื้น และไม่มีส่วนประกอบซัลเฟอร์
2. การไหลในเตาจะพิจารณา ณ สภาวะคงตัว (Steady State)
3. พลังงานศักย์และพลังงานจลน์สามารถละทิ้งได้
4. พิจารณาเฉพาะหลักได้แก่ CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>
5. เตาแก๊สซีพีเคซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
6. เตาไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือสูญเสียความร้อน (Adiabatic)

7. ระยะเวลาในการเผาไหม้นานมากจนเข้าสู่สภาวะสมดุลทางเคมี (Chemical equilibrium)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดสอบและผลการทดสอบ

#### 5.1 การทดสอบเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น (Up – Draft Gasifier)

##### 5.1.1 ขอบเขตการทดลอง

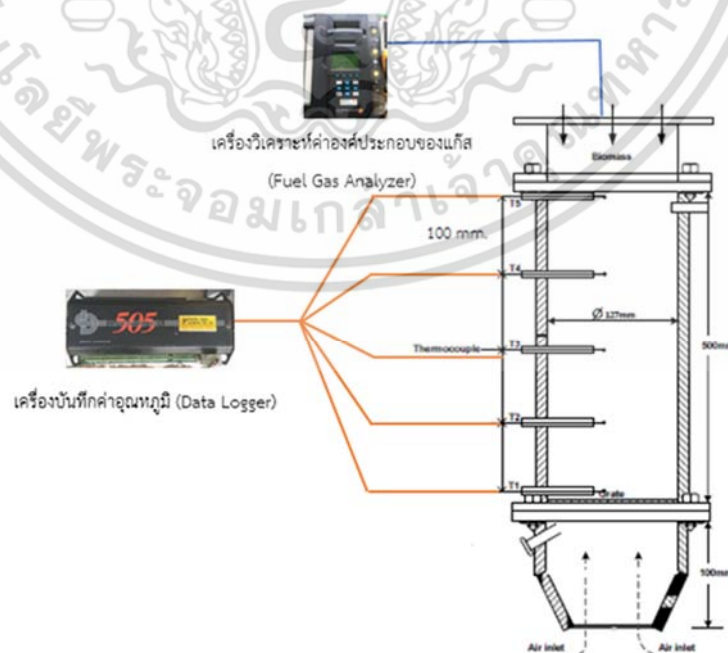
- อัตราการไหลของอากาศอยู่ในช่วง 90, 120, 150 ลิตรต่อนาที
- เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองคือ ชีลื้อยไม้ยางพาราอัดเม็ด
- ทดสอบหาค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหลของอากาศ 90, 120, 150 ลิตรต่อนาที
- เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Air flow rate of experimental (l/min)	90	120	150
Equivalent ration	3.92	2.94	2.32

##### 5.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

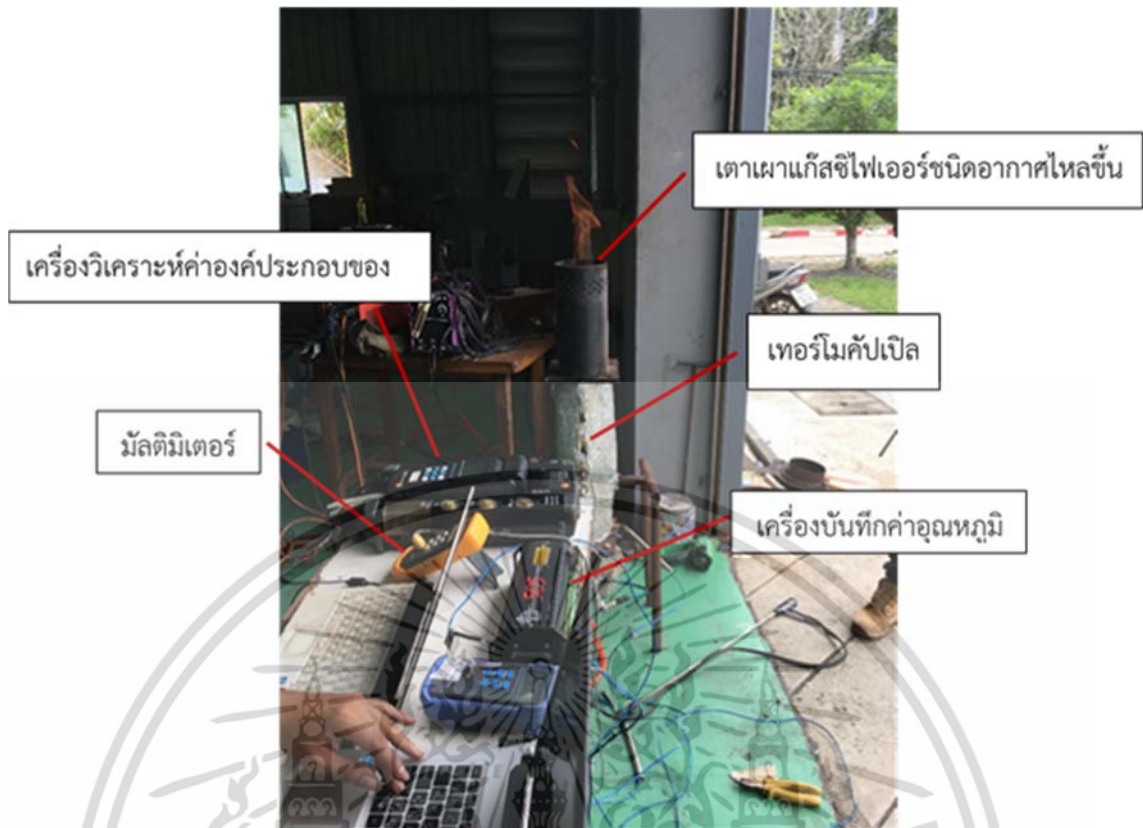
ในการทดสอบจะทำการติดตั้งเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้นและอุปกรณ์เครื่องมือวัดดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 โดยรายละเอียดของอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบดังนี้

1. เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น (Up – Draft Gasifier) ตัวเตาสร้างจากเหล็กหนา 3 mm ม้วนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 mm สูง 600 mm หุ้มฉนวนด้วยเซรามิก ไฟเบอร์หนา 2 cm มีช่องจ่ายลมด้านล่างของตัวเตา



รูปที่ 5.1 รูปแสดงแผนผังการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 รูปแสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์

2. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) รุ่น Omega FL-3940G ใช้วัดอัตราการไหลของ อากาศจากปั๊มลมจ่ายเข้าเตาเผาแก๊สซีฟเออร์ แบบ Rotameters



รูปที่ 5.3 รูปอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) รุ่น Omega FL-3940G

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (Fuel Gas Analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 – XL ใช้วัดควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ว่ามีค่าองค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิดเท่าไร



รูปที่ 5.4 เครื่องวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (Fuel Gas Analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 350 – XL

4. เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ Dataloger รุ่น 505 ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่เกิดการเผาไหม้ภายในเตาเผาแก๊สซีพีเออร์



รูปที่ 5.5 เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ Dataloger รุ่น 505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type K) ใช้วัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆที่มีการเผาไหม้ภายในเตาเผา ซึ่งต่อเข้ากับช่องรับสัญญาณของเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 5.6 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Type K)

6. มัลติมิเตอร์ (Multimeter) ใช้วัดค่าอุณหภูมิเตาเผา เทียบกับการค่าอุณหภูมิที่บันทึกด้วยเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data Logger)
7. ปี้มลม
8. เชื้อเพลิง (Fuel)



รูปที่ 5.7 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ใช้ทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 ขั้นตอนการทดสอบเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น (Up – Draft Gasifier)

1. เตรียมการติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ ตามรูปที่ 5.2
2. นำเชื้อเพลิงชีวมวลจุดไฟให้ติดไฟ แล้วนำไปใส่ในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์
3. บ้อนอากาศ โดยปรับอัตราการไหลของอากาศที่ Flow Meter (ในการทดสอบค่าองค์ประกอบของแก๊สจะทำการทดสอบที่อัตราการไหล 3 ระดับคือ 90, 120 และ 150 ลิตรต่อนาที)
4. เมื่อเชื้อเพลิงตั้งต้นติดไฟให้เติมเชื้อเพลิงใหม่ ในระหว่างนี้ให้ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ (เทอร์โมคัปเปิล) ตำแหน่งที่ 1 จะอยู่ที่ตำแหน่งล่างสุด ส่วนเทอร์โมคัปเปิลตำแหน่งที่ 5 จะอยู่ด้านบนสุด และเทอร์โมคัปเปิลตำแหน่งที่ 1 – 5 จะมีระยะห่าง ตำแหน่งละ 100 mm) Data Logger จะบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 30 วินาที เมื่อเตาเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) เริ่มบันทึกผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยใช้ Data logger บันทึกค่าทุกๆ 30 วินาที
5. สังเกตลักษณะของแก๊สที่ออกมาจากเตาเผาจะมีสีเข้ม เก็บค่าองค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องวัดแก๊ส (เครื่องวัดแก๊สจะทำการบันทึกค่าทุกๆ 2 นาที)
6. ทดสอบการติดไฟของแก๊ส

## 5.2 ผลการทดสอบค่าองค์ประกอบของแก๊สของชุดการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราอัดเม็ด ในการหาค่าองค์ประกอบของแก๊สเพื่อหาสภาวะของการผลิตก๊าซ ที่อัตราการไหลของอากาศ 3 ระดับคือ 90, 120 และ 150 ลิตรต่อนาที โดยที่ในการทดลองแต่ละครั้งนั้นจะใช้เชื้อเพลิงไม้ยางพาราอัดเม็ด 4.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อการทดสอบ 1 ครั้ง และมีการวัดอุณหภูมิภายในเตาแบ่งเป็นโซนต่างๆดังนี้ Combustion Zone, Reduction Zone, Pyrolysis Zone และ Drying Zone โดยเก็บค่าองค์ประกอบของแก๊ส ด้วยเครื่องวัดแก๊ส testo จะทำการบันทึกค่าทุกๆ 2 นาที พอครบ 2 นาทีจะต้องล้างเครื่องด้วยอากาศ (เป็นการพักการใช้งานของเครื่อง ประมาณ 2 นาที) แล้วจึงเก็บค่าใหม่

### 5.2.1 ผลการทดสอบหาค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหลของอากาศ 90 ลิตรต่อนาที

ขณะทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของชั้น Combustion Zone เท่ากับ 1,099°C อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Reduction Zone เท่ากับ 552°C อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Pyrolysis Zone เท่ากับ 218°C และ อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Drying Zone เท่ากับ 190°C และผลการวิเคราะห์แก๊สจะดูค่า CO เป็นหลักซึ่ง CO เป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ โดยค่า CO สูงสุดอยู่ที่ 27.5% และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 25.9%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ค่าอุณหภูมิของ ที่ตำแหน่ง T1 – T5 (อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง Thermocouple (°C)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6 (Exit)
14.00.00	1069.40	465.00	146.29	181.26	187.39	84
14.00.30	1072.10	488.20	151.21	184.20	190.59	87.9
14.01.00	1067.60	511.10	161.07	188.79	192.93	91.3
14.01.30	1072.10	518.40	173.91	193.21	197.63	93.3
14.02.00	1083.70	527.30	184.42	197.23	202.67	94.5
14.02.30	1090.80	539.10	194.05	201.73	207.94	95.1
14.03.00	1096.10	547.00	202.26	205.85	212.85	95.4
14.03.30	1099.60	552.70	214.61	218.54	222.24	96.3

ตารางที่ 5.2 ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที)

เวลา	ค่าองค์ประกอบของแก๊ส					
	% O <sub>2</sub>	% CO	% CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (PPM)	NO (PPM)	NO <sub>x</sub> (PPM)
14:00:55	0.50	1	12.31	-	411	432
14:01:05	0.00	8.9	12.78	-	458	481
14:01:15	-0.16	21.2	12.72	3540	508	533
14:01:25	-0.21	25.2	12.54	39394	532	558
14:01:35	-0.23	26.8	12.46	65043	550	578
14:01:45	-0.24	27.2	12.35	78529	567	595
14:01:55	-0.25	27.5	12.12	86316	583	612
14:02:05	-0.26	27.4	12.17	92285	598	628

### 5.2.2 ผลการทดสอบหาค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหล 120 ลิตรต่อนาที

ขณะทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของชั้น Combustion Zone เท่ากับ 1,274°C อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Reduction Zone เท่ากับ 528°C อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Pyrolysis Zone เท่ากับ 184°C และอุณหภูมิสูงสุดของชั้น Drying Zone เท่ากับ 178°C และผลการวิเคราะห์แก๊สจะดูค่า CO เป็นหลัก ซึ่ง CO เป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ โดยค่า CO สูงสุดอยู่ที่ 29.7% และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 24.4%

เอกสารที่ประกอบเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่าอุณหภูมิของ ที่ตำแหน่ง T1 – T5 (อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง Thermocouple (°C)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6 (Exit)
1.56.00	1222.80	388.20	149.16	177.18	171.34	85.6
1.56.30	1206.90	385.10	146.05	175.92	170.88	88.8
1.57.00	1182.90	380.00	143.30	176.96	172.59	91.3
1.57.30	1224.60	385.20	146.29	181.26	175.65	92.9
1.58.00	1256.00	488.00	151.21	184.20	178.7	94.6
1.58.30	1261.10	511.30	161.07	188.79	183.4	96.1
1.59.00	1265.90	519.00	173.91	193.21	187.39	97.0
1.59.30	1274.30	528.00	184.42	197.23	190.59	97.8

ตารางที่ 5.4 ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที)

เวลา	ค่าองค์ประกอบของแก๊ส					
	% O <sub>2</sub>	% CO	% CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (PPM)	NO (PPM)	NO <sub>x</sub> (PPM)
13:57:55	0.31	9.30	10.29	-11182	349	367
13:58:05	-0.05	15.60	10.66	-2918	410	430
13:58:15	-0.15	24.30	10.78	21910	451	473
13:58:25	-0.19	27.90	10.92	62278	482	506
13:58:35	-0.22	29.30	11.16	93119	504	529
13:58:45	-0.22	29.70	11.54	-	529	555
13:58:55	-0.22	29.60	11.78	-	542	570
13:59:05	-0.25	29.20	11.94	-	582	611

### 5.2.3 ผลการทดสอบหาค่าองค์ประกอบของแก๊สที่อัตราการไหล 150 ลิตรต่อนาที

ขณะทำการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดของชั้น Combustion Zone เท่ากับ 1,374°C อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Reduction Zone เท่ากับ 693°C อุณหภูมิสูงสุดของชั้น Pyrolysis Zone เท่ากับ 305°C และอุณหภูมิสูงสุดของชั้น Drying Zone เท่ากับ 248°C และผลการวิเคราะห์แก๊สจะดูค่า CO เป็นหลัก ซึ่ง CO เป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ โดยค่า CO สูงสุดอยู่ที่ 29.8% และมีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 25% เอกสารที่ส่งมอบที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ค่าอุณหภูมิของ ที่ตำแหน่ง T1 – T5 (อัตราการไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที)

เวลา	อุณหภูมิที่ตำแหน่ง Thermocouple (°C)					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6 (Exit)
14.4.00	1274.30	643.00	258.42	260.28	229.72	91.8
14.4.30	1265.90	651.00	268.42	267.41	235.64	94.7
14.5.00	1270.60	662.00	275.13	264.22	239.50	96.4
14.5.30	1278.80	664.00	278.28	257.48	240.95	97.8
14.6.00	1290.00	675.00	281.16	259.06	243.88	98.4
14.6.30	1300.40	676.00	286.58	260.48	248.39	98.9
14.7.00	1324.70	684.00	295.85	262.32	251.54	99.1
14.7.30	1374.20	693.00	305.20	262.32	256.00	99.1

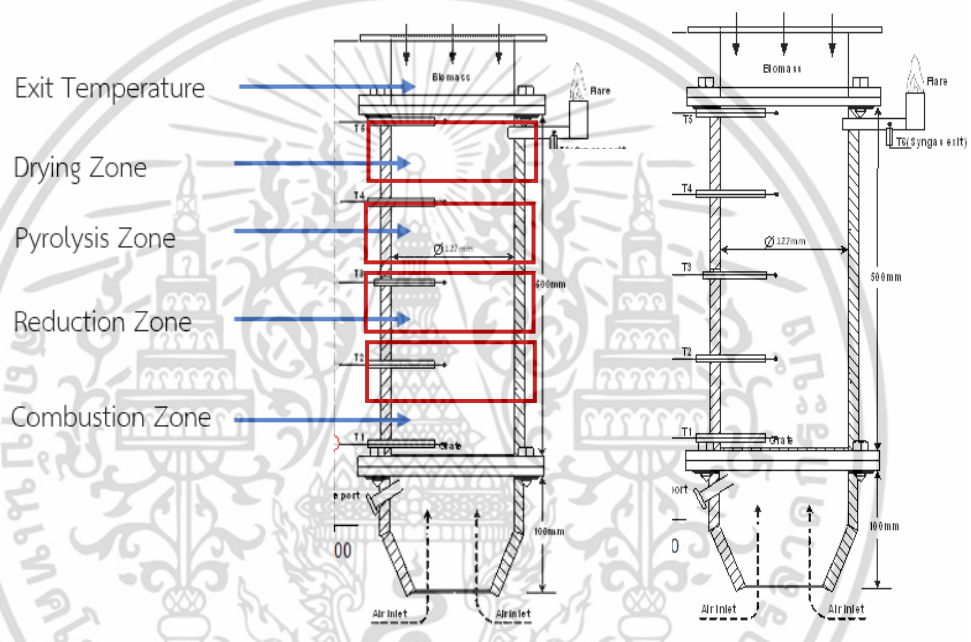
ตารางที่ 5.6 ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (อัตราการไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที)

เวลา	ค่าองค์ประกอบของแก๊ส					
	% O <sub>2</sub>	% CO	% CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> (PPM)	NO (PPM)	NO <sub>x</sub> (PPM)
14:04:45	0.410	1.20	9.61	-4505	379	398
14:04:55	-0.10	16.30	10.01	-24778	442	464
14:05:05	-0.18	23.10	9.88	9348	465	489
14:05:15	-0.22	27.70	9.88	72447	494	519
14:05:25	-0.22	28.80	9.74	94633	511	536
14:05:35	-0.21	29.60	9.41	-	529	555
14:05:45	-0.21	29.80	9.26	-	534	561
14:05:55	-0.19	29.60	8.99	-	537	564
14:06:05	-0.16	29.20	9.06	-	541	568

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

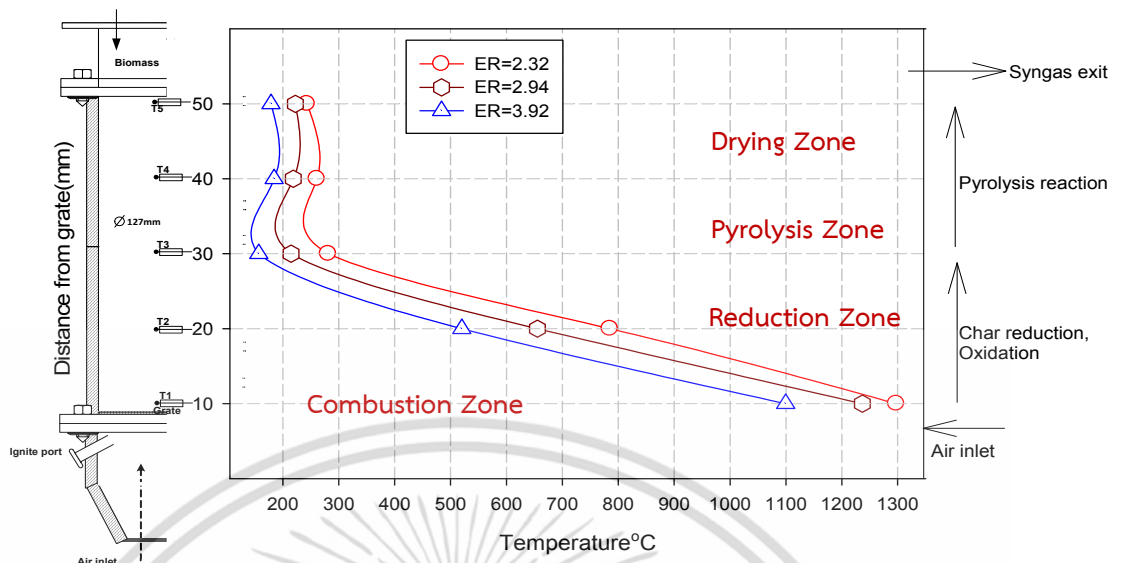
ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิของโซนการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

โซนของการเกิดปฏิกิริยา	อุณหภูมิตามทฤษฎี (°C)	อุณหภูมิจากการทดลอง (°C) ที่อัตราการไหลอากาศต่างๆ		
		90 ลิตร/นาที่	120 ลิตร/นาที่	150 ลิตร/นาที่
Drying Zone	100-135	201.78	178.82	243.20
Pyrolysis Zone	135-600	196.35	184.34	281.13
Reduction Zone	500-1000	518.60	448.10	668.50
Combustion Zone	900-1000	1081.43	1236.81	1297.36

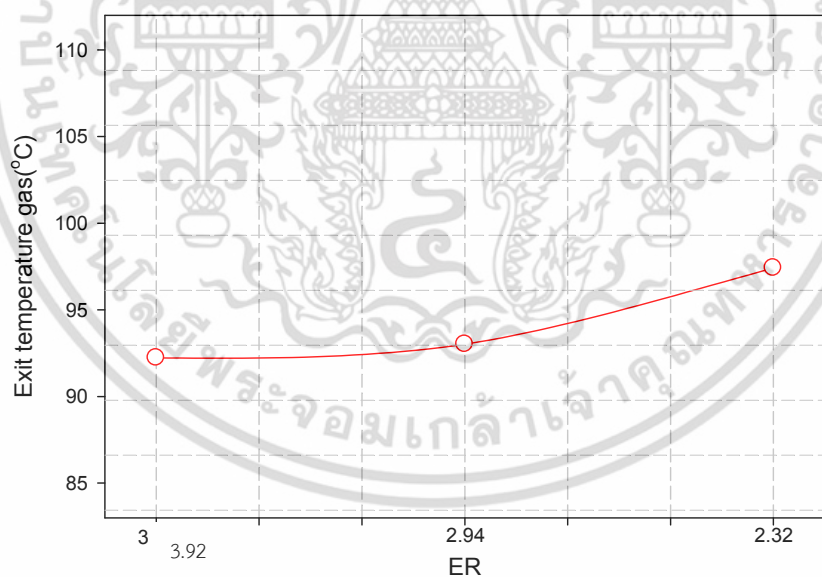


รูปที่ 5.8 แสดงโซนการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้นของการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาที่อัตราการไหลของอากาศ 90, 120, 150 ลิตร/นาที



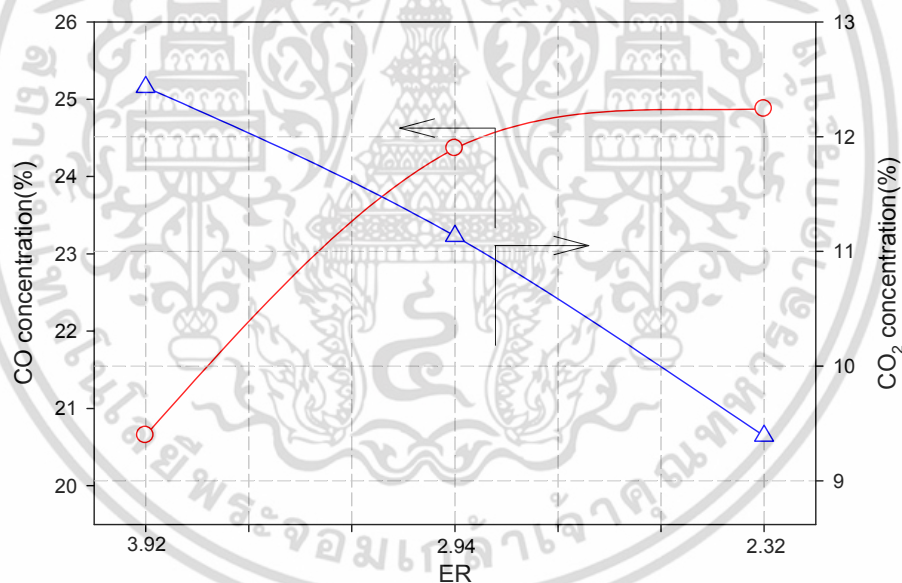
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงอุณหภูมิของ Syngas ที่บริเวณทางออกที่ที่อัตราการไหลของอากาศ 90, 120, 150 ลิตร/นาที

รูปที่ 5.9 แสดงกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวแกนที่ค่า Equivalent ratio ต่างๆของเตาปฏิกรณ์ จากผลการทดลองความแตกต่างของอุณหภูมิจะถูกแบ่งออกเป็น 2 โซนได้แก่ 1) Combustion zone คือโซนที่เกิดการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงสุด 2) โซน Reduction zone คือโซนที่

อุณหภูมิเริ่มลดลงหลังจาก Combustion zone ซึ่งผลกระทบของ Equivalent ratio เป็นพารามิเตอร์ เอกสารฉบับนี้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงกระบวนการที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊ส โดยค่า Equivalent ratio จะถูกเปลี่ยนแปลงในช่วง 2.32 ถึง 3.92 ตามอัตราการป้อนอากาศดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งจากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการลดลงของค่า Equivalent ratio มีผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตแก๊สเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Equivalent ratio ที่ลดลงมีผลทำให้ปริมาณออกซิเจนและพลังงานความร้อนที่ได้จากแก๊สทำปฏิกิริยาเข้าสู่กระบวนการเพิ่มขึ้น (เนื่องจากการจ่ายอากาศที่มากขึ้น) ซึ่งช่วยส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเตาผลิตแก๊ส ซึ่งเป็นผลให้พลังงานความร้อนถูกผลิตและถ่ายเทไปสู่โซนต่างๆในเตาผลิตแก๊สเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิในโซนต่างๆของเตาผลิตแก๊สจึงสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของ Combustion zone มีค่าเท่ากับ 1297°C, 1236°C และ 1081°C ที่ equivalent ratio เท่ากับ 2.32, 2.94 และ 3.92 ตามลำดับ.

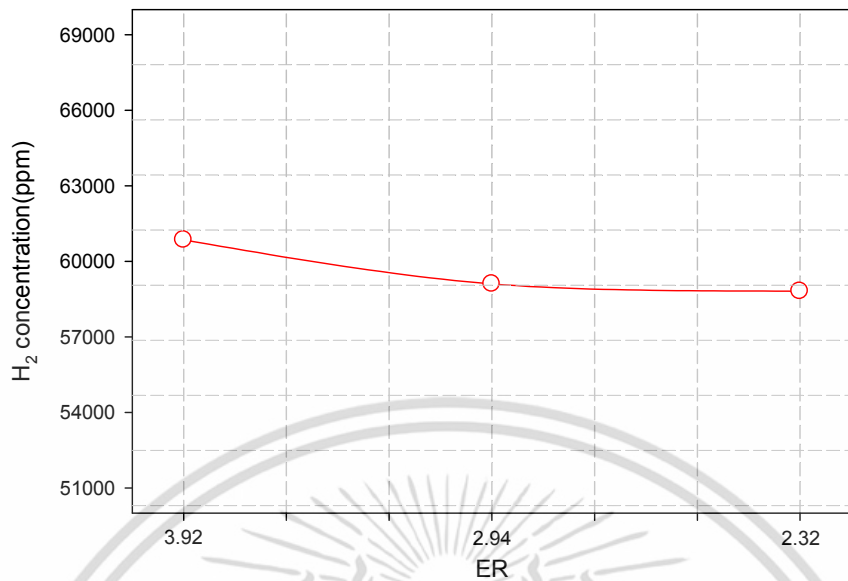
ในขณะที่พิจารณาอุณหภูมิ syngas ทางออก จะมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราการป้อนอากาศ กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่งผลให้อัตราการเกิดพลังงานภายในเตาสูงส่งผลให้อุณหภูมิ syngas ทางออกมี อัตราสูงตามไปด้วยซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Joseph H. Kihedu [18]



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงปริมาณของ CO และ CO<sub>2</sub> ที่อัตราการไหลของอากาศ 90, 120, 150 ลิตร/นาที

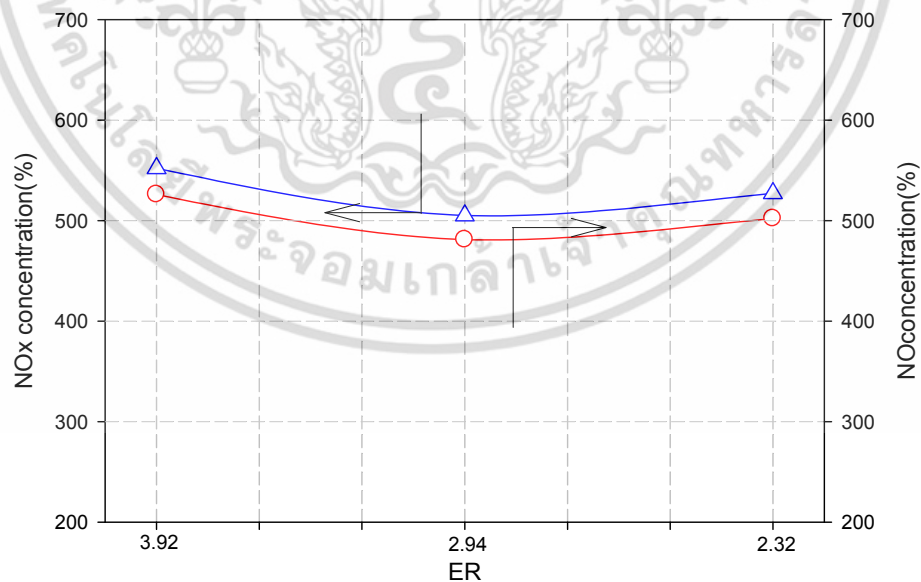
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงปริมาณของ CO และ CO<sub>2</sub> ที่ Equivalent ratio ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการลดสัดส่วน equivalent ratio (ปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณ carbon ในเชื้อเพลิงลดลง (อ้างอิง model C) ซึ่งการลดลงของปริมาณ carbon ที่เกิดจากการเผาไหม้ส่งผลให้ปริมาณ CO มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นโดยพบว่าที่ค่า equivalent ratio 2.32, 2.94 และ 3.92 มีค่า CO เท่ากับ 24.9%, 24.4% และ 20.7% ตามลำดับ ส่วนปริมาณ CO<sub>2</sub> มีสัดส่วนการลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในเตาโดยพบว่าที่ค่า equivalent ratio 2.32, 2.94 และ 3.92 มีค่า CO<sub>2</sub> เท่ากับ 9.39%, 11.13% และ 12.43% ตามลำดับ Joseph H. Kihedu [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



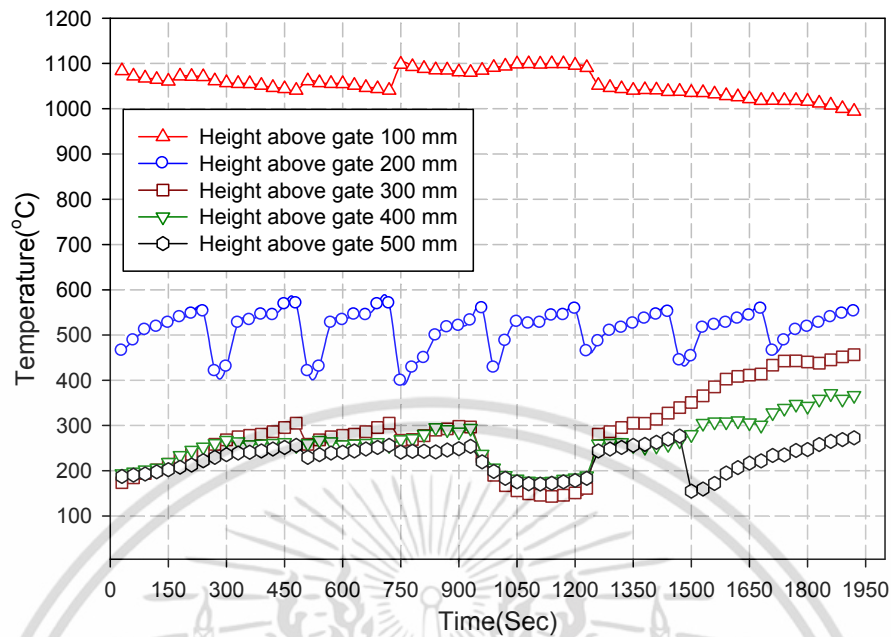
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงปริมาณของ H<sub>2</sub> ที่อัตราการไหลของอากาศ 90, 120, 150 ลิตร/นาที

รูปที่ 5.12 กราฟแสดงปริมาณของ H<sub>2</sub> ที่ Equivalent ratio ต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการลดสัดส่วน equivalent ratio (ปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น) ซึ่งส่งผลให้ H ในเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงไปเป็น H<sub>2</sub>O และ H<sub>2</sub> โดยพบว่าที่ค่า equivalent ratio 2.32, 2.94 และ 3.92 มีค่า H<sub>2</sub> เท่ากับ 58806PPM, 59102PPM และ 60851PPM ตามลำดับ Joseph H. Kihedu [18]



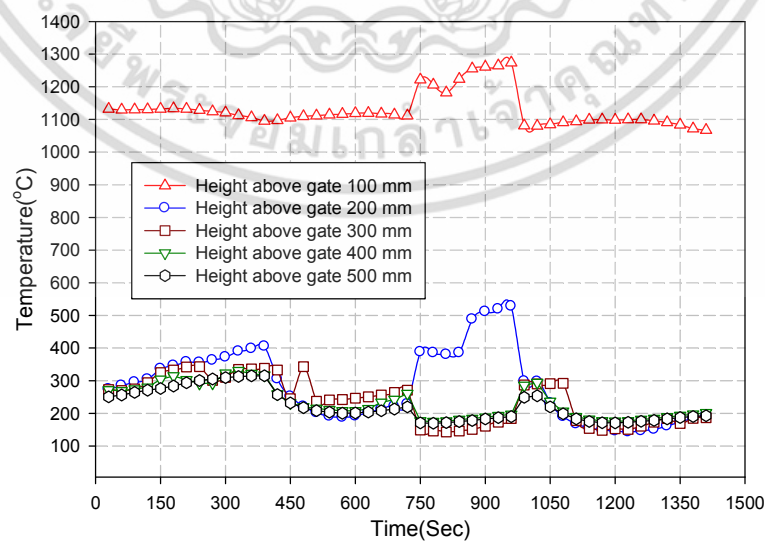
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงปริมาณของ NO<sub>x</sub> , NO ที่อัตราการไหลของอากาศ 90, 120, 150 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโซนการเผาไหม้ต่างๆที่ อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที

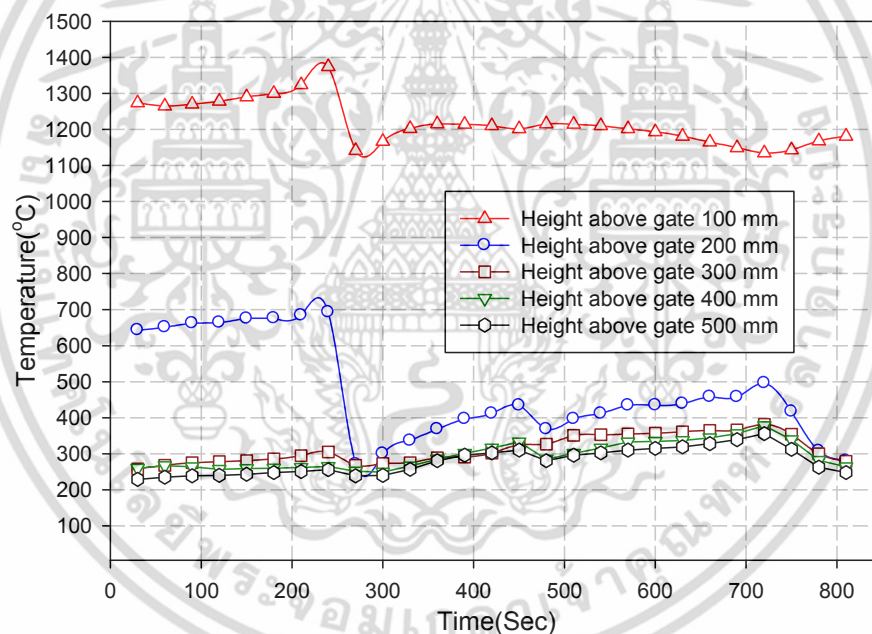
จากรูปที่ 5.14 ในการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 9 นาที เชื้อเพลิงสามารถผลิต Syngas ที่สามารถจุดติดไฟได้มีปริมาณเพียงพอที่สามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อเวลาผ่านไป เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้สารระเหยของเชื้อเพลิงในชั้นบนสุดหมดแล้วพบว่า syngas ที่บริเวณทางออกลดน้อยลงและไม่สามารถจุดติดไฟได้ เชื้อเพลิงก็จะเหลือแต่ชั้นคาร์บอนหรือเป็นการเผาไหม้ Fixed-carbon



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโซนการเผาไหม้ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคลากรภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.15 แสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโซนการเผาไหม้ต่างๆที่อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที่ของเตาแก๊สซีไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น (Up – Draft Gasifier) ที่เวลาต่างๆในการทดลอง เมื่อเริ่มการทดลองจุดเตาบริเวณด้านล่าง โดยการเผาเชื้อเพลิงบริเวณชั้นล่างสุดของตะแกรงตำแหน่ง T1 เมื่อเชื้อเพลิงติดไฟและเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดความร้อนขึ้นจะทำให้เชื้อเพลิงด้านบนปล่อยสารระเหย Volatile ออกมา โดยที่โซนการเผาไหม้จะค่อยๆลุกลามขึ้นสู่ด้านบนเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่งของ Thermocouple ตัวแรก (T1) จากนั้นจะขยับโซนขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงตำแหน่งของ Thermocouple ตัวสุดท้าย (T5) ซึ่งมีระยะห่างจากตะแกรง 50 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งด้านบนสุดของเตา ซึ่งในการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 7 นาที เชื้อเพลิงสามารถผลิต Syngas ที่สามารถจุดติดไฟได้มีปริมาณเพียงพอที่สามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อเวลาผ่านไปเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้สารระเหยของเชื้อเพลิงในชั้นบนสุดหมดแล้วพบว่า syngas ที่บริเวณทางออกลดน้อยลงและไม่สามารถจุดติดไฟได้ เชื้อเพลิงก็จะเหลือแต่ชั้นคาร์บอนหรือเป็นการเผาไหม้ Fixed-carbon



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเตาเผาของโซนการเผาไหม้ต่างๆที่อัตราการไหลอากาศ 150 ลิตร/นาที่

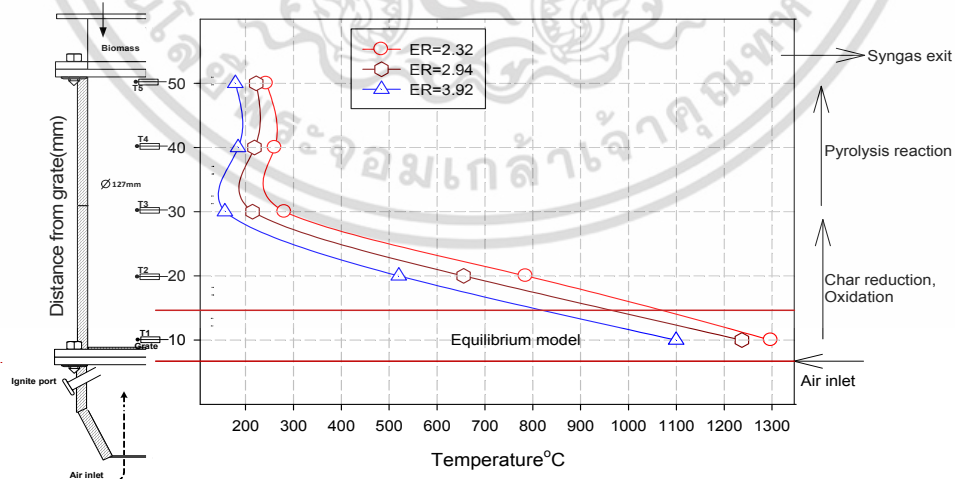
จากรูปที่ 5.16 ในการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที เชื้อเพลิงสามารถผลิต Syngas ที่สามารถจุดติดไฟได้มีปริมาณเพียงพอที่สามารถจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง และเมื่อเวลาผ่านไปเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้สารระเหยของเชื้อเพลิงในชั้นบนสุดหมดแล้วพบว่า syngas ที่บริเวณทางออกลดน้อยลงและไม่สามารถจุดติดไฟได้ เชื้อเพลิงก็จะเหลือแต่ชั้นคาร์บอนหรือเป็นการเผาไหม้ Fixed-carbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.14-5.16 ถ้าหากเปรียบเทียบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดเดียวกันที่อัตราการไหลอากาศต่างกัน จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มปริมาตรอัตราการไหลของอากาศส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงน้อยลง อย่างเช่น ที่อัตราการไหลอากาศ 120 ลิตร/นาที่ เมื่อเวลาผ่านไป 12 นาที (750 วินาที) ที่ตำแหน่ง Thermocouple (T1) มีอุณหภูมิเท่ากับ 1,256 °C ในขณะที่อุณหภูมิที่อัตราการไหลอากาศ 90 ลิตร/นาที่ เมื่อเวลาผ่านไป 12 นาที (750 วินาที) ที่ตำแหน่ง Thermocouple (T1) มีอุณหภูมิเท่ากับ 1,090 °C จากการทดลองดังกล่าวอธิบายได้ว่า ปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการเผาไหม้ที่ดีขึ้น อากาศที่เข้าไปในเตาเมื่อได้รับความร้อนที่แผ่ขึ้นมาจากโซนการเผาไหม้ด้านล่าง อากาศจะทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงและปล่อยสารระเหยออกมาเป็น Syngas โดยผลการทดลองการกระจายตัวของอุณหภูมิที่พบสามารถทำให้ระบุโซนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเตาได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Joseph H. Kihedu [18]

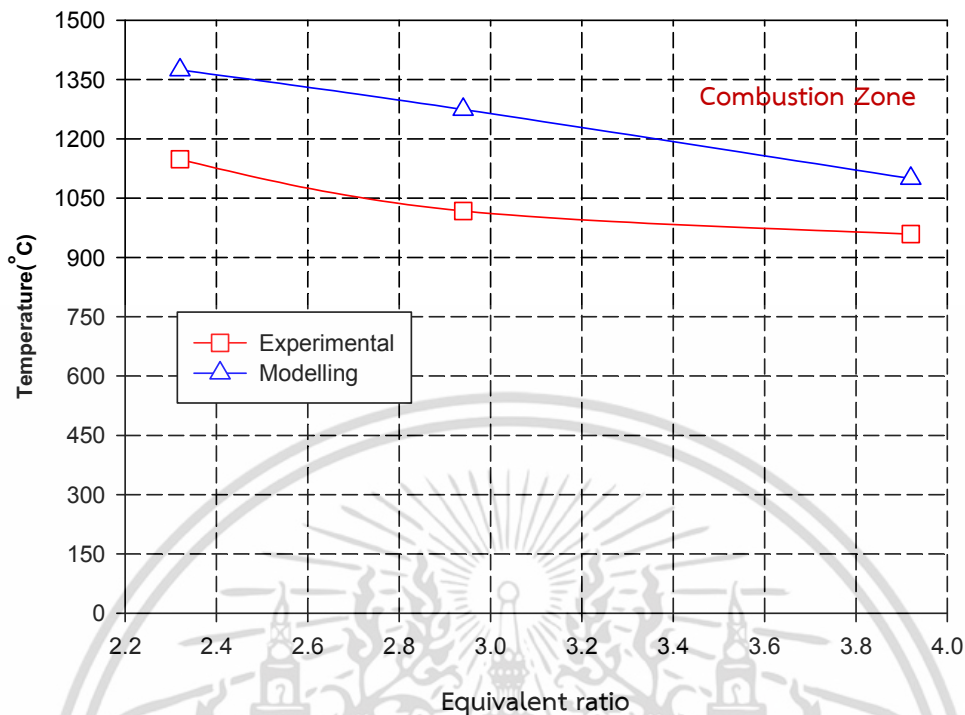
### 5.3 ผลการทดสอบของชุดการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในส่วนผลการทดลองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีการนำเสนอผลการจำลองเฉพาะของโซนปฏิกิริยา Combustion Zone ในแบบจำลองที่ได้จะนำเสนอการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาและค่าองค์ประกอบของแก๊สที่ได้ โดยการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาที่ได้จะเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และผลการทดลองจะนำเสนอการอุณหภูมิ, ประสิทธิภาพแก๊ส (CGE) และองค์ประกอบของ syngas ที่อัตรา Equivalent ratio ต่างๆ



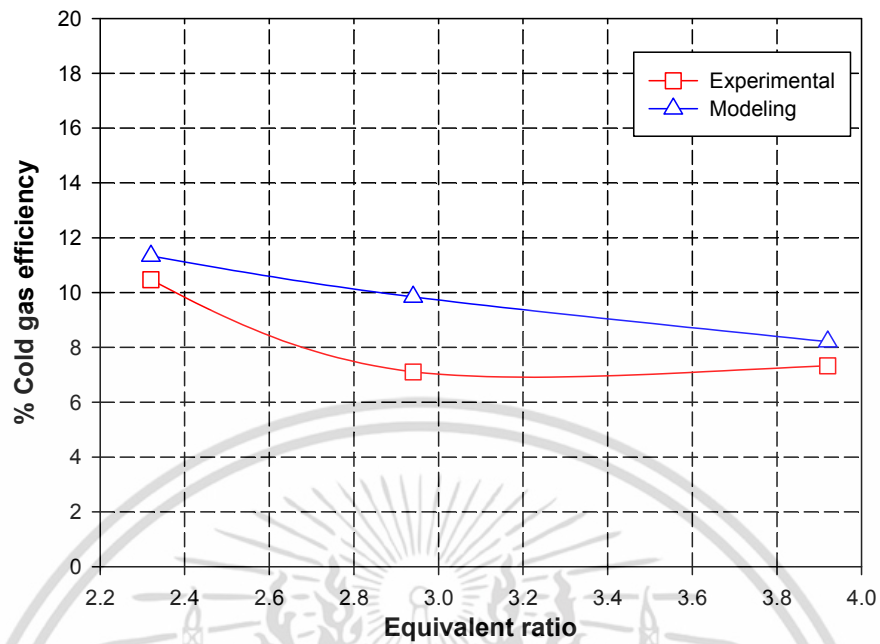
รูปที่ 5.17 แสดงโซนตำแหน่งที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

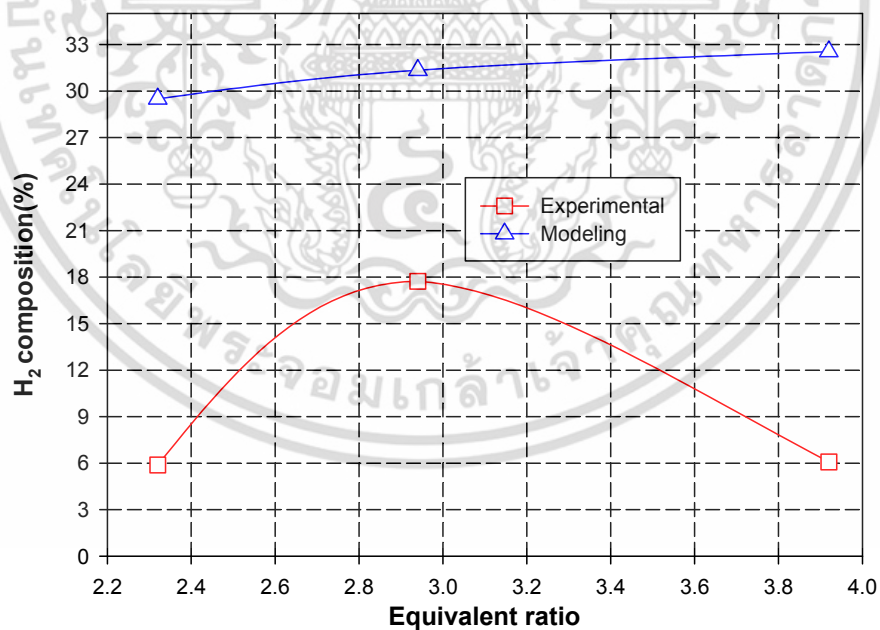


รูปที่ 5.18 แสดงค่าอุณหภูมิของ Combustion Zone เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 5.18 ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Combustion Zone ที่อัตราการไหลของอากาศ เดียวกันกับชุดการทดลองคือ 90, 120, 150 ลิตร/นาที (ที่อัตราส่วนผสม 3.92, 2.94 และ 2.32 ตามลำดับ) เปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิที่ได้ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าอุณหภูมิจากการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกันแต่ค่าอุณหภูมิจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าที่สูงกว่าการทดลอง เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการคำนวณจะมีสมมติฐานคือ เตาไม่มีการ แลกเปลี่ยนความร้อนหรือสูญเสียความร้อน (Adiabatic) และไม่คิดการสูญเสียพลังงานต่างๆ ภายในกระบวนการ

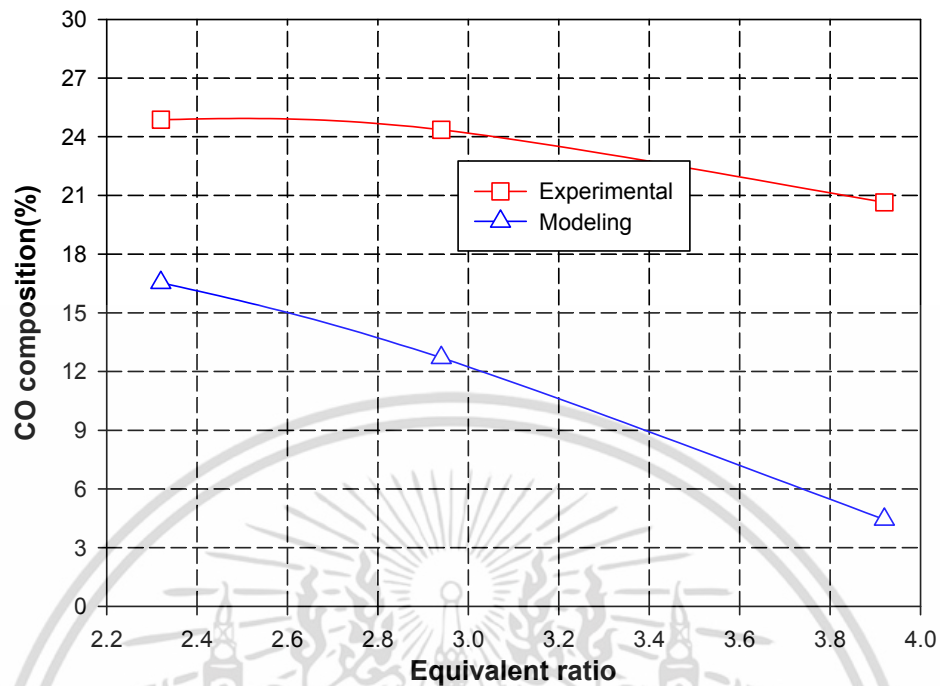


รูปที่ 5.19 แสดงปริมาณ Cold Gas Efficiency เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

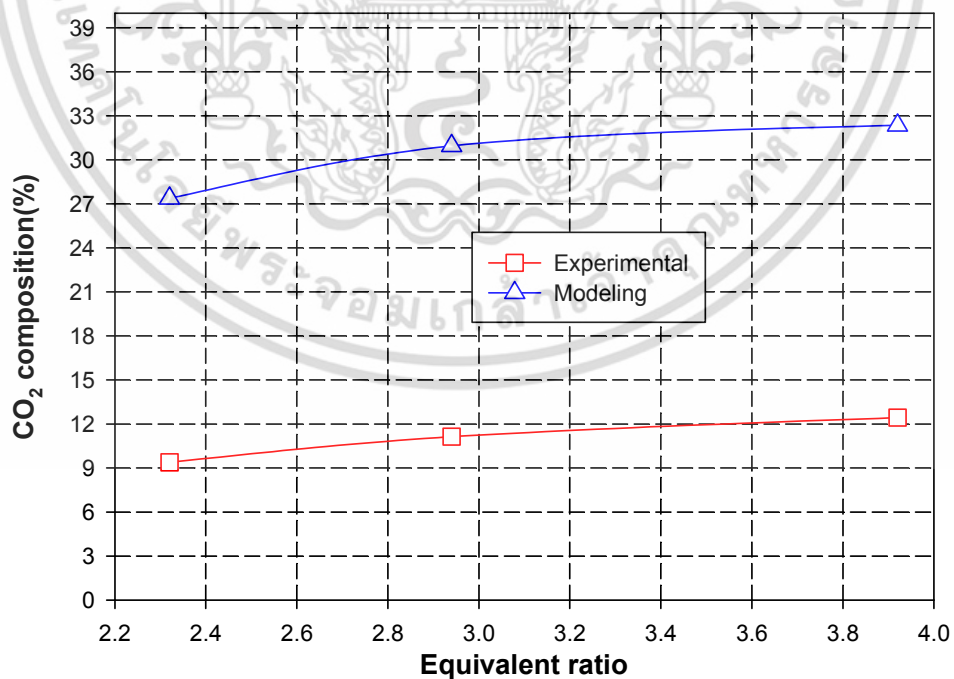


รูปที่ 5.20 แสดงปริมาณ H<sub>2</sub> เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

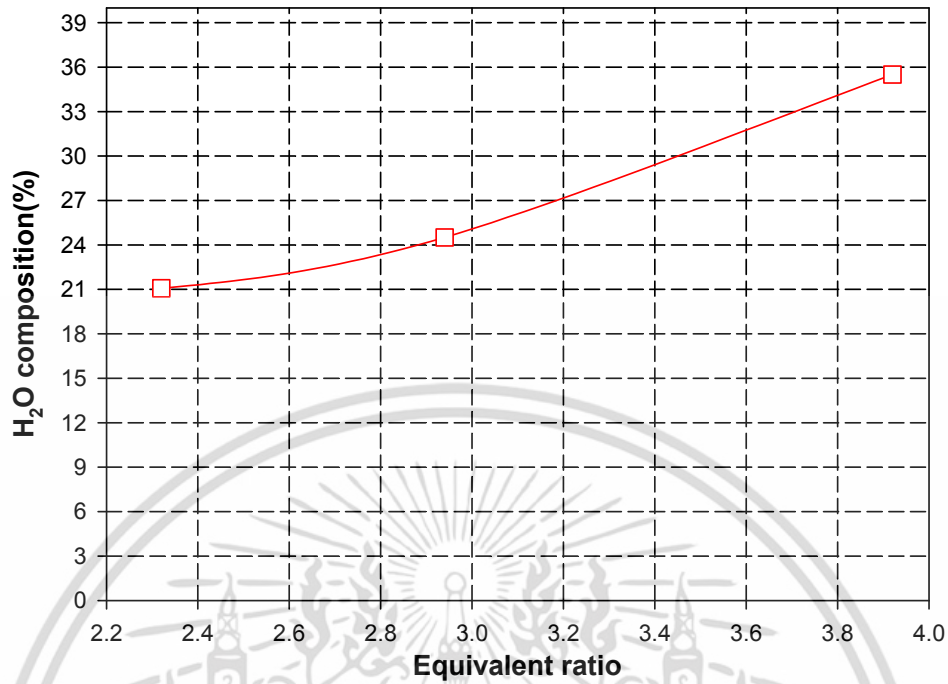


รูปที่ 5.21 แสดงปริมาณ CO เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

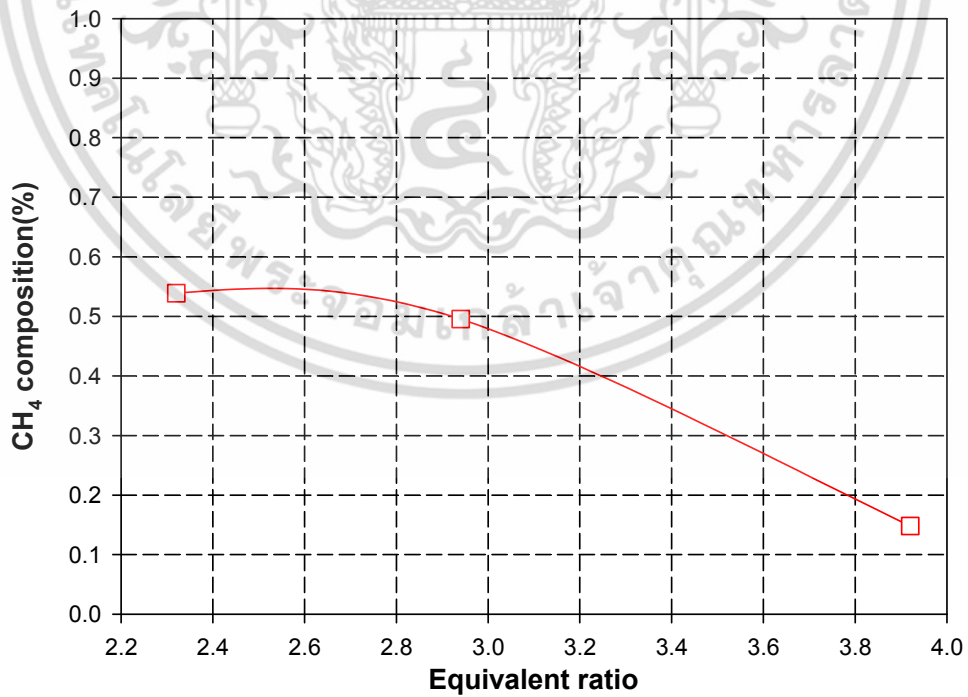


รูปที่ 5.22 แสดงปริมาณ CO<sub>2</sub> เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

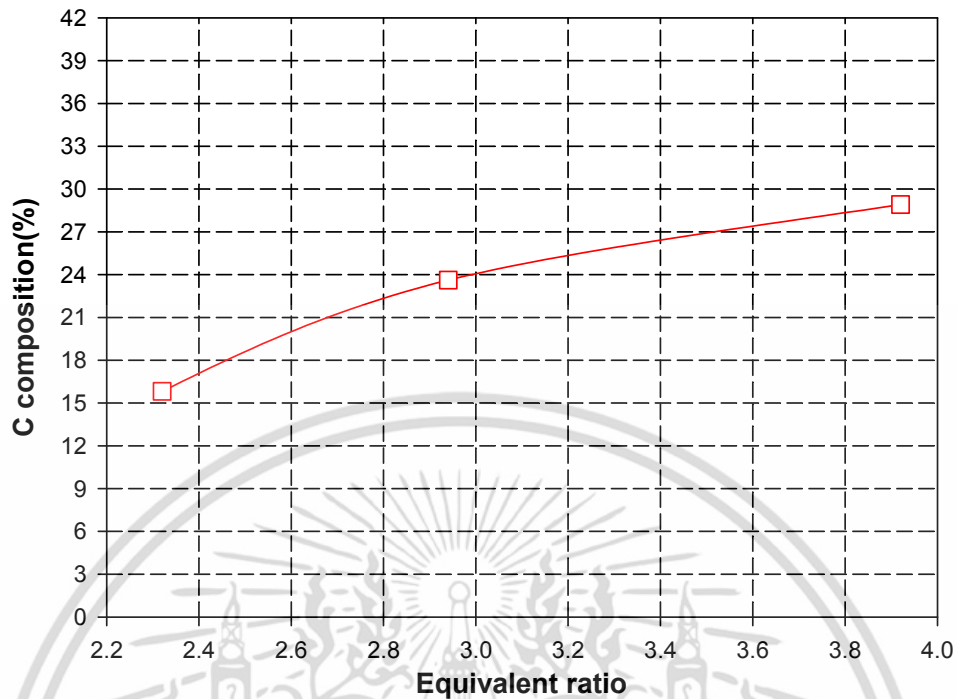


รูปที่ 5.23 แสดงปริมาณ H<sub>2</sub>O ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 5.24 แสดงปริมาณ CH<sub>4</sub> ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.25 แสดงปริมาณ C ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 5.18 – รูปที่ 5.25 ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Combustion Zone ที่อัตราการไหลของอากาศ เดียวกันกับชุดการทดลองคือ 90, 120, 150 ลิตร/นาที (ที่อัตราส่วนผสม 3.92, 2.94 และ 2.32 ตามลำดับ) ทำการเพิ่มปริมาณอากาศส่งผลให้อุณหภูมิของ Combustion zone สูงขึ้นนั้นก็เพราะปริมาณอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ดีขึ้น ขณะที่ปริมาณ carbon ในเชื้อเพลิง รูปที่ 5.22 จะลดลงตามสัดส่วนของปริมาณอากาศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของปริมาณ carbon ส่งผลให้ปริมาณ CO มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่นเดียวกับค่าองค์ประกอบของ  $\text{CH}_4$  รูปที่ 5.24 ที่มีค่าน้อยมาก

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบหาค่าองค์ประกอบของแก๊ส โดยใช้เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้น และใช้ชีลื้อยไม้ยางพาราอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง โดยทำการศึกษาที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆกัน

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทดสอบหาค่าองค์ประกอบของแก๊สโดยใช้เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้น ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ มีระยะเวลาในการทดลองครั้งละประมาณ 60 นาที โดยใช้ชีลื้อยไม้ยางพาราอัดแท่ง 4.8 กิโลกรัมต่อการทดลอง 1 ครั้ง ได้ทำการหาอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสม โดยผลการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของแก๊ส (Fuel Gas Analyzer) จากการทดสอบระหว่างการเผาไหม้จะสังเกตได้ว่า ปริมาณของ  $O_2$  จะมีค่าลดลงเรื่อยๆเนื่องจาก  $O_2$  เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง และปริมาณของ CO และ  $CO_2$  จะเพิ่มขึ้น ที่ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที ค่าองค์ประกอบของแก๊สให้ปริมาณ CO เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองเท่ากับ 24.9% เป็นค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลอีก 2 อัตราการไหล

#### ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าองค์ประกอบของแก๊สที่ 3 อัตราการไหล

อัตราการไหลอากาศ (ลิตรต่อนาที)	อุณหภูมิที่ Combustion Zone ( $^{\circ}C$ )		ปริมาณของก๊าซที่ติดไฟได้เฉลี่ย	
	สูงสุด	เฉลี่ย	CO (%)	$H_2$ (PPM)
90	1099.60	1,081.43	20.7	72313
120	1274.30	1,236.81	24.4	59102
150	1374.20	1,297.36	24.9	58809

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชนิดอากาศไหลขึ้น (Up – Draft Gasifier) ของ Combustion Zone เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศที่อัตราการไหล 90, 120, และ 150 ลิตร/นาที ที่มีผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ ค่าองค์ประกอบของแก๊สซึ่งจากผลการทดลองพบว่า

จากผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Combustion Zone ที่ได้พบว่าคุณค่าของอุณหภูมิที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยเมื่อทำการปรับอัตราการป้อนอากาศส่งผลให้การกระจายตัวของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าองค์ประกอบของแก๊สที่ได้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปเช่นกันตามอัตราการป้อนอากาศที่เปลี่ยนแปลง

ในการศึกษาตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลกระทบต่อระบบเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลขึ้น (Up – Draft Gasifier) เพื่อศึกษาลักษณะพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงที่เลือกใช้คือ ไม้เลื่อยไม้ยางพาราอัดแท่ง โดยการทดลองได้ป้อนอากาศที่อัตราการไหล 90, 120, และ 150 ลิตร/นาทีตามลำดับ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่างๆ ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าค่าอุณหภูมิแปรผันตามอัตราการป้อนอากาศ กล่าวคือเมื่อทำการป้อนอากาศที่อัตราสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งของ Thermocouple สูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ระยะเวลาการเผาไหม้ที่อัตราการป้อนอากาศต่างๆพบว่า ที่เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันแต่อัตราการป้อนอากาศต่างกันนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ก็แตกต่างกัน ซึ่งหากปริมาณอากาศมาก (Mass flow rate of oxygen) มวลของอากาศก็สามารถแทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงได้ดีจะทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ในทางกลับกันถ้าหากปริมาณอากาศน้อยการที่จะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของเชื้อเพลิงก็จะทำได้น้อยจึงส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการเผาไหม้นานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน “ดุลยภาพพลังงานของประเทศไทย” Energy Balance of Thailand 2555/2012, หน้า 4
- [2] แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) หน้า 1-2
- [3] ภัทรพันธุ์ ทองยศ. 2556. “พฤติกรรมการเผาไหม้แกลบในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดที่มีศรีรูปตัววีแยกตัว”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Sommas Kaewluan, Suneerat Pipatmanomai, Potential of sythesis gas production from rubber wood chip gasification in a bubbling fluidized beb gasifier, Energy Conversion and Management 52 (2011) 75–84
- [5] Sommas Kaewluan, Suneerat Pipatmanomai, Gasification of high moisture rubber woodchip with rubber waste in a bubbling fluidized, Fuel Processing Technology 92 (2011) 671–677
- [6] Jessica Tryner, Bryan D. Willson and Anthony J. Marchese, The effects of fuel type and stove design on emissions and efficiency of natural-draft semi-gasifier biomass cookstoves, Energy for Sustainable Development 23 (2014) 99–109
- [7] S.J. Ojolo, J.I. Orisaleye, Design and development of a laboratory scale biomass gasifier, Energy and Power Engineering, ISSN 1934–8975, USA
- [8] Fiseha M. Guangul, Shaharin A. Sulaiman and Anita Ramli, Gasifier selection, design and gasification of oil palm fronds with preheated and unheated gasifying air, Bioresource Technology 126 (2012) 224–232
- [9] Kasemsil Onthong, Kittipass Wasinarom, Kridsada Boonsiri and Jaruwat Charoensuk, Experimental and Equilibrium modeling Investigation of rice husk Stratified downdraft gasifier, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering
- [10] Kassirin Saenssree “พลังงานชีวมวล” [Online].  
Available:<http://www.energyvision.co.th/14424507>. 2560.
- [11] นิยม ศรีศิริสิทธิกุล. 2546. “เตาเผาแกลบฟลูอิดไคซ์เบดแบบอากาศหมุนวน. ”วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] T. B. Reed and A. Das Golden, Colorado. 1988. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems.
- [13] วุฒินรินทร์ มิตรสมาน, เอกรินทร์ อินถา . 2557. “การศึกษาตัวแปรเบื้องต้นที่มีผลกระทบต่อระบบเตาแก๊สชีฟายเออร์แบบไหลลง. ”ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- [14] สำเร้ง จักรใจ, การเผาไหม้. พิมพ์ครั้งที่ 1., กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2547.
- [15] การเปลี่ยนรูปพลังงานจากชีวมวล: แก๊สซิฟิเคชัน Energy Conversion from Biomass : Gasification จตุพร แก้วอ่อน จอมภพ แววศักดิ์ มารินา มะหนิ และ สุวิทย์ เพชรห้วยลึก ศูนย์วิจัยและสาธิตระบบพลังงานทดแทน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
- [16] “การเผาไหม้แบบไพโรไลซิส (Pyrolysis)”  
[Online].Available:[http://www.npcse.co.th/knowledge\\_center/npc\\_knowledge\\_detail.asp?id\\_head=3&id\\_sub=25&id=480](http://www.npcse.co.th/knowledge_center/npc_knowledge_detail.asp?id_head=3&id_sub=25&id=480)
- [17] สุรพงษ์ คล้ายमुख. 2545. “การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรตีนเคอร์แก๊สจากการเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงาน ทรัพยากรพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [18] Joseph H. Kihedu, Ryo Yoshiie, Ichiro Naruse, Performance indicators for air and air-steam auto-thermal updraft gasification of biomass in packed bed reactor, Fuel Processing Technology, 141 (2016) 93-98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## EQUILIBRIUM CODE

### MAIN SCRIPT

```

%%%%%%%%%%%% Script flow routine %%%%%%%%%%%%%
% NOTE : program include these routine for computation loop
    % prerequisitefirstalt.m
    % Energyfirst.m
    % Equilibriumeq.m ----- contain 6 equation
%%%%%%%%%%%% prerequisitefirstalt.m %%%%%%%%%%%%%
% Guess for solution vector x(1) to x(n)
% Guess for Temperature
% Assigned all variable to " construct n systems of non-linear equations "
% Solve the system of non linear equation using " fsolve "
% obtain solution x(1) to x(n)----- > (Gas composition)
% //////////////////////////////////////// %
%%%%%%%%%%%% Energyfirst.m %%%%%%%%%%%%%
% Assigned all variable pertain to " Enthalpy (energy) equation "
% Solve enthalpy ( a non-linear equation ) using " fzero "
% obtain solution " T : temperature "
% Check ( If obtain T = Guess T )
% NO ----> Guess T = obtain T then repeat the procedure
% YES ----> STOP solution is x(1) to x(n) and T

%[result,fval]=fsolve(@debugprerequisitefirstalt,Guess)

%Guess = [ 1 1 1 1 1 1 ];
%[result,fval]=fsolve(@prerequisitefirstalt,Guess)

deltl=-1000 ; %lower limit

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

deltu=3000 ; %upper limit
delt0=[deltl,deltu]; %Define the interval

% compute the root of f(delt)=0 using "fzero" function

[delt,fval,exitflag,output] = fzero('Energyfirst',delt0)

```

### Prerequisitefirstalt routine

```

function [ y ] = prerequisitefirstalt(x )
% Flow follow " Prerequisitefirst " routine

c = 1.43 ; % H element of biomass
d = 0.63 ; % O element of bioass
m = 0.5 ; % Air input to the system ( mole per 1 mole of fuel )
R = 8.314 ; % Perfect gas constant (for Ki,i=1,2,3 calculation )(KJ/Kmol-K)
z = 0.015 ; % Nitogen element of biomass

% Guess = [ 1 1 1 1 1 1 ] ; % x vector (solution guess )
%%%%%% Assign value concerning with K1,K2,K3 calculation %%%%%%%
T = 1200 ; % Guess temperature ( K )
%%%%%%%%%%%%%% Assign "DELGFO(SPECIES)" value
%%%%%%%%%%%%%%
DELGFOCO = -182.473 ; % (CO STD Giff formation @800K)
DELGFOCOT = -395.635 ; % (CO2 STD Giff formation@800K)
DELGFOHO = -203.550 ; % (H2O STD Giff formation@800K)
DELGFOCH = -50.794 ; % (CH4 STD Giff formation@298.15K)
DELGFOHY = 0 ; % (Hydrogen STD Giff formation@800K)
%%%%%%%%%%%%%% Calculate "DELGFT(Equilibrium kinetics)" %%%%%%%%%%%%%%%
DELGFTBOUD = 2*DELGFOCO - DELGFOCOT ; % Giff formation for boudourad K

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DELGFTCO = DELGFOCOT + DELGFOHO - DELGFOCO - DELGFOHO ; % Giff formation  
for co shift K

DELGFTME = DELGFOCH - 2\*DELGFOHY ; % Giff formation for methanation K

%%%%%%%%%% Calculate "K for each Kinetics constants" %%%%%%%%%%

KBOUD = exp((-DELGFTBOUD/(R\*T))) ; % K for Boudourad kinetics

KCO = exp((-DELGFTCO/(R\*T))) ; % K for CO shift kinetics

KME = exp((-DELGFTME/(R\*T))) ; % K for Methanation kinetics

%%%%%%%%%% Now having 6 equations @ designate T to export to ' Myfunctionfirst  
routine' %%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% Re-arrange into F(x)=0 form %%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% Vector y is the function value %%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% Vector x is the species mass fraction value %%%%%%%%%%

y(1)= x(2)+x(3)+x(5)+x(6)-1 ;% Carbon balance

y(2)= 2\*x(1)+2\*x(4)+4\*x(5)-c ;% Hydrogen balance

y(3)= x(2)+2\*x(3)+x(4)-d-2\*m ;% Oxygen balance

y(4)= (x(2)^2)/(x(3)\*sum(x)) - KBOUD ;% Boud equilibrium

y(5)= (x(3)\*x(1))/(x(2)\*x(4)) - KCO ;% CO shift equilibrium

y(6)= (x(5)\*sum(x))/(x(1)^2) - KME ;% Methanation equilibrium

-----  
Energyfirst routine

function [ G ] = Energyfirst( delT )

% Energy equation calculation

%%%%%%%%%% input feedstock entalpy of formation %%%%%%%%%%

m= 0.5 ;

c= 1 ;

z= 0.026 ;

x(1)= 0.2797 ;

x(2)= 0.5393 ;

x(3)= 0.2104 ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x(4) = 0.1068 \quad ;$$

$$x(5) = 0.0567 \quad ;$$

$$x(6) = 0.1935 \quad ;$$

$$\text{feedHHV} = 502928 \quad ; \quad \% \text{ feedstock HHV}$$

$$\text{hfeed} = \text{feedHHV} - (c/2) * 285830 - 393546; \quad \% \text{ feedstock enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfox} = 0 \quad ; \quad \% \text{ Oxygen enthalpy of formation ( KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfnit} = 0 \quad ; \quad \% \text{ Nitrogen enthalpy of formation ( KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfhy} = 0 \quad ; \quad \% \text{ Hydrogen enthalpy of formation ( KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfco} = -110.5 \quad ; \quad \% \text{ CO enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfcot} = -393.5 \quad ; \quad \% \text{ CO}_2 \text{ enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfho} = -241.8 \quad ; \quad \% \text{ H}_2\text{O enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfch} = -74.8 \quad ; \quad \% \text{ CH}_4 \text{ enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfc} = 0 \quad ; \quad \% \text{ carbon enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

$$\text{hfnit} = 0 \quad ; \quad \% \text{ Nitrogen enthalpy of formation (KJ/Kmole)}$$

%%%%%%%%%%%%%% Cp(direct inout)

%%%%%%%%%%%%%%

$$\text{cpc} = 20 \quad ; \quad \% \text{ Carbon cp @800K ( Check for real value)}$$

$$\text{cpch} = 35 \quad ; \quad \% \text{ CH}_4 \text{ cp @800K ( Check for real value)}$$

$$\text{cpco} = 31.86 \quad ; \quad \% \text{ CO cp @800K (KJ/Kmol-K)}$$

$$\text{cpcot} = 51.55 \quad ; \quad \% \text{ CO}_2 \text{ cp @800K (KJ/Kmol-K)}$$

$$\text{cphy} = 29.581 \quad ; \quad \% \text{ H}_2 \text{ cp @800K (KJ/Kmol-K)}$$

$$\text{cpho} = 38.587 \quad ; \quad \% \text{ H}_2\text{O cp @800K (KJ/Kmol-K)}$$

$$\text{cpnit} = 31.394 \quad ; \quad \% \text{ N}_2 \text{ cp @800K (KJ/Kmol-K)}$$

%%%%%%%%%%%%%% input Energy equation

%%%%%%%%%%%%%%

$$\text{reactenf} = \text{hfeed} + m * \text{hfox} + 3.76 * m * \text{hfnit} \quad ; \quad \% \text{ reactant enthalpy formation sum}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(1) = x(1)*(hf_{hy}+c_{phy}*\Delta T)+x(2)*(hf_{co}+c_{pco}*\Delta T)+x(3)*(hf_{cot}+c_{pcot}*\Delta T)+x(4)*(hf_{ho}+c_{pho}*\Delta T) \\ +x(5)*(hf_{ch}+c_{pch}*\Delta T)+x(6)*(hf_c+c_{pc}*\Delta T)+(z/2+3.76*m)*(hf_{nit}+c_{pnit}*\Delta T)-reactenf ; \% \\ \text{product enthalpy formation sum}$$


---



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ME-NETT 2015

The 29<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand  
The Greenery Resort Khao Yai, Pak Chong, Nakhon Ratchasima

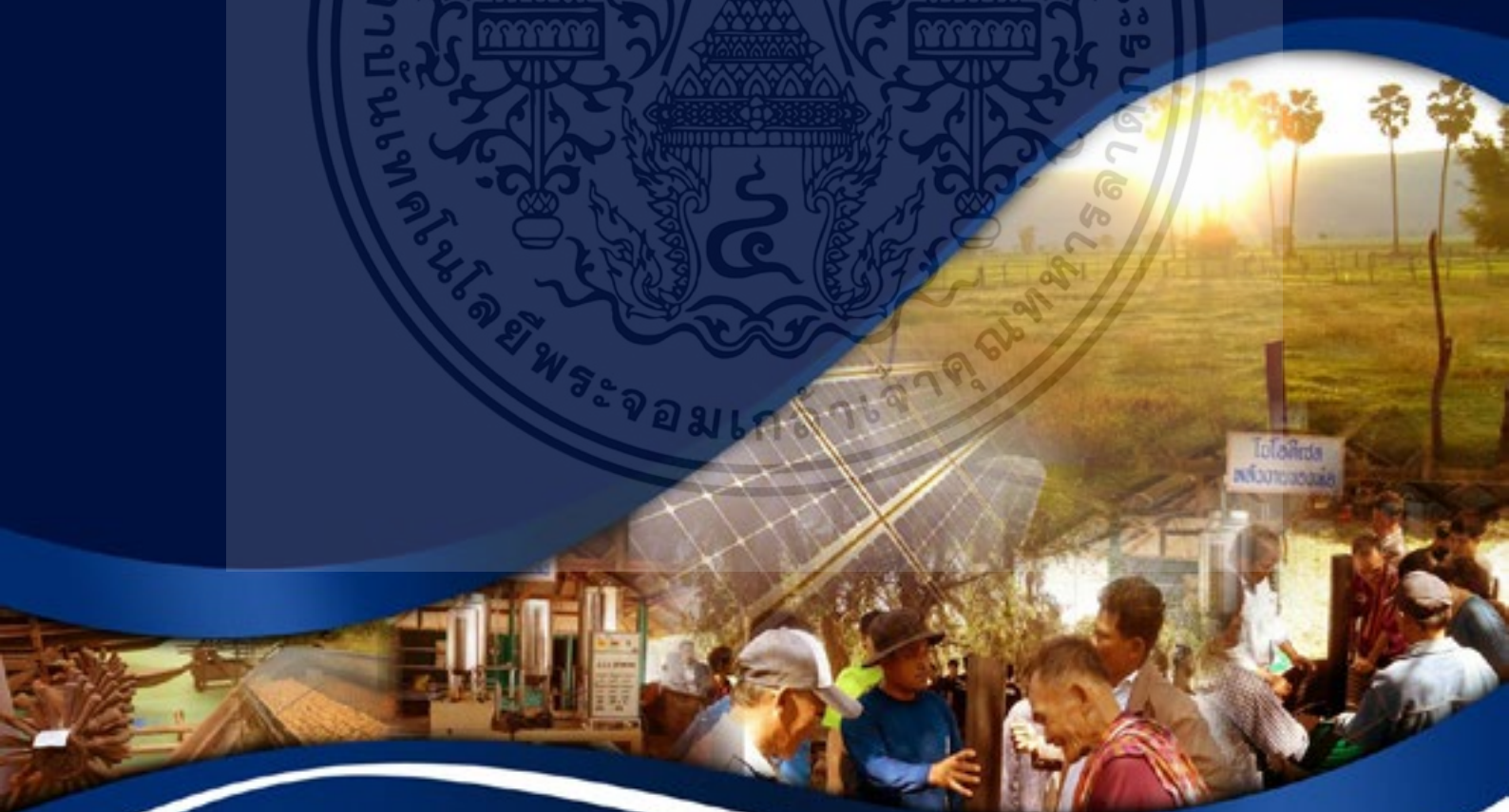
## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29

### The 29<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

1 - 3 กรกฎาคม 2558 ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่ อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา



## งานวิจัยเพื่อท้องถิ่นไทย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เนื่องในโอกาสทรงเจริญพระชนมายุครบ ๖๐ พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

## ขอพระองค์ทรงพระเจริญ

ด้วยเกล้าด้วยกระหม่อมขอเดชะ ข้าพระพุทธเจ้า

สมาชิกเครือข่ายวิศกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ซ้ำ และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยมหิดล	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ	โรงเรียนนายเรือ
มหาวิทยาลัยรังสิต	โรงเรียนนายเรืออากาศ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต	สถาบันเทคโนโลยียานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยขอนแก่น	มหาวิทยาลัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
มหาวิทยาลัยศรีปทุม	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
มหาวิทยาลัยชินวัตร	มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยศิลปากร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
มหาวิทยาลัยนเรศวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
มหาวิทยาลัยสยาม	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
	มหาวิทยาลัยปทุมธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29

1-3 กรกฎาคม 2558

โดย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ร่วมกับ



สมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ณ โรงแรมเดอะแกรีนไฮอริริสอร์ทเขาใหญ่ อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

**AEC31**

สุรเดช สินจะเป๊ะ,  
ชลธิชา ชมสระน้อย,  
แคทรียา เคนชมพู่  
และ บัณฑิต กฤตาคม

**AEC32**

เอกรงค์ สุขจิต,  
สุพรรณิ จันทร์ภิรมณ์,  
ปริญญา มาศงามเมือง,  
ศรัทธา โพธิสว่าง,  
จางค์ ผายสระน้อย,  
เพชร วุฒิमानพ  
และ กนต์ธร ธรรมกุล

**AEC33**

ปรีชา ชันติโกมล,  
ศรีสวรรค์ ทองดี,  
วิวัฒน์ อภิสัทธีภิญโญ  
และ ไมตรี พลสงคราม

**AEC35**

วิชัย สังข์แก้ว,  
สุธีระ ประเสริฐสุวรรณ,  
นันทพันธ์ นภัทธานันท์  
และ พูนสุข ประเสริฐสุวรรณ

**AEC36**

จุฑามาศ จำเนียรสวัสดิ์,  
สุดาทิพร แคว้นชาเม็ง  
และ บ้านเทิง ศิลป์สกุลสุข

**AEC37**

ศรายุทธ ดวงแก้ว,  
ศริตสรธรณ์ รุ่งแสงคำพันธ์,  
อภิสิทธิ์ จันทราช,  
คมกล้า ศิริชลธรรม,  
ปรีชา การินทร์  
และ จินดา เจริญพรพานิชย์

**AEC38**

จิรศักดิ์ ปาประกอบ,  
นัยวัฒน์ สุขทั้ง,  
เทวรัตน์ ตรีอำนาจ  
และ วีรชัย อาจหาญ

**AEC40**

กัญญา วิจิตรโสภา,  
กฤษ สมนึก  
และ กำพล ประทีปชัยกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานชีวมวลด้วยเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง  
EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON A BIOMASS POWERED – STIRLING ENGINE USING  
CHARCOAL BRIQUETTES

จุฑามาศ จำเนียรสวัสดิ์<sup>1</sup>, บรรเทิง ศิลป์สกุลสุข<sup>2</sup> และ สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

<sup>2</sup> มหาวิทยาลัยสยาม 38 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160

\*ติดต่อ: kksudara@kmitl.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ +66-2329-8351, เบอร์โทรสาร +66-2329-8352

**บทคัดย่อ**

บทความนี้เสนอการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลไกโรมบิก เครื่องยนต์ต้นแบบมีปริมาตรกวาด 122 ลูกบาศก์เซนติเมตร กระบอกสูบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55.4 มิลลิเมตร ลูกสูบมีระยะชัก มิลลิเมตรชิ้นส่วนหลักของเครื่องยนต์ประกอบด้วย ฮีตเตอร์ คูเลเตอร์ ลูกสูบก้ำลิ่ง และลูกสูบไต่ การหาประสิทธิภาพการทำงานและสมรรถนะของเครื่องยนต์ประกอบด้วย เวลาที่เครื่องเริ่มทำงานหลังจากให้ความร้อน รวมทั้งกำลังและแรงบิดที่แปรผันตามเวลา การทดสอบเครื่องยนต์ต้นแบบจะมีการเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงระหว่างแก๊สLPGและเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง ตลอดจนประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ต้นแบบ โดยใช้เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งความร้อน ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านการอัดขึ้นรูปให้มีความหนาแน่นมากขึ้น ให้ค่าพลังงานความร้อนสม่ำเสมอ ซึ่งมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 7,000 – 7,300 แคลลอรี่/กรัม ไม่มีควันและไม่เกิดประกายไฟขณะจุดติดหรือเผาไหม้ การออกแบบเตาเผาชีวมวลถูกออกแบบเพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ต้นแบบ มีโครงสร้างที่แข็งแรงสามารถรองรับน้ำหนักของเครื่องยนต์ ลดการสูญเสียพลังงานความร้อน มีอากาศไหลผ่านทางช่องลมด้านข้างเพื่อให้เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น เครื่องยนต์ต้นแบบที่ทดสอบโดยใช้แก๊ส LPG ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ให้ค่ากำลังที่ 23.1 วัตต์ ความเร็วรอบที่ 617 รอบต่อนาที ส่วนเครื่องยนต์ต้นแบบที่ทดสอบโดยใช้ถ่านอัดแท่งให้ค่ากำลังที่ 7.5 วัตต์ ความเร็วรอบที่ 532 รอบต่อนาที

**คำหลัก:** เครื่องยนต์สเตอร์ลิง; กลไกโรมบิก; เชื้อเพลิงชีวมวล; ถ่านอัดแท่ง

**Abstract**

This paper presents engine performance investigation on a Rhombic drive Stirling engine using charcoal as fuel. The prototype has swept volume of 122 cc. Dynamic components consist of the power piston and the regenerative displacer. The piston has diameter and stroke of 55.4 mm. and 46 mm, respectively. The engine characteristics have been evaluated and tested. Starting time of operation, power, torque variation and speed were measured. Charcoal is biomass fuel which forms by compression in order to obtain high density providing uniform heat without smoke and spark. The heating value of charcoal briquettes is range of 7,000 – 7,300 Cal/g. Charcoal furnace was designed and proposed. The prototype Stirling engine using gas LPG and charcoal briquette burners were compared the overall combustion efficiency in order to investigate the prototype efficiency. The prototype Stirling engine using gas LPG has the maximum power of 23.1 W at pressure of 1 bar with engine speed of 617 rpm while the experimental power was 7.5 W with engine speed of 532 rpm at the same operating condition.

**Keywords:** Stirling Engine; Rhombic drive; Biomass; Charcoal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AEC-36

### 1. บทนำ

เป็นที่ทราบที่กันดีอยู่แล้วว่าแหล่งพลังงานต่าง ๆ บนโลกเริ่มมีปริมาณลดน้อยลง มีข้อจำกัดมากมาย และในปัจจุบันมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องจนเป็นสิ่งที่ขาดแคลนและจะหมดสิ้นไปในอนาคต ซึ่งตรงข้ามกับความต้องการในการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามทิศทางของเศรษฐกิจโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันซึ่งเป็นพลังงานหลัก นอกจากนี้ยังมีผลกระทบเกี่ยวกับด้านสิ่งแวดล้อมของการผลิตพลังงาน ดังนั้นหลายประเทศกำลังพยายามมองหาแหล่งพลังงานใหม่ เพื่อนำมาทดแทนแหล่งพลังงานที่กำลังจะหมดไป เนื่องด้วยปัญหาวิกฤตพลังงานที่โลกของเรา กำลังเข้าสู่ภาวะขาดแคลนเชื้อเพลิงซึ่งเหลือใช้ไม่มากแล้วและกำลังจะหมดไปบวกกับปัญหาสถานะโลกร้อนที่เป็นแรงกระตุ้นในการลดใช้พลังงานจากฟอสซิล ทั้งนี้นอกจากการหาพลังงานทดแทนแล้วแนวทางการแก้ปัญหาอีกทางหนึ่งคือ การมุ่งศึกษาวิจัยและพัฒนาชุดเครื่องยนต์พลังงานทางเลือก ให้สามารถนำเอาพลังงานจากแหล่งอื่น ๆ ที่มีมากและยั่งยืนกว่ามาใช้แทน ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการศึกษาและพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ชุดเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเป็นเครื่องยนต์สันดาปภายนอก ที่สามารถใช้พลังงานความร้อนได้หลากหลายชนิด เช่น พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น เพื่อนำมาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกลสำหรับใช้เป็นต้นกำลังให้กับชุดเครื่องยนต์อื่น ๆ ต่อไป เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นประโยชน์ต่อการแก้วิกฤตพลังงานไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นแนวทางในการสนับสนุนใช้พลังงานทางเลือกที่สะอาดในอนาคตได้อีกด้วย [1]

Suriya Jindewa [2] ได้นำเสนองานวิจัยการปรับปรุงเครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลไกการขับเคลื่อนแบบรอมบิก ได้ทำการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Cooler Chamber) โดยใช้น้ำแทนอากาศ, ออกแบบลูกสูบใหม่ (Displacer) โดยจะทำให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากขึ้น และทำการทดสอบโดยใช้ก๊าซ LPG ให้ค่ากำลังสูงสุดที่ 23.1 W ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ความเร็วรอบที่ 617 rpm

บทความนี้เป็น การนำเสนอการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบที่มีกลไกการขับเคลื่อนแบบรอมบิกที่ใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง เพื่อนำมาเปรียบเทียบค่าสมรรถนะของเครื่องยนต์ โดยใช้ถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งความร้อน และนำเสนอการออกแบบเตาเผาชีวมวลเพื่อใช้สำหรับให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ต้นแบบ เครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ค่ากำลังตามทฤษฎีที่ 23 W ที่ความดัน 1 บรรยากาศ ความเร็วรอบที่ 900 rpm

### 2. เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลไกการขับเคลื่อนแบบรอมบิก

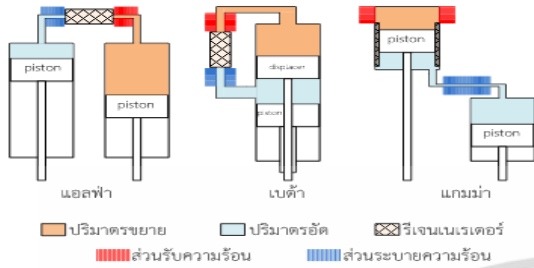
เครื่องยนต์สเตอร์ลิง (Stirling engine) ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1816 โดยโรเบิร์ตสเตอร์ลิง [3] โดยใช้หลักการการขยายตัวของก๊าซ คือก๊าซจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะหดตัวเมื่อได้รับความเย็น โดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างช่วงร้อนและช่วงเย็นในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ตามวัฏจักรสเตอร์ลิง กล่าวคือเมื่อก๊าซได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อน (Heater) ทำก๊าซมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการขยายตัวดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ หลังจากนั้นก๊าซที่ได้รับความร้อนในขั้นต้นไหลผ่านแหล่งระบายความร้อน (Cooler) ทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิต่ำลงและเกิดการหดตัวของก๊าซ ทำให้ลูกสูบเคลื่อนที่ คือ ลูกสูบไต่ (Displacer) เป็นลูกสูบที่เคลื่อนที่ภายใต้การอัดและขยายตัวของก๊าซ และลูกสูบกำลัง (Power Piston) เป็นลูกสูบที่ใช้ส่งกำลังจากเครื่องยนต์ โดยที่ปริมาตรของก๊าซจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเคลื่อนที่ของสารทำงานจะเคลื่อนที่ออกจากช่วงเย็นไปช่วงร้อน และเคลื่อนที่ออกจากช่วงร้อนไปช่วงเย็น ซึ่งทำงานในทำนองนี้กลับไปกลับมาตลอดที่ยังได้รับพลังงานความร้อนจากแหล่งพลังงานภายนอก

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้นจะอาศัยการทำงานของรีเจนเนอเรเตอร์ ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนให้กลับก๊าซที่ไหลผ่าน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย จึงทำให้มีข้อดีในด้านการใช้เชื้อเพลิงเป็นเครื่องยนต์พลังงานสะอาด ไม่มีผลกระทบในด้านสิ่งแวดล้อม เป็นเครื่องยนต์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง มีเสียงเงียบ ในขณะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AEC-36

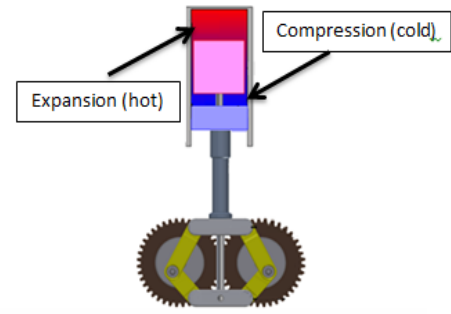
เครื่องยนต์ทำงาน ลักษณะของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ อัลฟา (Alpha) , เบต้า (Beta) , และแบบแกมมา (Gamma) โดยในแต่ละแบบจะมีวัฏจักรทางอุณหพลศาสตร์อย่างเดียวกัน



รูปที่ 1 แสดงลักษณะทางกลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

จากรูปแบบลักษณะทางกลของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ถูกจำแนกออกทั้ง 3 แบบนั้น หากพิจารณาความดันกับปริมาตรจะสังเกตเห็นได้ถึงความแตกต่างกัน งานสุทธิต่อวัฏจักรทั้งสามแบบจึงไม่เท่ากันด้วย กำลังที่ได้แต่ละชนิดจึงไม่เท่ากัน ซึ่งเครื่องยนต์แบบอัลฟาจะให้กำลังมากที่สุด ลองลงมาจะเป็นแบบเบต้า และแบบแกมมาตามลำดับ [3]

เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลไกการขับเคลื่อนแบบรอมบิก (Rhombic) เป็นกลไกที่มีความแข็งแรงและลดแรงกระทำด้านข้างของผนังกระบอกสูบ ส่งผลให้มีความสมดุลระหว่างกลไกในการเคลื่อนที่ อีกทั้งสามารถเพิ่มพลังในการผลิตได้มากกว่า กลไกรอมบิกจะต้องอาศัยเฟืองหนึ่งคู่เพื่อขับเคลื่อนกลไกจึงทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักมากขึ้น รวมทั้งในการประกอบติดตั้งต้องการความแม่นยำสูง เพราะเพลลาของลูกสูบกำลังและลูกสูบไต่อยู่ในแกนเดียวกัน จึงทำให้โครงสร้างทำงานได้ดี เพื่อให้การขับเคลื่อนของเครื่องยนต์มีความสมดุลของแรงและความแข็งแรงในการทำงาน เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลไกรอมบิกจึงมีโครงสร้างแบบเบต้า ซึ่งลูกสูบทั้งสองจะมีแนวการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกัน [3] เครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบกลไกการขับเคลื่อนรอมบิกมีลักษณะที่ใช้ในการทดสอบและขนาดตามตารางที่ 1



รูปที่ 2 เครื่องยนต์สเตอร์ลิงกลไกรอมบิก

ตารางที่ 1 ขนาดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ

ขนาดของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ	
ชนิดเครื่องยนต์	แบบเบต้า
ปริมาตรกวาด	112 cc.
ระยะชัก x เส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกสูบ	46 x 55.4 mm.
เส้นผ่าศูนย์กลางของเฟือง	87 mm.
มุมเฟส	60°
สารหล่อเย็น	น้ำ
เชื้อเพลิง	ถ่านอัดแท่ง

หัวฮีตเตอร์ ดีเฟลสเซอร์ คูลเลอร์ วอเตอร์แจ็กเก็ต



รูปที่ 3 ส่วนประกอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ

คูลเลอร์ (Cooler) หรือระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Cooling System) ทำมาจากอลูมิเนียม (เกรด 7075) โดยใช้เครื่อง CNC ในการขึ้นชิ้นงาน คูลเลอร์มี 8 ครีบ ความหนา 5 mm ลึก 19mm ต่อครีบ สวมด้วย water jacket ส่วนลูกสูบไต่จะใช้เป็น รีเจนเนอเรทีฟดิสเพลเซอร์ (Regenerative Displacer) ทำหน้าที่ไล่อากาศระหว่างด้านร้อนกับด้านเย็น โดยควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยกลไก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมายและไม่คุ้มครองใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AEC-36

รวมบิก ด้านในของลูกสูบไล่จะทำหน้าที่เก็บความร้อนเพื่อใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับให้ความร้อนในวัฏจักรต่อไป

### 3. ถ่านอัดแท่ง

พลังงานทางเลือกในยุคน้ำมันแพง ถ้าจะกล่าวถึงพลังงานทางด้านเชื้อเพลิง “ ถ่าน ” ก็เป็นส่วนหนึ่งที่ใช้ในครัวเรือนในการประกอบอาหารประเภท ปิ้ง ย่าง เป็นต้น ถ่านอัดแท่ง คือถ่านที่นำมาขึ้นรูปเป็นแท่งหรือเป็นก้อนเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน หลักการผลิตถ่านอัดแท่งมี 2 วิธีคือ การอัดร้อน เป็นการอัดวัสดุด้วยความร้อน จะมีสารในเนื้อของวัสดุยึดตัวมันเอง จึงทำให้สามารถยึดเกาะเป็นแท่งได้โดยไม่ต้องใช้ตัวประสาน เช่น แกลบ ชี้เลื่อย เป็นต้น และอีกวิธีหนึ่งคือ การอัดเย็น เป็นการอัดวัสดุที่เผาไหม้มาแล้ว แล้วนำมาผสมกับแป้งมันหรือวัสดุประสานอื่นๆในอัตราส่วนตามที่ต้องการ [4]

ราคาของถ่านอัดแท่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการผลิตถ่านอัดแท่ง ราคาโดยทั่วไปจะอยู่ประมาณ กิโลกรัมละ 15 – 20 บาท ซึ่งจะมีราคาสูงกว่าถ่านไม้ แต่ถ้าเปรียบเทียบคุณภาพและระยะเวลาการเผาไหม้ถือว่าคุ้มค่าง่าถ่านไม้

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง[4]

คุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง	
1.ให้ค่าความร้อนสม่ำเสมอ	7,000 – 7200 kcal/kg
2.ใช้งานได้นานกว่าถ่านไม้	2 – 3 เท่า
3.ค่าความชื้น	7.1% - 7.8%
4.ปริมาณคาร์บอน	81.0% - 83.0%
5.กลิ่น	ไม่มี

ข้อดีของถ่านอัดแท่ง

- 1.ปลอดภัยไม่มีสารตกค้าง และไม่ทำลายสุขภาพ
- 2.ไม่เกิดการประทุอย่างถ่านไม้ทั่วไป
- 3.ไม่มีควัน
- 4.ไม่ดับกลางคัน



รูปที่ 4 ถ่านอัดแท่งที่ใช้ในการทดสอบ

### 4. เตาเผาชีวมวล

จากปัญหาการใช้พลังงานเชื้อเพลิงน้ำมันที่มากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามพลังงานที่มีอยู่กลับน้อยลง ทำให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ อีกทั้งราคาราคาพลังงานยังสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้พลังงานทางเลือกเป็นสิ่งที่สามารถทดแทนพลังงานน้ำมัน ทั้งยังเป็นพลังงานที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการผลิตที่ต้องการใช้ความร้อน จึงเน้นไปที่เชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากผลิตผลทางการเกษตร [5] เพื่อสร้างเตาเผาชีวมวล (Biomass Furnace) ซึ่งสามารถเผาเชื้อเพลิงที่เหลือใช้จากผลิตผลทางการเกษตร เนื่องจากเป็นชีวมวลที่มีค่าความร้อนที่เหมาะสม เช่น ถ่านอัดแท่ง ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส และเศษไม้ยางพาราอัดแท่ง ในการออกแบบเตาเผาชีวมวลก็มีหลากหลายรูปแบบ ขึ้นกับการออกแบบนำไปใช้งานให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้ [6] สำหรับงานวิจัยนี้เตาเผาชีวมวลถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับเผาถ่านอัดแท่ง (Charcoal Briquettes) ที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ โดยเปรียบเทียบกำลังของเครื่องยนต์เมื่อให้ความร้อนด้วยถ่านอัดแท่งกับให้ความร้อนด้วยก๊าซ LPG ซึ่งได้ทำการทดลองให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ด้วยก๊าซ LPG ที่อัตราการไหล 0.3 กก./ชม. (4,166.66 W) [2] ดังนั้นจึงคำนวณหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงของถ่านอัดแท่งที่ทำให้ได้กำลังเท่ากับก๊าซ LPG ซึ่งต้องใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเท่ากับ 0.51 กก./ชม.

ข้อดีของการออกแบบเตาเผาชีวมวล โดยเตาชีวมวลนี้ถูกออกแบบให้มีลักษณะใช้งานง่าย มีโครงสร้างที่แข็งแรงรองรับน้ำหนักของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ลดการไม่ว่การฉีกใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำออกให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AEC-36

สูญเสียพลังงานความร้อน มีช่องสำหรับใส่เชื้อเพลิง (ถ่านอัดแท่ง) ที่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ตลอดเวลา และภาคสำหรับรองรับขี้เถ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง มีช่องลมสำหรับให้อากาศไหลผ่านทางด้านข้าง เพื่อให้เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดีขึ้น

### 4.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้ คือ ปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง ๆ ซึ่งสารเผาไหม้ได้หลัก 3 ตัว คือ คาร์บอน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์ แล้วจะปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีซึ่งเป็นการรวมตัวของออกซิเจนเข้ากับคาร์บอน ไฮโดรเจนและซัลเฟอร์เกิดสารประกอบใหม่คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและซัลเฟอร์ไดออกไซด์[7]

เชื้อเพลิงแข็ง (ถ่านอัดแท่ง) มีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ คาร์บอนคงที่ ฉะนั้น เมื่อเผาไหม้สารระเหยง่ายและกัมมันต์จะทำปฏิกิริยาไปจนหมดก่อน เหลือคาร์บอนเผาไหม้ไปเรื่อย ๆ จะถึงจุดสมบูรณ์หรือไม่ขึ้นกับปริมาณอากาศและเวลาทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปมักพบว่ามีส่วนของคาร์บอนหลงเหลืออยู่กับขี้เถ้าด้วยเสมอ

ปริมาณอากาศสำหรับการสันดาป คือ การสันดาปอย่างสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีปริมาณของออกซิเจนหรืออากาศเพียงพอที่จะทำให้สารในเชื้อเพลิงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้จนหมดสิ้นพอดี ปริมาณอากาศดังกล่าวเรียกว่า ปริมาณอากาศทางทฤษฎีคือ อัตราส่วนระหว่างมวลของอากาศทางทฤษฎีกับมวลเชื้อเพลิง เรียกว่า Stoichiometric Ratio[7]

ตัวอย่าง แสดงการหาอากาศ ในการสันดาปของ มีถ่านอัดแท่ง  $C_{50}H_{11}$  [8] ให้สมบูรณ์

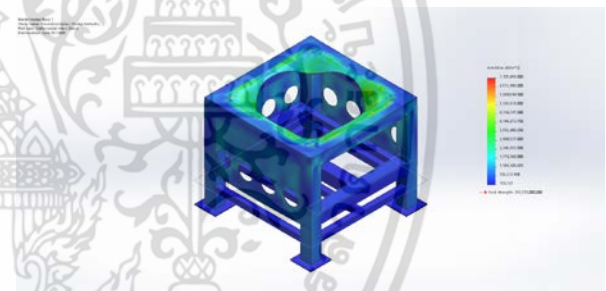


จากสมการดังกล่าว จะสามารถคำนวณได้ว่าถ้าต้องการสันดาปถ่านอัดแท่ง 0.51 กก./ชม.จะต้องใช้อากาศอย่างน้อย 6.037 กก. จึงจะทำให้เกิดการสันดาปถ่านอัดแท่งได้อย่างสมบูรณ์

### 4.2 ลักษณะการออกแบบ

ในการออกแบบเตาเผาชีวมวลเพื่อใช้สำหรับให้ความร้อนแก่เครื่องยนต์ต้นแบบ ต้องออกแบบให้สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ 0.51 กก./ชม.และอัตราการป้อนอากาศอย่างน้อย 6.037 กก. (อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิง เท่ากับ 11.83 ) โดยจะใช้โปรแกรม Solid works ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์การเลือกวัสดุที่สามารถรองรับน้ำหนักและแรงสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ โดยรูปแบบของเตาเผาจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ

ส่วนแรก ตัวฐานของเตาจะมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมเลือกใช้วัสดุเหล็กกล่อง AISI 1020 ใช้เป็นห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะประกอบไปด้วยถาดสำหรับใส่เชื้อเพลิงและถาดรองรับขี้เถ้าจากการเผาไหม้ รอบ ๆ ตัวฐานจะเจาะรูทั้งหมด 3 ด้าน ดังรูปที่ 5 เพื่อให้มีอากาศไหลผ่านทางช่องลมด้านข้างเข้าไปช่วยให้เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของตัวฐานของเตาเผาจะมีน้ำหนักรวมทั้งหมด 5.27 กก.

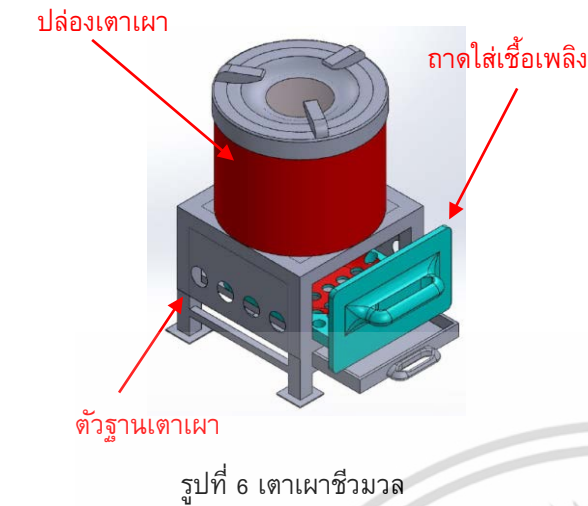


รูปที่ 5 แสดงลักษณะตัวฐานของเตาเผาและการทดสอบการรับแรง

ส่วนที่สอง ตัวปล่องของเตาจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกลวง ทำจากวัสดุเหล็กแผ่น AISI 1020 ถูกอัดแน่นด้วยขี้เถ้า ที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ด้านบนของตัวปล่องจะมีฝาปิดที่ถูกเจาะรูตรงกลาง ที่มีขนาดพอดีกับหัวฮีตเตอร์ของเครื่องยนต์ต้นแบบ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงออกสู่ภายนอก ทำให้หัวฮีตเตอร์ได้รับความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในส่วนของตัวปล่องเตาเผาจะมีน้ำหนักรวมทั้งหมด 1.5 กก. ดังรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AEC-36



### 5. การทดลอง

ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์หาค่าประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อที่จะหาค่ากำลัง (Power), ความเร็วรอบ (Engine Speed) และแรงบิด (Toque) โดยใช้ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่ชุดเครื่องยนต์ ซึ่งการหาค่ากำลังของเครื่องยนต์จะใช้วิธี Rope Brake แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งวิธีนี้จะสามารถหาค่าแรงบิดของเครื่องยนต์ โดยใช้ล้อช่วยแรง (Flywheel) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 cm. ใส่ตุ้มน้ำหนัก (1ก้อนหนัก 10g.) ตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของล้อช่วยแรง และอ่านค่าน้ำหนักจากตาชั่งดิจิตอล ในการวัดอุณหภูมิด้านน้ำเข้าและด้านน้ำออกจะใช้ Thermocouples ชนิด K (ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1.5\%$ ) ส่วนความเร็วรอบของเครื่องยนต์วัดจาก Digital Tachometer (รุ่น Digicon DT-250T ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.1$  rpm)

- การหาแรงบิด (Toque) ของเครื่องยนต์ หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = (w1 - w2) R \quad (1)$$

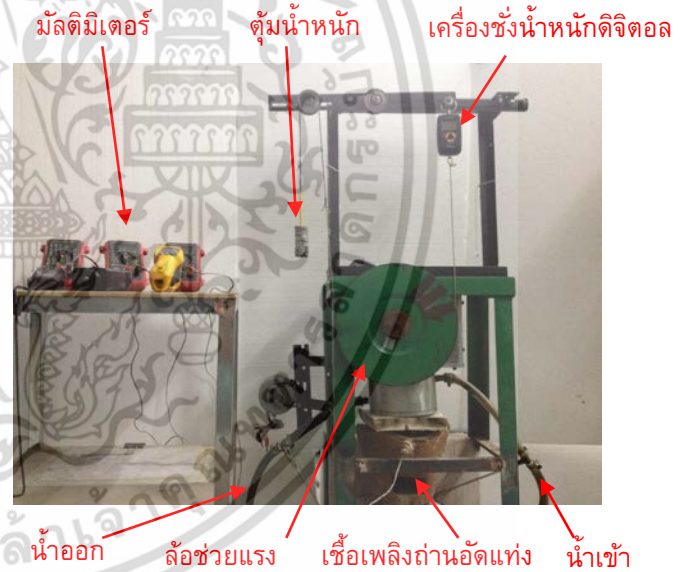
เมื่อ  $w1$  และ  $w2$  คือค่าที่อ่านได้จากสปริง (Spring Balance) และ  $R$  คือค่า Brake drum radius

- การหาค่ากำลัง (Power) ของเครื่องยนต์ หาได้จาก

$$P = 2\pi TN / 60 \quad (2)$$

เมื่อ  $N$  คือค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

ในการทดลองจะใช้ถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งพลังงาน ความร้อนอัตราการเผาไหม้ 0.5 kg/hr. เครื่องยนต์จะเริ่มทำงานที่นาที่ที่ 4.30 (min), อุณหภูมิฮีตเตอร์เท่ากับ 375°C, ความเร็วรอบเท่ากับ 103 rpm, อุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกเท่ากับ 29°C และ 30°C ตามลำดับ เติมถ่านทุกๆ 3 นาที ใส่ถ่านเพิ่ม 0.025 kg.



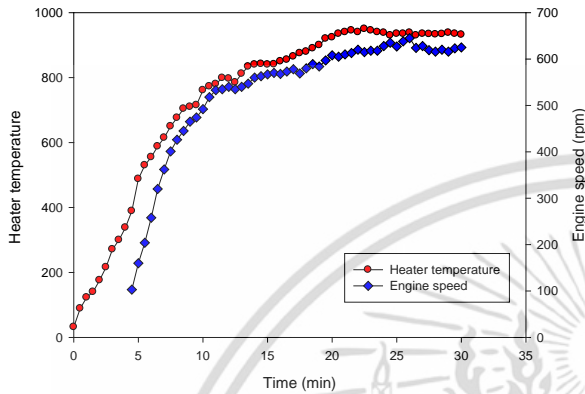
### 6. ผลการทดลอง

จากการทดลองใช้ถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งพลังงาน ความร้อนให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่ความดันบรรยากาศ อัตราการเผาไหม้ 0.5 kg/hr ได้ผลการทดลองดังนี้

## AEC-36

### 6.1 ความเร็วรอบเครื่องยนต์

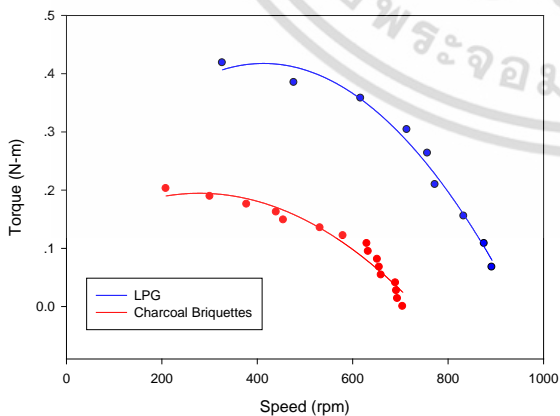
จากการทดสอบชุดเครื่องยนต์หาค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบใช้ถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งความร้อนโดยไม่อัดความดันได้ค่าความเร็วรอบแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ที่เวลาเดียวกัน

จากรูปที่ 9 ชุดเครื่องยนต์เริ่มทำงานที่ความเร็วรอบที่ 103 rpm อุณหภูมิของฮีตเตอร์อยู่ที่ 389 °C หลังจากอุณหภูมิของฮีตเตอร์และความเร็วรอบของเครื่องยนต์เข้าสู่สภาวะคงที่ จะได้ค่าอุณหภูมิของฮีตเตอร์ประมาณ 900 °C และความเร็วรอบของเครื่องยนต์ 584 rpm

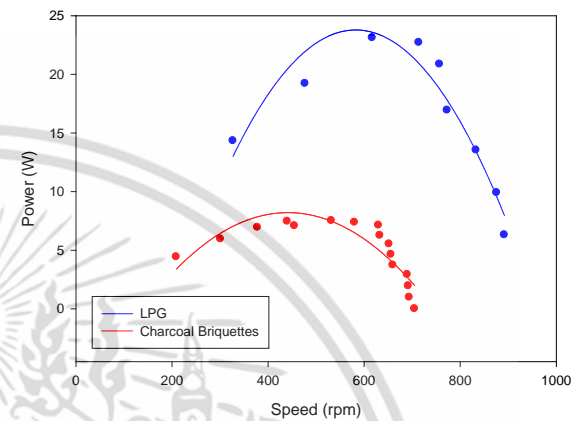
### 6.2 แรงบิดของเครื่องยนต์



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและแรงบิดของเครื่องยนต์

จากรูปที่ 10 แสดงแรงบิดของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบ 584 rpm อุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ 900 °C แรงบิดของเครื่องยนต์จะลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 209 rpm จะได้แรงบิดสูงสุดที่ 0.2 Nm.

### 6.3 กำลังของเครื่องยนต์



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกำลังของเครื่องยนต์

รูปที่ 11 แสดงกำลังของเครื่องยนต์ที่แปรผันตามความเร็วรอบ กำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 7.5 W ที่ความเร็วรอบ 532 rpm

## 7. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบกลไก รอมบิกมีปริมาตรกวาด 122 ลบ.ซม โดยใช้เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งความร้อนในการหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ ประกอบด้วย กำลัง, แรงบิด, และค่าความเร็วรอบ เพื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบการใช้ถ่านอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิงนำมาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพกับชุดเครื่องยนต์ต้นแบบที่ใช้ก๊าซ LPG ผลการทดสอบที่ใช้ถ่านอัดแท่งเป็นแหล่งความร้อนเปรียบเทียบกับก๊าซ LPG ดังนี้

ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ได้จากการทดสอบด้วยถ่านอัดแท่ง เครื่องยนต์เมทำงานที่ความเร็วรอบที่ 103 rpm อุณหภูมิฮีตเตอร์เท่ากับ 389 °C ในขณะที่ก๊าซ LPG เครื่องยนต์จะเริ่มทำงานที่ความเร็วรอบที่ 128 rpm อุณหภูมิฮีตเตอร์เท่ากับ 309 °C

แรงบิดของเครื่องยนต์ที่ได้จากการทดสอบด้วยถ่านอัดแท่ง ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 209 rpm จะได้แรงบิดสูงสุดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AEC-36

0.2 Nm. ในขณะที่ทดสอบด้วยก๊าซ LPG ที่ความเร็วรอบ 327 rpm ได้แรงบิดสูงสุดที่ 0.42 Nm.

กำลังของเครื่องยนต์ที่ได้จากการทดสอบด้วยถ่านอัดแท่งได้กำลังสูงสุดเท่ากับ 7.5 W ที่ความเร็วรอบ 532 rpm ในขณะที่ทดสอบด้วยก๊าซ LPG ได้กำลังสูงสุดเท่ากับ 23.1 W ที่ความเร็วรอบ 617 rpm

จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ต้นแบบที่ทดสอบด้วยเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งนั้นมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้กับสิ่งแวดล้อมในขณะที่ทำการทดลอง ทำให้หัวฮีตเตอร์ของเครื่องยนต์ได้รับความร้อนไม่เต็มประสิทธิภาพ อันเนื่องมาจากเตาเผาที่ใช้ทำการทดสอบเป็นเตาเผาอั้งโล่ธรรมดา รูปทรงไม่รองรับกับหัวฮีตเตอร์ของเครื่องยนต์ จึงได้มีการออกแบบเตาเผาชีวมวลสำหรับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงต้นแบบ เพื่อลดการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงออกสู่ภายนอก ทำให้หัวฮีตเตอร์ได้รับความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องยนต์ดีขึ้นตามลำดับ

### 8. เอกสารอ้างอิง

[1] Kongtragool B, Wongwises S. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2003;7:131-54

[2] Kwankaomeng, S., Kongtrakool, B., Silpsakoolsook, B. and Jindewa, S (2013). Improvement of a Rhombic Drive Stirling Engine Using Biomass Fuel, 4<sup>th</sup> TSME International Conference on Mechanical Engineering, (16-18), October 2013.

[3] Walker G. (1980). *Stirling engines*. Oxford Clarendon Press, Calgary.

[4] บริษัทCharcoal snmcenter. ขั้นตอนการผลิตถ่านอัดแท่งด้วยกรรมวิธีอัดร้อนคุณภาพสูง, แหล่งที่มา [http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/Line\\_product.php](http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/Line_product.php), เข้าดูเมื่อวันที่ 25/03/2558.

[5] เครือข่ายความร่วมมือเพื่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วท.) เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าพลังงานทางเลือกในยุคนี้มาแบ่ง, แหล่งที่มาไม่จำกัดใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[http://www.clinictech.most.go.th/online/pages/techlist\\_display.asp?tid=384](http://www.clinictech.most.go.th/online/pages/techlist_display.asp?tid=384), เข้าดูเมื่อวันที่ 19/03/2558.

[6] ธนภฤต แก้วมณี (2556). *รายงานการออกแบบและพัฒนาเตาเผาชีวมวลเพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์น้ำมันดินภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, หน้า1-33

[7] M. M. El-Wakil, (1984). *Powerplant Technology*, McGraw-Hill

[8] J. Pastor-Villegas, J.F. Pastor-Valle, J.M. Meneses Rodriguez and M. Garcia Garcia. Study of commercial wood wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 76 (2006), pp. 103 – 108.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คำขอบริการที่ สนพ. 154/60

ที่ ทป. 669-09/60

## รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์

ให้แก่

คุณจุฑามาศ จำเนียรสวัสดิ์

การทดสอบ / วิเคราะห์ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง (ขี้เลื่อยไม้ยางพารา)

วิธีทดสอบ / วิเคราะห์ ASTM D 7582, D 5373, D 4239 and D 5865

ผลการทดสอบ / วิเคราะห์

คุณสมบัติ	สภาพนำส่ง	สภาพนำหนักแห้ง
ความชื้น, %	9.32	-
สารระเหย, %	71.34	78.67
ถ่านคงตัว, %	14.11	15.56
เถ้า, %	5.23	5.77
ไฮโดรเจน, %	6.42	5.94
คาร์บอน, %	42.69	47.08
ไนโตรเจน, %	0.47	0.51
ออกซิเจน, %	45.07	40.57
ซัลเฟอร์, %	0.12	0.13
ค่าความร้อนสูง, กิโลแคลอรี/กก.	3,950	4,360
ค่าความร้อนต่ำ, กิโลแคลอรี/กก.	3,630	4,000

ผู้ทดสอบ / วิเคราะห์

1.

2.

คำพงษ์ พรหมเพชร

ผู้รับรอง



(ดร. สมชาย ตารารัตน์)

ผู้อำนวยการ

ผู้ตรวจสอบ

(ดร.ปริสสุทธิ์ จันทรวงศ์ไพศาล)

ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม

วันที่ 20 กันยายน 2560

ผลการทดสอบ/วิเคราะห์นี้ รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ได้ทำการทดสอบ / วิเคราะห์เท่านั้น

ห้ามนำผลการทดสอบ / วิเคราะห์ ไปโฆษณาโดยมิได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจาก วว.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวจุฑามาศ จำเนียรสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	2 มกราคม 2531
ที่อยู่	301/102 หมู่บ้านกิตติเนวส์น ซอยรามคำแหง 68 ถนนรามคำแหง หัวหมาก กทม.
ประวัติการศึกษา	ปี 2554 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผลงานทางวิชาการ	“การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์สเตอร์ลิงพลังงานชีวมวลด้วยเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่ง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 , 1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการทำงาน	
2554 – 2560	บริษัทวิศวภัทร จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรเครื่องกล
2560 – ปัจจุบัน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตำแหน่ง วิศวกรเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้