



การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม  
ระหว่างก๊าซชีววมวลจาก เหง้ามันสำปะหลัง-ปาล์มไบโอดีเซล



ณัฐวิตร คงบำรุง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



INVESTIGATION ON COMBUSTION CHARACTERISTIC AND  
PERFORMANCE OF ENGINE USING DUAL FUEL BETWEEN CASSAVA  
RHIZOME BIOMASS GAS AND PALM BIODIESEL

NATTIWAT KONGBUMRUNG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
MAJOR IN MECHANICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
UBONRATCHATHANI UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2016

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

เรื่อง การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซชีววมวล  
จากเห้งน้ำมันสำปะหลัง-ปาล์มไบโอดีเซล

ผู้วิจัย นายณัฐวัตร คงบำรุง

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก

ประธานกรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์

กรรมการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง

กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีการศึกษา 2559

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยศุทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการทำวิจัย ตลอดจนให้กำลังใจในการขับเคลื่อนการดำเนินงานวิจัยเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาของการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณท่านประธานกรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. กุลเชษฐ เพียรทอง และขอขอบพระคุณท่านประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษ สมนึก จากภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และเจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือ สนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดาที่เลี้ยงดูส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาที่ดี ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านทั้งหลายข้างต้น ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ณัฐวิตร คงบำรุง  
ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

- เรื่อง : การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์เชื้อเพลิง  
ร่วมระหว่างก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง-ปาล์มไบโอดีเซล
- ผู้วิจัย : ญญิวัตร คงบำรุง
- ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
- สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
- อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์
- คำสำคัญ : คุณลักษณะการเผาไหม้, สมรรถนะเครื่องยนต์, ก๊าซชีววมวล, เครื่องยนต์  
เชื้อเพลิงร่วม

เหง้ามันสำปะหลังเป็นของเหลือทิ้งจากการทำเกษตรกรรมชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ผลิตก๊าซชีววมวลเพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้ ก๊าซชีววมวลมีการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เป็นเวลานานแล้ว แต่การวิจัยเกี่ยวกับคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเครื่องยนต์ยังมีอยู่น้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีววมวล รวมถึงทดสอบสมรรถนะ มลพิษ และคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้ก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วมกับปาล์มไบโอดีเซลซึ่งมีค่าซีเทนสูง

ทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดี่ยว แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง ก๊าซชีววมวลผลิตโดยใช้เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงขนาด 50 กิโลวัตต์ความร้อน ทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 0-715.8 kPa โดยปรับสัดส่วนก๊าซชีววมวลให้ทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลให้ได้สูงสุดที่ภาระต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลังสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่อัตราส่วนการทดแทนร้อยละ 67.57 ที่ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 500.38 kPa ส่วนคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมมีรูปแบบการปล่อยความร้อนและการเผาไหม้ ช่วง Premixed combustion และ Mixing control combustion ที่กว้างกว่าการใช้ น้ำมันดีเซลอย่างเดียว รวมถึงค่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบมีค่าลดลง 10-18 บาร์ในช่วงภาระ 0-500 kPa ขณะที่ความล่าช้าในการจุดระเบิดและระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น 2-5 องศาเพลนซ์ต่อวินาที เมื่อพิจารณาจากไอเสียพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงภาระเครื่องยนต์ต่ำและลดลงเมื่อภาระเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นแต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าการใช้ น้ำมันดีเซลอย่างเดียวทุกช่วงภาระ ในขณะที่ออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง 20-250 ส่วนในล้านส่วน

## ABSTRACT

TITLE : INVESTIGATION ON COMBUSTION CHARACTERISTIC AND PERFORMANCE OF ENGINE USING DUAL FUEL BETWEEN CASSAVA RHIZOME BIOMASS GAS AND PALM BIODIESEL

AUTHOR : NATTIWAT KONGBUMRUNG

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : MACHANICAL ENGINEERING

ADVISOR : ASST. PROF. PRACHASANTI THAIYASUIT, Ph.D.

KEYWORDS : COMBUSTION CHARACTERISTICS, ENGINE PERFORMACE, PRODUCER GAS, DUAL FUEL ENGINE

The Cassava Rhizome is waste from agricultural, that can be used to produce producer gas as a renewable energy, which has long been used as a fuel in engines, however, very few researches about the combustion characteristics have been done. In this study, the combustion characteristic and performances of Cassava Rhizome Biomass Gas – palm bio diesel high cetane dual fuel mode are investigated.

In dual fuel mode, the single cylinder, direct injection, diesel engine mounting with in-cylinder pressure transducer is used in the combustion characteristic study. Producer gas from cassava rhizome, is generate from 50kW<sub>th</sub> double throat downdraft gasifier. The combustion and emission characteristics of dual fuel engine are investigated at constant speed 1500 rpm at various brake mean effective pressure (bmep) loads between 0-715.8 kPa and various diesel-gas input ratio for maximum diesel saving ratio of each load. It is shown the cassava rhizome can be used to produce producer gas used as dual fuel in diesel engine, Which maximum diesel fuel saving about 67.57% bmep 500.38kPa by engine can operate at a stable. The combustion characteristic of dual fuel mode have premixed combustion and mixing control combustion range wider than diesel mode, Cylinder peak pressure decreased by 10-18 bar various (bmep) 0 – 500 kPa while the ignition delay is increased 2 – 5 °CA, And the CO emission of duel fuel mode is higher than diesel mode, NO<sub>x</sub> is increased by 20-250 ppm depending on the bmep

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ก๊าซชีวมวล	5
2.2 สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล	5
2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล	8
2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	15
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิง	23
2.6 ชนิดของเตาแก๊สซิฟายเออร์	26
2.7 พารามิเตอร์และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง	32
2.8 เครื่องยนต์ก๊าซชีวมวล	35
2.9 สมรรถนะและตัวแปรในการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวมวล เป็นเชื้อเพลิง	36
2.10 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด	40
2.11 การแปรผันของการเผาไหม้ระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักร	43
2.12 การวิเคราะห์ความดันในกระบอกสูบ	44
2.13 การน็อคในเครื่องยนต์ดีเซล	46
2.14 ไบโอดีเซล	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15 เหน้้ำมันสำปะหลัง	49
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	52
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์การทดลอง</b>	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง	56
3.2 เชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง	61
3.3 การวัดค่าตัวแปรในการทดลองและคำนวณ	63
3.4 วิธีการทดลอง	66
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล</b>	
4.1 อัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลและสมรรถนะของเครื่องยนต์	68
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้	71
4.3 ผลการวัดมลพิษ	75
4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	76
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษเมื่อใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วม	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>79</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>83</b>
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>86</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยสำรวจและประเมินเมื่อปี พ.ศ. 2556	2
2.1	ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบต่างๆ	8
2.2	การวิเคราะห์ชีวมวลโดยการประมาณค่าของชีวมวลชนิดต่างๆ	11
2.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลแบบแยกธาตุของชีวมวลชนิดต่างๆ	12
2.4	ค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ	15
2.5	ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลประเภทต่างๆ	20
2.6	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	23
2.7	องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไป	24
2.8	การเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและการทำงานของเตาเผา	32
3.1	รายละเอียดเครื่องยนต์ทดสอบ	58
3.2	ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวัดไอเสีย	62
3.3	องค์ประกอบของก๊าซชีวมวลที่ได้จากการวิเคราะห์	63
3.4	คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	63
4.1	ปริมาณน้ำมันดีเซลและปาล์มไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดสอบและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ในแต่ละภาวะเมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันดีเซลอย่างเดียวและเชื้อเพลิงร่วมและอัตราทดแทนสูงสุดในแต่ละภาวะ	69
4.2	ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ก๊าซชีวมวลจากเห่ง้ำมันสำปะหลัง	77

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและความหนาแน่นของชีวมวล	7
2.2	ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่าตามเกณฑ์ 11	
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง	13
2.4	ภาพรวมของกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	16
2.5	กระบวนการระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิงชีวมวล	17
2.6	กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน	19
2.7	การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของถ่านชาร์	21
2.8	ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในชั้นเผาไหม้	22
2.9	สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	22
2.10	ลักษณะของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบแก๊สไหลขึ้น	26
2.11	ลักษณะของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบแก๊สไหลลง	27
2.12	ลักษณะคอคอดและการจ่ายลมของเตาแบบแก๊สไหลลง	28
2.13	บริเวณการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ	29
2.14	ลักษณะของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง	30
2.15	ลักษณะของเตาแบบชั้นของไหล	31
2.16	ตัวอย่างเตาแบบชั้นของไหลหมุนวน	31
2.17	ตัวอย่างของกราฟระหว่างความดันและปริมาตรกระบอกสูบของ (ก) เครื่องยนต์สองจังหวะ (ข) เครื่องยนต์สี่จังหวะ	36
2.18	อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงทั่วไป แสดงช่วงต่างๆของการเผาไหม้	42
2.19	กราฟของการปล่อยความร้อนรวมและสุทธิในช่วงการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล	46
2.20	เปรียบเทียบระยะเวลาของการสะสมเชื้อเพลิง	47
2.21	เส้นโค้งแสดงการจุดระเบิดล่าช้าและการน็อคในเครื่องยนต์ดีเซล	48
2.22	คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล	49
2.23	ต้นมันสำปะหลัง	50
2.24	รากมันสำปะหลัง	51
2.25	เหง้ามันสำปะหลัง	51
3.1	การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง	56

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.2	ระบบผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในการทดลอง	57
3.3	แบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในการทดลอง	57
3.4	เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการทดสอบ	58
3.5	เซนเซอร์วัดองศาเพลาช้อเหวี่ยง	59
3.6	เซนเซอร์วัดความดันในห้องเผาไหม้	59
3.7	เครื่องขยายสัญญาณ	59
3.8	เครื่องรับสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณ	60
3.9	เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม Dewesoft	60
3.10	อุปกรณ์วัดอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	60
3.11	ไดนาโมมิเตอร์พร้อมแผงควบคุม	61
3.12	เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย	61
3.13	เหม้ง้ำมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง	63
3.14	แผ่นออริฟิซและมานอมิเตอร์	65
4.1	อัตราส่วนการทดแทนน้ำมันดีเซลด้วยปาล์มไบโอดีเซลและก๊าซชีววมวล ที่ภาระ BMEP ต่างๆ	70
4.2	อัตราการผลิตพลังงานจำเพาะที่ภาระ BMEP ต่างๆ	71
4.3	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ภาระ BMEP ต่างๆ	71
4.4	แผนภาพเปรียบเทียบแรงดันในกระบอกสูบและอัตราการผลิตความร้อนระหว่าง เชื้อเพลิงเดียวกับเชื้อเพลิงร่วม	73
4.5	แผนภาพแสดงความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่ภาระ BMEP ต่างๆ	74
4.6	แผนภาพแสดงตำแหน่งการเกิดความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่ภาระ BMEP ต่างๆ	74
4.7	แผนภาพแสดงสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันในกระบอกสูบสูงสุดที่ภาระต่างๆ	75
4.8	แผนภาพแสดงสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ที่ภาระต่างๆ	75
4.9	ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในไอเสียที่ภาระ BMEP ต่างๆ	76
4.10	ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียที่ภาระ BMEP ต่างๆ	76

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาของงานวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ทุกประเทศในโลกไม่ว่าจะใช้ในการผลิตอาหาร ยารักษาโรค ผลิตไฟฟ้า สิ่งของอำนวยความสะดวก รวมทั้งด้านการขนส่งอุตสาหกรรม ล้วนใช้พลังงาน จากโลกที่มีอยู่อย่างจำกัดและการใช้พลังงานของประชากรโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ความต้องการพลังงานในทุกรูปแบบจะเพิ่มขึ้นในอัตราเฉลี่ยปีละ ร้อยละ 0.9 นับแต่ปี 2010 จนถึง 2040 น้ำมันจะยังคงเป็นแหล่งพลังงานอันดับหนึ่งของโลก นำโดยความต้องการพลังงานปิโตรเลียม เหลวที่เติบโตกว่าร้อยละ 70 ก๊าซธรรมชาติจะเป็นแหล่งพลังงานหลักที่เติบโตเร็วที่สุด กล่าวคือจะมีความต้องการทั่วโลกสูงขึ้นราวร้อยละ 60 ในช่วงปี 2010-2040 และในปี 2025 ก๊าซธรรมชาติจะก้าวขึ้นเป็นแหล่งพลังงานที่มีการใช้มากที่สุดเป็นอันดับสองของโลกในทางกลับกันความต้องการถ่านหินจะ สูงสุดในปี 2025 และจะเริ่มลดลงอันมีผลมาจากการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานที่ต้องการพลังงานที่มี ส่วนผสมของคาร์บอนต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคการผลิตไฟฟ้า ความต้องการทั่วโลกสำหรับ เชื้อเพลิงคาร์บอนต่ำที่สุด เช่น ก๊าซธรรมชาติพลังงานนิวเคลียร์ และพลังงานหมุนเวียนจะเพิ่มขึ้น มากกว่าอัตราโดยเฉลี่ยพลังงานนิวเคลียร์จะเติบโตต่อไปในอัตราเฉลี่ยต่อปีประมาณร้อยละ 2.2 แต่ ยังคงต่ำกว่าที่วางแผนไว้สืบเนื่องจากเหตุการณ์สึนามิในปี 2011 ที่สร้างความเสียหายต่อโรงไฟฟ้าฟูกูชิมะในญี่ปุ่นพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และเชื้อเพลิงชีวภาพจะเติบโตอย่างมากเช่นกัน ในปี 2040 พลังงานเหล่านี้คิดเป็นร้อยละ 4 ของความต้องการพลังงานทั่วโลก (ข้อมูลการใช้พลังงานของ โลกจากธนาคารโลก)

ประเทศไทยต้องประสบปัญหาด้านพลังงานอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ใน ประเทศเกิดจากการนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งไม่สามารถควบคุมความแน่นอนของราคาได้ [2] เป็น ผลกระทบต่อความมั่นคงของประเทศ จากปัญหาดังกล่าวการที่จะลดการนำเข้าพลังงานจาก ต่างประเทศ พลังงานทดแทนจึงได้รับความสนใจและเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่ ประชากรมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลผลิตทางเกษตรนอกจากจะนำไปใช้เป็น อาหาร หรือวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆแล้ว ยังคงมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นับเป็นผลพลอยได้ ที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ [3] วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน มีหลายประเภททั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเกษตรแต่ละประเภท เช่น วัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการทำนาปลูก ข้าว ได้แก่ ฟางข้าว แกลบ วัสดุเหลือทิ้งจากการทำไร่อ้อย ได้แก่ ขานอ้อย ยอดอ้อย และใบอ้อย วัสดุ

เหลือทิ้งจากการทำอุตสาหกรรมจากมะพร้าว ได้แก่กะลามะพร้าว ไยมะพร้าว และเปลือกมะพร้าว วัสดุเหลือทิ้งจากการปลูกมันสำปะหลัง ได้แก่เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้นดังนั้นประเทศไทยจึงมีศักยภาพสูงในการนำเอาชีวมวลมาผลิตพลังงาน [4]

ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยที่สำรวจและประเมินโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในปี พ.ศ. 2556 [5] แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยสำรวจและประเมินเมื่อปี พ.ศ. 2556

[5]

ชนิด	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือใช้ (TON)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพ พลังงาน (TJ)
อ้อย	ยอดและใบ	15,170,760.34	15.48	234,843.37
ข้าว	แกลบ	138,985.85	13.52	1,879.09
	ฟางข้าว	10,892,826.89	12.33	134,308.56
ข้าวโพด	ซัง	120,997.14	9.62	1,163.99
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายเปล่า	2,207,873.62	7.24	15,985.00
	โย	-	11.40	-
	กะลา	-	16.90	-
	ใบและก้าน	16,357,551.14	9.83	28,789.29
มันสำปะหลัง	เหง้า	5,881,311.88	5.49	32,288.40
มะพร้าว	ก้าน	236,085.11	15.40	3,635.71
	กาบ	3,334.11	16.23	54.11
	กะลา	21,968.22	17.93	393.89
ไม้ยางพารา	เศษไม้	-	6.57	-
รวม		51,031,667.30		453,341.41

แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทย ได้กำหนดสัดส่วนในการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ.2564 [4] จากมิตพลังงานด้านต่าง ๆ เช่น ภาคการผลิตไฟฟ้า ภาคการผลิตความร้อน เชื้อเพลิงชีวภาพ และก๊าซธรรมชาติสำหรับยานพาหนะ เป็นต้น โดยที่ชีวมวล ก๊าซธรรมชาติ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ที่ต้องพัฒนาตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนดังกล่าว ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงาน

ความร้อนจากชีวมวล มากกว่า 1,600 MW และ 2,700 ktoe ตามลำดับ [3] จากข้อมูลด้านสถิติของ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานพบว่าในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีศักยภาพด้าน ชีวมวลเท่ากับ 24,9069 ktoe ในขณะที่มีการนำชีวมวลไปใช้งาน 12,714 ktoe จากข้อมูลดังกล่าวมา จะเห็นได้ว่าในอนาคตอันใกล้จะมีการนำพลังงานทดแทนมาใช้งานมากขึ้นและการใช้พลังงานทดแทน จะทวีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ [4]

ก๊าซชีวมวลเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ โดยการแปลงสภาพชีวมวลแข็งให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถใช้งานในด้านความร้อนและเป็นเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์กำลังได้ จากการศึกษาพบว่า การนำก๊าซชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ได้ มีการดำเนินการมาตั้งแต่ช่วงสงครามโลกครั้งที่สองแต่การศึกษารายละเอียดเป็นเพียงการนำมาประยุกต์ ใช้กับเครื่องยนต์ ทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์และปรับแต่งสมรรถนะของเครื่องยนต์ให้ได้สมรรถนะที่ พอใช้งานได้ แต่การศึกษาคูณลักษณะการเผาไหม้ที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในห้องเผา ไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงยังมีการศึกษาน้อยการศึกษาคูณลักษณะการเผาไหม้ ของก๊าซชีวมวลในเครื่องยนต์ จะช่วยให้ทราบถึงลักษณะที่สำคัญที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ เช่น ความ ดันสูงสุดในกระบอกสูบ รูปแบบการเผาไหม้อัตราการปล่อยความร้อนความล่าช้าในการจุดระเบิด ระยะเวลาการเผาไหม้ กำลังบ่งชี้ การแปรผันของการเผาไหม้ระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักร เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ที่ส่งผลต่อสมรรถนะและ มลพิษ ป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาปรับปรุงเครื่องยนต์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เป็นแนวทางในการ ประหยัดพลังงานและช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ได้อีกด้วยผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญ ในเรื่องนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษารายละเอียดของคูณลักษณะการเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ ใช้ก๊าซชีวมวลเป็นส่วนผสมแบบเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดเปรียบเทียบกับน้ำมัน ดีเซลเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาเครื่องยนต์ก๊าซชีวมวลต่อไป [6]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการใช้แก๊สธรรมชาติเป็นวัตถุดิบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล

1.2.2 เพื่อศึกษา สมรรถนะ มลพิษ และคูณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วย การอัดขนาดเล็ก ที่ใช้ก๊าซชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล เทียบกับการใช้น้ำมัน ดีเซลอย่างเดียว

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เตาผลิตก๊าซชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบไหลลง (Downdraft gasifier) ขนาด 50kw<sub>th</sub> พร้อมระบบทำความสะอาดก๊าซชีวมวล

1.3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติของก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวล

1.3.3 เครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องดีเซลแบบ 1 ลูกสูบ 4 จังหวะขนาด 441 ซีซี ที่ดัดแปลงทางเข้าอากาศให้สามารถใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมได้

1.3.4 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ก๊าซชีววมวล น้ำมันปาล์มไบโอดีเซลและ น้ำมันดีเซล

1.3.5 ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ความเร็วรอบคงที่ 1,500 รอบต่อนาที ที่ภาระต่าง ๆ ของเครื่องยนต์

1.3.6 หาสภาวะอัตราทดแทนสูงสุดระหว่าง ก๊าซชีววมวลกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล และใช้อัตราการทดแทนสูงสุดเปรียบเทียบสมรรถนะและคุณลักษณะการเผาไหม้กับน้ำมันดีเซล

1.3.7 สมรรถนะประกอบด้วย อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนดำเนินการโดยการติดตั้งเครื่องยนต์เข้ากับไดนาโมมิเตอร์

1.3.8 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบ อัตราการปล่อยความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (COV of IMEP) และค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของความดันในกระบอกสูบสูงสุด (COV of  $P_{max}$ )

1.3.9 ศึกษาปริมาณมลพิษที่เกิดจากไอเสียของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีววมวลกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล

1.3.10 ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซชีววมวลกับปาล์มไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซล

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีววมวลผสมกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลและทราบถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์

1.4.2 ทราบถึงคุณลักษณะการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์เมื่อใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปออกแบบเครื่องยนต์ให้เหมาะสมกับการใช้งานกับก๊าซชีววมวลหรือเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำอื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

1.4.4 สามารถนำเครื่องยนต์ขนาดเล็กที่ใช้ก๊าซชีววมวลประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ก๊าซชีววมวล

ก๊าซชีววมวล คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น ไม้พิน แกลบ กากอ้อย เศษไม้ เศษหญ้า หรือ เศษเหลือทิ้งจากภาคเกษตร โดยนำมาเผาในอุปกรณ์ที่มีอากาศจำกัด เพื่อให้เกิดก๊าซชีววมวล ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่าง ๆ อาทิ การผลิตกระแสไฟฟ้า

#### 2.2 สมบัติของเชื้อเพลิงชีววมวล

เชื้อเพลิงชีววมวลแต่ละชนิดมีสมบัติและองค์ประกอบที่แตกต่างกันการนำชีววมวลใดมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานจะต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับกระบวนการและลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้การผลิตพลังงานดังนั้นการจะนำเชื้อเพลิงชีววมวลชนิดใดไปใช้งาน จำเป็นต้องทราบสมบัติชีววมวลด้านต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และสมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

##### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีววมวล

สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบในการนำชีววมวลชนิดนั้นมาใช้ในการผลิตพลังงาน เนื่องจากสมบัติและลักษณะทางกายภาพของชีววมวลจะมีผลต่อขั้นตอนและกระบวนการในการนำชีววมวลนั้นไปใช้งาน สมบัติและลักษณะของเชื้อเพลิงที่ส่งผลต่อกระบวนการและปฏิกิริยาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยทั่วไปได้แก่ความหนาแน่นความชื้น และขนาดของชีววมวล เป็นต้น

2.2.1.1 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีววมวล เป็นคุณสมบัติที่ส่งผลโดยตรงกับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงในด้านต่าง ๆ เช่น อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และระยะเวลาในการจุดเตา เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ จากผลการวิจัยการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงภายในเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลขึ้น โดยใช้ชีววมวลต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัส กะลามะพร้าวและซังข้าวโพด พบว่าระยะเวลาในการจุดเตา (Start time) ขึ้นกับค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีววมวล โดยชีววมวลที่มีความหนาแน่นสูงจะใช้ระยะเวลาจุดเตานานกว่าเมื่อเทียบกับชีววมวลที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า

2.2.1.2 ความชื้นของเชื้อเพลิงชีววมวล ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก ชีววมวลนำมาใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงควรมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 30 ความชื้นจาก

เชื้อเพลิงอาจพิจารณาจากชีวมวลที่ได้จากแหล่งหรือชีวมวลที่ได้ผ่านกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงเพื่อลดความชื้นมาแล้ว ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงมี 3 ลักษณะคือ ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล (Inherent moisture) ความชื้นที่อยู่ที่ชั้นผิวของชีวมวล (Surface moisture) และความชื้นที่เกิดจากการแตกตัวของอินทรีย์สาร (Decomposition moisture)

2.2.1.3 ขนาดและลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล จะต้องมีความเหมาะสมและสม่ำเสมอ ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลมีอิทธิพลอย่างมากต่อความดันลดที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง นอกจากนี้ขนาดและลักษณะของเชื้อเพลิงยังมีผลต่อกำลังของพัดลมที่ใช้งานในการจ่ายอากาศ และความเร็วของก๊าซที่ไหลผ่านชั้นของชีวมวล ชีวมวลที่มีขนาดเล็กมากจะทำให้อากาศแทรกเข้าไปในระหว่างชีวมวลได้น้อยซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นไม่สม่ำเสมอ [7]

## 2.2.2 สมบัติทางความร้อนของชีวมวล

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อน ดังนั้นสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก สมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ ค่าสภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และค่าความร้อนจากการทำปฏิกิริยา (Heat of formation)

### 2.2.2.1 ค่าสภาพนำความร้อนการนำความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านเชื้อเพลิงชีวมวล

การนำความร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านเชื้อเพลิงชีวมวลมีอิทธิพลอย่างมากต่อปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเชื้อเพลิง เนื่องจากความร้อนจะส่งผ่านเส้นใยที่อยู่ภายในชีวมวล การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่จะขึ้นอยู่กับค่าสภาพการนำความร้อนของชีวมวล ซึ่งค่าสภาพการนำความร้อนของชีวมวลจะมีค่าขึ้นกับค่าความหนาแน่นและค่าความชื้นของชีวมวล ความสัมพันธ์เพื่อค่าสภาพการนำความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อทราบค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าความชื้นของชีวมวลสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีค่าความชื้นต่าง ๆ กันดังนี้สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีค่าความชื้นมากกว่าร้อยละ 40 ค่าสภาพการนำความร้อนจะมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.1

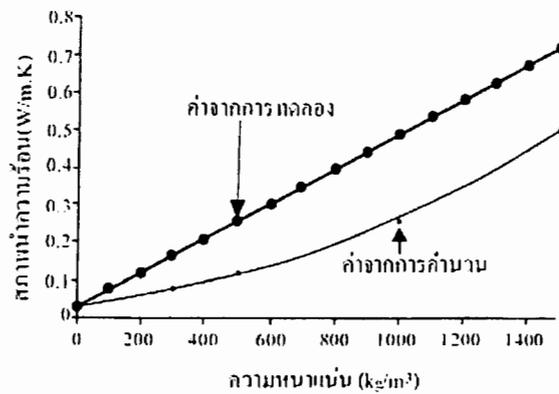
$$K_{\text{eff}} = \text{sp.gr} (0.2 + 0.004m_d) + 0.0238 \quad \text{สำหรับค่า } m_d > 40\% \quad (2.1)$$

สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 40 ค่าสภาพการนำความร้อนจะมีค่าดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$K_{\text{eff}} = \text{sp.gr} (0.2 + 0.0055m_d) + 0.0238 \quad \text{สำหรับค่า } m_d < 40\% \quad (2.2)$$

เมื่อ  $K_{\text{eff}}$  = ค่าสภาพการนำความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล  
 $\text{sp.gr}_f$  = ค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงชีวมวล  
 $m_d$  = ร้อยละของความชื้นในชีวมวล

ค่าสภาพนำความร้อนของไม้ที่เปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของชีวมวลที่ได้  
 จากผลการทดลองและผลการคำนวณ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนและความหนาแน่นของชีวมวล [8]

#### 2.2.2.2 ความจุความร้อนจำเพาะ

เป็นสมบัติที่สำคัญของชีวมวลที่จำเป็นต้องนำมาใช้ในการคำนวณทางความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะจะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าความชื้นและอุณหภูมิของชีวมวล โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0- 160 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$C_{p\theta} = 0.266 + 0.00116t \quad (2.3)$$

เมื่อ  $t$  = อุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

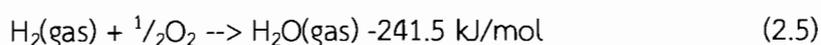
$C_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะ กับค่าความชื้นของชีวมวลแสดงดังสมการที่ 2.4

$$C_p = M_{\text{wet}}C_w + (1 - M_{\text{wet}})C_{p\theta} \quad (2.4)$$

### 2.2.2.3 ค่าความร้อนจากการทำปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆอาจต้องดูดความร้อนเข้าไปเพื่อทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้หรืออาจปลดปล่อยความร้อนออกมาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ปฏิกิริยาที่ต้องดูดความร้อนเข้าไป เรียกว่าปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) และถ้าปฏิกิริยาใดมีการคายความร้อนหรือพลังงานออกมาเรียกว่าปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวของแก๊สไฮโดรเจนกับแก๊สออกซิเจน จะมีการคายความร้อนออกมาสู่ระบบเพื่อผลิตไอน้ำ ปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.5



ค่าความร้อนจากการทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะมีค่าเท่ากับผลรวมของเอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละขั้นตอน ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความร้อนจากปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบต่างๆ [7]

สารประกอบ	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub>
ความร้อนจากการทำปฏิกิริยา	-241.5	-393.5	-110.6	-74.8	0	-1211.8	-82.5

## 2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญมากในระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่จำเป็นต้องทราบเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงแข็งโดยทั่วไปทำการวิเคราะห์ 3 แบบ ซึ่งการวิเคราะห์แต่ละแบบมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันได้แก่ (1) การหาค่าองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า (Proximate analysis) (2) การหาค่าองค์ประกอบในเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) (3) การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating value analysis) [7]

### 2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยการประมาณค่า

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยการประมาณค่า (Proximate analysis) จะวิเคราะห์โดยอ้างอิงหลักวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยประมาณค่าของถ่านหินและถ่านโค้กที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบ และวัสดุของสมาคมอเมริกันสำหรับถ่านหิน ASTM D3172-07 ซึ่งได้กำหนด

มาตรฐานวิธีการวิเคราะห์และมาตรฐานปริมาณที่ต้องทำการวิเคราะห์ไว้ การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งโดยประมาณค่า ปริมาณที่ทำการวิเคราะห์มี 4 ปริมาณได้แก่ (1) ความชื้น ( Moisture content) (2) สารระเหย (volatile matter) (3) เถ้า (Ash) และ (4) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)

2.3.1.1 ความชื้นที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม โดยเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-871-82 (ASTM D-871-82) สำหรับถ่านไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-1762-84 (ASTM D-1762-84) และสำหรับเชื้อเพลิงขยะ (Refuse derived fuel: RDF) ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม E-949-88 (ASTM E-949-88) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานต่าง ๆ จะแตกต่างกันไป เช่นการวิเคราะห์ค่าความชื้นของไม้ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-1762-84 (ASTM D-1762-84) จะใช้ไม้ตัวอย่างในการวิเคราะห์น้ำหนัก 50 กรัม อบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที และหลังจากนั้นทิ้งไม้ไว้ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 103 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง และหลังจากนั้นนำไม้ออกมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่หายไปคือค่าความชื้นที่อยู่ในไม้

2.3.1.2 สารระเหยที่อยู่ในชีวมวลหมายถึงไอที่สามารถควบแน่นได้ และไอที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่ปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลได้รับความร้อน ปริมาณสารระเหยที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับอัตราการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิงและอุณหภูมิ ในการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยจะใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม สำหรับเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม E-872 (ASTM E-872) การวิเคราะห์ทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 50 กรัมที่สุ่มมาจากเชื้อเพลิงไม้ 10 กิโลกรัม โดยการสุ่มตัวอย่างใช้วิธีตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-346 (ASTM D-346) และนำตัวอย่างมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร และนำเชื้อเพลิงแห้งที่บดแล้ว 1 กรัมมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยการวางตัวอย่างในเบ้าหลอมที่มีฝาปิดและใส่ลงในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยให้ความร้อนเป็นเวลา 7 นาที สารระเหยจะปล่อยออกมาซึ่งสามารถสังเกตได้จากเปลวไฟ หลังจากนั้นนำตัวอย่างออกมาและทำให้เย็นและชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงไม้ น้ำหนักที่หายไปคือสารระเหย

2.3.1.3 เถ้า คือสารอนินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากคาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว สารอนินทรีย์ที่อยู่ในเถ้าได้แก่ ซิลิกา อลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม เป็นต้น การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าสำหรับเชื้อเพลิงไม้ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคม D-1102 (ASTM D-1102) การวิเคราะห์เถ้าทำโดยใช้เชื้อเพลิงไม้ตัวอย่าง 2 กรัมที่มีขนาดเล็กกว่า 475 ไมครอน อบแห้งตามวิธีมาตรฐาน และนำมาวางบนเบ้าหลอมที่ไม่ต้องปิดฝา

และใส่ไว้ในเตาเผาอุณหภูมิสูง โดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อคาร์บอนในชีวมวลถูกเผาไหม้หมดแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำมาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้จะเป็นน้ำหนักของเถ้าที่อยู่ในเชื้อเพลิง

2.3.1.4 คาร์บอนคงตัว หมายถึงปริมาณคาร์บอนในชีวมวลที่ยังคงเหลืออยู่ในถ่านชาร์หลังจากที่สารระเหยถูกปล่อยออกมาในกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน การหาค่าปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถหาได้เมื่อทราบ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และเถ้า โดยใช้ความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$FC = 1 - M - VM - Ash \quad (2.6)$$

เมื่อ

FC = ปริมาณคาร์บอนคงตัว

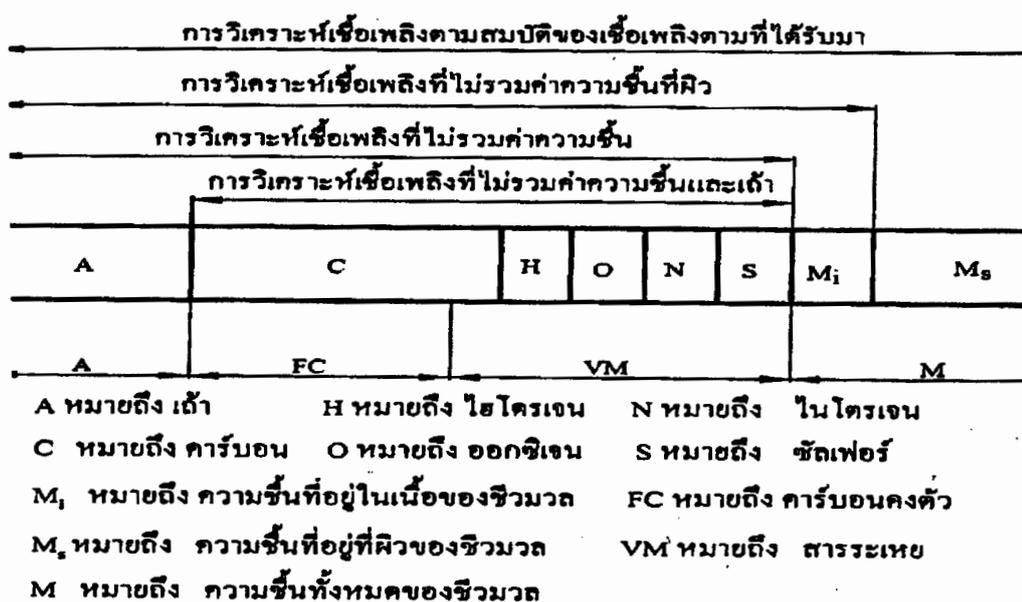
M = ปริมาณความชื้น

VM = ปริมาณสารระเหย

Ash = ปริมาณเถ้า

ปริมาณคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและจากการวิเคราะห์โดยละเอียดจะมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการวิเคราะห์โดยวิธีการประมาณค่าไม่ได้รวมคาร์บอนที่อยู่ในสารระเหย ซึ่งปรกติจะหมายถึงถ่านชาร์ที่เกิดหลังกระบวนการสลายด้วยความร้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลโดยการประมาณค่าทำการวิเคราะห์ตามลักษณะของชีวมวลที่ใช้ในการพิจารณาที่มีลักษณะแตกต่างกันเป็น 4 แบบ คือ (1) วิเคราะห์เชื้อเพลิงตามสมบัติของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมา (As received basis) (2) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้ง (Total dry basis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงที่ไม่พิจารณาความชื้นทั้งหมดที่อยู่ในเชื้อเพลิง (3) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาที่ไม่รวมความชื้นที่ผิว (Airdrybasis) เป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งที่ไม่พิจารณาความชื้นที่อยู่ผิวของเชื้อเพลิงเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงและ (4) วิเคราะห์เชื้อเพลิงภายใต้เกณฑ์การพิจารณาว่าเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งและไม่มีเถ้า (Dry ash free basis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งที่ไม่พิจารณาความชื้นและเถ้าเป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ภายใต้เกณฑ์ต่าง ๆ ปริมาณที่ทำการวิเคราะห์และปริมาณองค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าแตกต่างกัน การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณตามเกณฑ์ที่พิจารณาต่าง ๆ กันจะได้ข้อมูลที่ต่างกัน เช่นการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งตามลักษณะของเชื้อเพลิงตามที่ได้รับมาประกอบด้วย เถ้า คาร์บอนไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ คาร์บอนคงตัว สารระเหย ความชื้นที่อยู่ในเนื้อชีวมวลและความชื้นที่อยู่ผิวชีวมวล ปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ตามเกณฑ์ต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ปริมาณที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งโดยการประมาณค่าตามเกณฑ์ [8]

การวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลโดยการประมาณค่าของชีวมวลชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ชีวมวลโดยการประมาณค่าของชีวมวลชนิดต่าง ๆ [7]

ชีวมวล	คาร์บอนคงตัว	สารระเหย	เถ้า
ไม้อัดเม็ด	15.77	82.14	2.09
เปลือกถั่ววอลนัท	21.16	78.28	0.56
เปลือกถั่วแอมอลท์	21.54	76.83	1.63
ซังข้าวโพด	18.54	80.10	1.36
ฟางข้าวสาลี	19.80	71.30	8.90
ลำต้นนุ่น	22.43	70.89	6.68
ลำต้นและใบข้าวโพด	19.25	75.17	5.58
ชานอ้อย	14.95	73.78	11.27
แกลบ	15.80	63.30	20.60
ผักตบชวา	-	80.40	19.60

### 2.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียด

การวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยละเอียดหรือแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) โดยทั่วไปจะใช้วิธีอ้างอิง ตามวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของถ่านหิน และถ่านโค้กที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคมสำหรับถ่านหิน ASTM D3176-09 ตามมาตรฐานนี้ได้กำหนดวิธีวิเคราะห์และปริมาณที่ต้องทำการวิเคราะห์ได้แก่ ปริมาณของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ไนโตรเจน และเถ้า โดยปริมาณของออกซิเจนใช้วิธีคำนวณโดยคิดว่าเป็นปริมาณสารทั้งหมดในเชื้อเพลิงมีค่าเป็น 100 ส่วน สำหรับการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะวิเคราะห์โดยพิจารณาตามพื้นฐานที่เชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงแห้งการวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลแบบแยกธาตุของชีวมวลชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลแบบแยกธาตุของชีวมวลชนิดต่าง ๆ [7]

ชีวมวล	C	H	O	N	S
ไม้อัดเม็ด	48.13	5.87	42.46	1.45	0.00
เปลือกถั่วอลันท์	49.98	5.71	43.35	0.21	0.01
เปลือกถั่วแอลมอลท์	51.30	5.29	40.90	0.66	0.01
ซังข้าวโพด	46.58	5.87	45.46	0.47	0.01
ฟางข้าวสาลี	43.20	5.00	39.40	0.61	0.11
ลำต้นนุ่น	43.64	5.81	43.87	0.00	0.00
ลำต้นและใบข้าวโพด	43.65	5.56	43.31	0.61	0.01
ชานอ้อย	44.80	5.35	39.55	0.35	0.01
แกลบ	38.30	4.36	36.45	0.83	0.06
ผักตบชวา	40.30	4.60	33.99	1.51	0.00

### 2.3.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวล

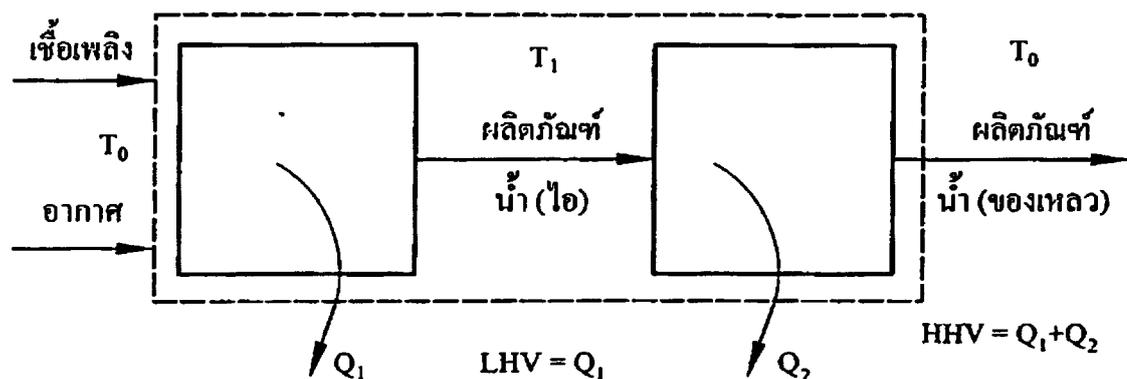
การวิเคราะห์ค่าความร้อนของชีวมวลสามารถหาได้โดยการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่าบอมบ์แคลอริมิเตอร์ และโดยวิธีการคำนวณโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยละเอียด การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปใช้วิธีอ้างอิงตามข้อกำหนดตามมาตรฐานการทดสอบและวัสดุของอเมริกันสมาคมสำหรับถ่านหินที่ใช้มาตรฐาน ASTM D5865

การหาค่าความร้อนของชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งมี 2 วิธี คือวิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนสูง (Higher heating value) และวิเคราะห์โดยหาค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value)

ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวลหรืออาจเรียกว่าค่าความร้อนสุทธิ (Net calorific value; NCV) เป็นการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดรวมทั้งน้ำมีสถานะเป็นไอ

ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลหรืออาจเรียกว่าค่าความร้อนรวม (Gross calorific value; GCV) เป็นหาค่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในกรณีนี้ไอน้ำจากการเผาไหม้จะควบแน่นกลับมาเป็นของเหลว ทำให้คายความร้อนออกมา ซึ่งจะทำความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของไอน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำกับค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง

จากการพิจารณาแผนภาพที่ 2.3 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลดังแสดงในสมการที่ 7

$$\text{HHV} = \text{LHV} + n h_{fg(\text{H}_2\text{O})} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$h_{fg(\text{H}_2\text{O})}$  = เอนทาลปีที่ใช้ในการเปลี่ยนไอน้ำให้เป็นของเหลวซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,260 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

$n$  = จำนวนโมลของไอน้ำ

เนื่องจากค่าความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำมีค่า 2,260 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม คิดเป็นอัตราส่วนมวล

โมเลกุลของไฮโดรเจนต่อมวลโมเลกุลของน้ำ ( $H_2 : H_2O$ ) มีค่าเท่ากับ 1:9 ดังนั้นจากสมการที่ 2.7 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ดังสมการที่ 2.8

$$HHV = LHV + 22.6 (9H + M) \text{ kJ/kg} \quad (2.8)$$

เมื่อ

H = ร้อยละของไฮโดรเจนในชีวมวล

M = ร้อยละของความชื้นในชีวมวล

การหาค่าความร้อนของชีวมวลสามารถคำนวณได้ถ้าทราบปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงจากการวิเคราะห์โดยการประมาณค่าและการวิเคราะห์โดยละเอียดโดยมีผู้เสนอความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงโดยการคำนวณจากปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่มีในเชื้อเพลิงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยละเอียดซึ่งปรากฏอยู่ในรูปของสมการอย่างง่ายหลายสมการ โดยแต่ละสมการจะมีสูตรและเงื่อนไขในการใช้สมการที่แตกต่างกันไป การจะเลือกนำสมการใดไปใช้งานจะขึ้นอยู่กับข้อมูลองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ ที่มีในเชื้อเพลิง

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงที่ครอบคลุมทั้งชีวมวล เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส ดังแสดงในสมการที่ 2.9

$$HHV = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0015N - 0.0211A \text{ (MJ/kg)} \quad (2.9)$$

เมื่อ

C = ปริมาณคาร์บอนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

H = ปริมาณไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

S = ปริมาณซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

O = ปริมาณออกซิเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

N = ปริมาณไนโตรเจนในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

A = ปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

การหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอาจทำการคำนวณได้ถ้าทราบผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยประมาณซึ่งการวิเคราะห์โดยประมาณนั้นทำได้ง่าย จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความ

ร้อนของเชื้อเพลิงโดยการใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์โดยประมาณ แสดงดังสมการที่ 2.10

$$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078Ash \text{ (MJ/kg)} \quad (2.10)$$

เมื่อ

FC = ปริมาณคาร์บอนคงตัวในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

VM = ปริมาณสารระเหยในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Ash = ปริมาณเถ้าในเชื้อเพลิง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าความร้อนของชีวมวลชนิดต่างๆ [1]

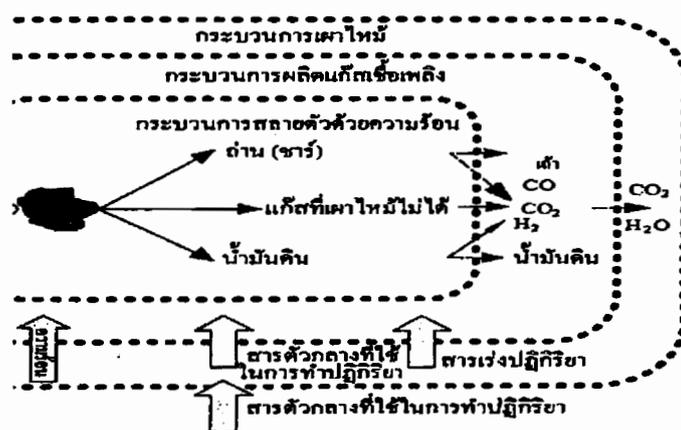
ชีวมวล	วัสดุเหลือทิ้ง	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ชีวมวล	วัสดุเหลือทิ้ง	ค่าความร้อน (MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	14.40	มะพร้าว	เปลือก	16.23
	ยอดและใบ	17.39		กะลา	17.93
ข้าว	แกลบ	14.27	มันสำปะหลัง	ทะลาย	15.40
	ฟางข้าว	10.24		ต้น	18.42
น้ำมันปาล์ม	ทะลายปาล์ม	17.86	ข้าวโพด	ซัง	18.04
	เส้นใย	17.62	ถั่วลิสง	เปลือก	12.66
	กะลา	18.46	ฝ้าย	ลำต้น	14.49
เศษไม้	ก้านทาง	9.83	ถั่วเหลือง	ลำต้นและใบ	19.44
	ทะลายตัวผู้	16.33	ข้าวฟ่าง	ใบและต้น	10.23
เศษไม้	กิ่งก้าน	14.98			

## 2.4 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

เทคโนโลยีการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งที่มีอินทรีย์สารเป็นองค์ประกอบให้เป็นพลังงานที่อยู่ในรูปของก๊าซเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงแข็งที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงสามารถใช้ได้หลากหลายประเภทได้แก่ ชีวมวลประเภทต่าง ๆ ถ่านหิน ถ่าน ขยะ และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เป็นต้น เชื้อเพลิงแข็งจะเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน (Thermal chemical conversion) ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ควบคุมปริมาณสารตัวกลาง ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ได้แก่ อากาศ ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ

เป็นต้น โดยเชื้อเพลิงแข็งจะทำปฏิกิริยากับสารตัวกลางภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะเป็นก๊าซ ซึ่งประกอบด้วยก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ และก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ รวมทั้งฝุ่น ถ่าน ถ่านและน้ำมันดิน ก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจน ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของก๊าซและค่าความร้อนแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น และสารตัวกลางที่ใช้ ก๊าซเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบหลักประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซมีเทน จะเรียกก๊าซเชื้อเพลิงชนิดนี้ว่า โพรดิวเซอร์ก๊าซ (Producer gas) และถ้าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีองค์ประกอบหลักคือก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และไฮโดรเจน จะเรียกก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthesis gas; Syngas) และถ้าก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอาจเรียกชื่อเป็น ก๊าซชีวมวลหรือก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวล [7]

กระบวนการทางเคมีความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ประกอบด้วยกระบวนการหลัก 4 กระบวนการ ได้แก่ (1) กระบวนการลดความชื้น (Drying) (2) กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) (3) กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) (4) กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านชาร์ (Char gasification) กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ต่อกันเกิดขึ้นพร้อมกันและต่อเนื่องกัน โดยที่บริเวณหรือตำแหน่งต่างกันจะเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมของชีวมวลที่บริเวณนั้นซึ่งได้แก่ ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณนั้น เป็นต้น ในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาเผาไหม้ถือเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นก่อนปฏิกิริยาอื่น โดยปฏิกิริยาอื่นๆที่เกิดขึ้นต่อมาจะเป็นผลต่อเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตเชื้อเพลิงก๊าซเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องอย่าเป็นลำดับ ดังนั้นภาพรวมของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 2.4



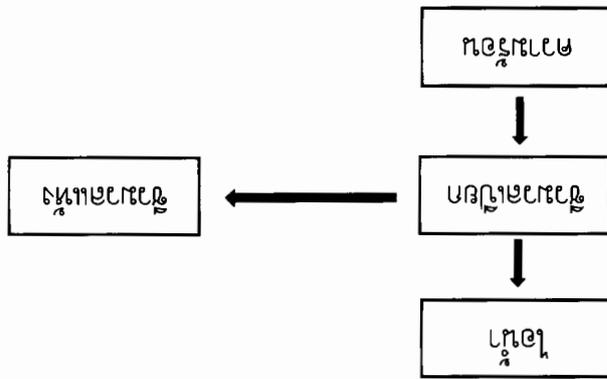
ภาพที่ 2.4 ภาพรวมของกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ความรุนแรงของไฟไหม้ที่เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความเสียหายของระบบไฟฟ้า ความเสียหายของระบบเครื่องปรับอากาศ ความเสียหายของระบบประปา ความเสียหายของระบบระบายน้ำ ความเสียหายของระบบระบายน้ำทิ้ง ความเสียหายของระบบระบายน้ำเสีย ความเสียหายของระบบระบายน้ำฝน ความเสียหายของระบบระบายน้ำท่วม ความเสียหายของระบบระบายน้ำใต้ดิน ความเสียหายของระบบระบายน้ำใต้ดินใต้ดิน

(2.11) ใช้เพื่อประเมินความเสี่ยง + ความรุนแรง --> เพื่อประเมินความเสี่ยง + ความรุนแรง

การประเมินความเสี่ยงของไฟไหม้ที่เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความเสียหายของระบบไฟฟ้า ความเสียหายของระบบเครื่องปรับอากาศ ความเสียหายของระบบประปา ความเสียหายของระบบระบายน้ำ ความเสียหายของระบบระบายน้ำทิ้ง ความเสียหายของระบบระบายน้ำเสีย ความเสียหายของระบบระบายน้ำฝน ความเสียหายของระบบระบายน้ำท่วม ความเสียหายของระบบระบายน้ำใต้ดิน ความเสียหายของระบบระบายน้ำใต้ดินใต้ดิน

ภาพที่ 2.5 กระบวนการประเมินความเสี่ยงของไฟไหม้ที่เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ



ภาพที่ 2.5

การประเมินความเสี่ยงของไฟไหม้ที่เกิดจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความเสียหายของระบบไฟฟ้า ความเสียหายของระบบเครื่องปรับอากาศ ความเสียหายของระบบประปา ความเสียหายของระบบระบายน้ำ ความเสียหายของระบบระบายน้ำทิ้ง ความเสียหายของระบบระบายน้ำเสีย ความเสียหายของระบบระบายน้ำฝน ความเสียหายของระบบระบายน้ำท่วม ความเสียหายของระบบระบายน้ำใต้ดิน ความเสียหายของระบบระบายน้ำใต้ดินใต้ดิน

2.4.1.1 ชั้นลดความรุนแรง

ได้แก่ (1) ชั้นลดความรุนแรง (2) ชั้นลดความเสียหาย (3) ชั้นลดความเสียหาย (4) ชั้นลดความเสียหาย

2.4.1 ปฏิบัติการตามแผนป้องกันและบรรเทาผลกระทบจากไฟไหม้

มีความชื้นสูง การระเหยความชื้นจะเกิดได้ช้าทำให้ชีวมวลที่เคลื่อนตัวลงมาในชั้นสลายตัวด้วยความร้อนที่อยู่ถัดลงมายังคงมีความชื้นเหลืออยู่มาก ซึ่งจะส่งผลต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในชั้นถัดลงมา และส่งผลต่อไปถึงคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จะไม่สามารถติดไฟได้ถ้าชีวมวลมีความชื้นตามมาตรฐานแห้งไม่เกินร้อยละ 67 ซึ่งถ้าต้องการให้ก๊าซเชื้อเพลิงมีคุณภาพสูงเพียงพอ ชีวมวลจะต้องมีความชื้นตามมาตรฐานแห้งไม่เกินร้อยละ 33 ในปฏิกิริยาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจะสามารถระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลได้ทั้งหมดขณะที่อยู่ในชั้นลดความชื้นได้นั้นชีวมวลจะต้องมีค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 15 ความร้อนที่ใช้ในการระเหยความชื้นจากชีวมวลสามารถคำนวณได้เมื่อทราบความชื้นที่อยู่ในชีวมวล โดยปริมาณความชื้นในชีวมวลสามารถทราบได้จากการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยการประมาณค่า โดยปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยความชื้นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นน้อยกว่าหรือเทียบเท่ากับร้อยละ 3 และสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความชื้นมากกว่าหรือเทียบเท่ากับร้อยละ 3 แสดงสมการที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ

$$\Delta H_{\text{vap}} = 3.348 - 13.085U + 60.262U^2 - 95.778U^3 \text{ (kJ/g) เมื่อ } U \leq 0.3 \quad (2.12)$$

$$\Delta H_{\text{vap}} = 2.26 \text{ (kJ/g) เมื่อ } U \geq 0.3 \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\Delta H_{\text{vap}}$  = พลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้น (กิโลจูลต่อกิโลกรัม)

U = ปริมาณความชื้นในชีวมวล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

จากสมการที่ 2.13 จะได้ว่าถ้าชีวมวลมีความชื้น 1 กิโลกรัมจะต้องใช้ความร้อนเพื่อระบายน้ำออกจากชีวมวลประมาณ 2,260 กิโลจูลซึ่งปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยความชื้นสำหรับปฏิกิริยาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงนี้จะมาจากกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

#### 2.4.1.2 ชั้นสลายตัวด้วยความร้อน

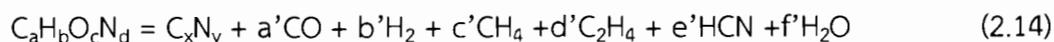
ชั้นสลายตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis zone) เป็นบริเวณที่ชีวมวลที่อยู่ในชั้นนี้ได้รับความร้อนและสลายตัวปล่อยสารระเหยออกมา อุณหภูมิในชั้นนี้มีค่าประมาณ 135-600 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่อยู่ในชั้นนี้เป็นชีวมวลที่เคลื่อนที่ลงมาจากชั้นลดความชื้น การเคลื่อนตัวของชีวมวลภายในเครื่องผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเกิดขึ้นได้เนื่องจากชีวมวลที่อยู่ในบริเวณชั้นเผาไหม้ และชั้นรีดักชันที่อยู่ถัดลงมาจากชั้นสลายตัวด้วยความร้อนเกิดปฏิกิริยาทำให้มวลลดลงและเกิดการยุบตัว ทำให้ชีวมวลที่อยู่ด้านบนขยับตัวและเคลื่อนลงมาด้านล่าง ชีวมวลในชั้นสลายตัวด้วยความร้อนจะได้รับความร้อนจากชั้นเผาไหม้ที่อยู่ถัดลงมา ในชั้นสลายตัวด้วยความร้อนไม่มีสารตัวกลางที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเข้ามาถึง ความร้อนที่เชื้อเพลิงในชั้นนี้ได้รับจะทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงสลายตัวออกมาซึ่งอาจเรียกกระบวนการนี้ว่ากระบวนการแตกตัวของสารระเหย (Devolatilization process)

ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาจากชั้นสลายตัวด้วยความร้อนประกอบด้วยเมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิน ก๊าซที่เผาไหม้ได้ และก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปของก๊าซได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทนและ ก๊าซไฮโดรเจน เป็นต้น กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนที่เกิดขึ้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน

ปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวล โดยให้ชีวมวลมีสูตรโมเลกุล  $\text{CaHbOcNd}$  และกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อนประกอบด้วยถ่านชาร์ ( $\text{CxNy}$ ) ก๊าซต่างๆ กรดและน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 2.14



เมื่อ

$a'$  = จำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

$b'$  = จำนวนโมลของก๊าซไฮโดรเจน

$c'$  = จำนวนโมลของก๊าซมีเทน

$d'$  = จำนวนโมลของเอททิลีน

$e'$  = จำนวนโมลของกรด

$f'$  = จำนวนโมลของน้ำ

ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลประเภทต่างๆโดยใช้แบบจำลองการสลายตัวด้วยความร้อน สรุปได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ผลลัพธ์จากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลประเภทต่างๆ [7]

% โดย น้ำหนัก	ฟางข้าว	ขยะเศษไม้	ไม้เนื้ออ่อน	ตะกอนน้ำเสีย	เชื้อเพลิงขยะผสมพลาสติก
ถ่านชาร์	12.45	18.24	19.42	10.84	5.15
CO	65.36	67.31	57.08	33.37	24.51
H <sub>2</sub>	4.97	5.34	3.79	3.26	4.13
CH <sub>4</sub>	0.04	0.00	3.65	1.26	14.53
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2.36	0.01	0.96	5.87	39.80
HCN	0.72	0.28	0.10	6.09	0.56
H <sub>2</sub> O	9.86	5.78	14.72	6.66	2.65
เถ้า	4.24	3.04	0.27	32.62	8.66
อุณหภูมิไพโรไลซิส (เควิน)	712	674	711	702	664

#### 2.4.1.3 ชั้นรีดักชัน

ชั้นรีดักชัน (Reduction zone) เป็นบริเวณที่ถ่านชาร์และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ จากชั้นสลายตัวด้วยความร้อนและชั้นเผาไหม้เคลื่อนตัวลงมายังบริเวณนี้และทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นเผาไหม้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในถ่านชาร์เกิดปฏิกิริยารีดักชันลดออกซิเจนในก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังนั้นบริเวณนี้จึงเรียกว่าชั้นรีดักชัน หรือชั้นผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านชาร์ (Char gasification) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับถ่านชาร์และผลิตภัณฑ์อื่นๆที่เคลื่อนตัวลงมาในบริเวณนี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันเป็นลำดับดังนี้

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในถ่านชาร์ เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยาบูดูยาร์ด (Boudouard reaction) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ 2.15

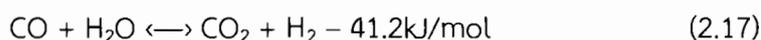


ไอน้ำที่ระเหยออกมาจากเชื้อเพลิงชีวมวลจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อยู่ในถ่านชาร์เกิดปฏิกิริยาคูดความร้อน ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

เรียกว่าปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊ส (Water gas reaction) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่น้ำทำปฏิกิริยากับคาร์บอน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ 2.16



ไอน้ำที่ระเหยออกมาจากเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า วอเตอร์แก๊สชิฟ (Water gas shift reaction) ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาที่เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ก๊าซไฮโดรเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการ 2.17



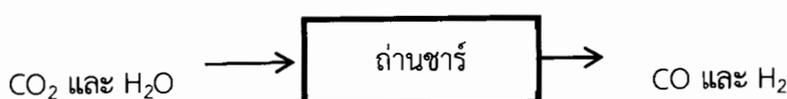
ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water gas shift reaction) จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นก๊าซมีเทน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน (Hydro-gasification reaction) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.18



ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาวอเตอร์แก๊สชิฟ (Water gas shift reaction) จะทำปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นก๊าซมีเทน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทน (Methanation reaction) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ 2.19-2.21



ปฏิกิริยารีดักชันของถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ 2.15 – 2.18 สรุปได้ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.7



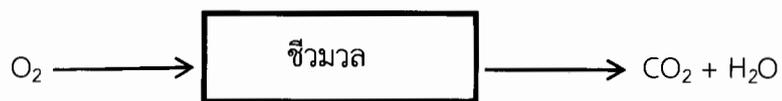
ภาพที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยารีดักชันของถ่านชาร์

2.4.1.4 ชั้นเผาไหม้

ชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) เป็นบริเวณที่เชื้อเพลิงชีวมวลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์บอนในชีวมวล เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนปฏิกิริยาในชั้นนี้ถือว่าเป็นปฏิกิริยาหลักที่จ่ายความร้อนเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาแก๊สชีวมวลที่อยู่ในชั้นอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งอาจเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณก่อไฟ (Hearth zone) อุณหภูมิในชั้นนี้มีค่าประมาณ 900 – 1200 องศาเซลเซียสปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในชั้นนี้แสดงดังสมการที่ 2.22 -2.24

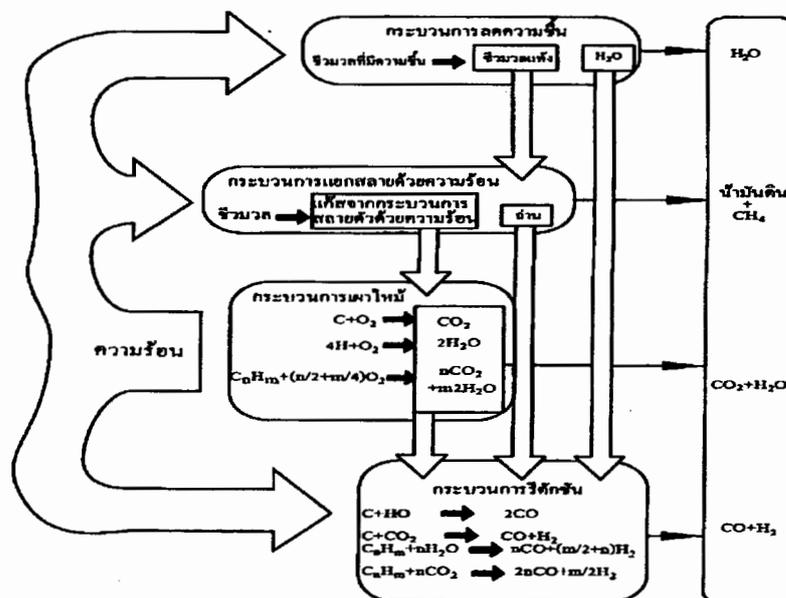


ปฏิกิริยาเผาไหม้ในชั้นเผาไหม้แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในชั้นเผาไหม้

สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจาก 4 กระบวนการดังรายละเอียดข้างต้นสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 สมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง [7]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงทั้งหมด สรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง [8]

รูปแบบของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยา
<b>ปฏิกิริยากับคาร์บอน</b>	
ปฏิกิริยาบูดูยาร์ด	$C + CO_2 \rightarrow 2CO + 172\text{kJ/mol}$
ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊ส	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 + 131\text{kJ/mol}$
ปฏิกิริยาไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 - 74.8\text{kJ/mol}$
ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO - 111\text{kJ/mol}$
<b>ปฏิกิริยาออกซิเดชัน</b>	
	$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 394\text{kJ/mol}$
	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284\text{kJ/mol}$
	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803\text{kJ/mol}$
	$H + 1/2O_2 \rightarrow H_2O + 242\text{kJ/mol}$
<b>ปฏิกิริยาอวเตอร์แก๊สซิฟิ</b>	
	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2\text{kJ/mol}$
<b>ปฏิกิริยาการผลิตแก๊สมีเทน</b>	
	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 274\text{kJ/mol}$
	$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O - 165\text{kJ/mol}$
	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165\text{kJ/mol}$
<b>ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งโดยใช้ไอน้ำ</b>	
	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206\text{kJ/mol}$
	$CH_4 + 0.5O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2 - 36\text{kJ/mol}$

## 2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเชื้อเพลิง

ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อุณหภูมิและความดันจะเป็นสภาวะที่กำหนดให้เกิดปฏิกิริยาบางปฏิกิริยาและเกิดก๊าซหรือสารประกอบตามสภาวะสมดุลทางเคมี โดยทั่วไปที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยามักไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ที่อุณหภูมิมากกว่า 700 องศาเซลเซียส กระบวนการทางกายภาพ เช่น การแพร่ผสมคลุกเคล้าของก๊าซ (Diffusion) ที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนจะตอบสนองไม่ทันเมื่อเทียบกับกระบวนการทางเคมีที่รวดเร็ว ทำให้ปฏิกิริยาเคมีเป็น

ตัวกำหนดสมดุลการเกิดปฏิกิริยาที่ขณะนั้นเท่านั้น (Kinetically influenced reactions) ภายในเตาปฏิกรณ์จะมีปฏิกิริยาเคมีมากมายเกิดขึ้น สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ พื้นที่ที่ถูกจำกัดภายในเตาที่จะทำให้เกิดกระบวนการทางกายภาพทำหน้าที่คลุกเคล้าส่งถ่ายมวลสารได้ดีเพียงใด ล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ปฏิกิริยาทางเคมีบางปฏิกิริยาเกิดขึ้น แต่ไม่สามารถดำเนินต่อไปได้อังค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นดังแสดงในตาราง 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลโดยทั่วไป

ส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง	ร้อยละโดยมวล
H <sub>2</sub>	12 – 20
CO	17 - 22
CO <sub>2</sub>	9 – 15
CH <sub>4</sub>	2 – 3
N <sub>2</sub>	50 - 54

ปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อก๊าซเชื้อเพลิงมีดังนี้

**2.5.1 ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture content)** ช่วยทำให้สัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซเชื้อเพลิงสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซและค่าความร้อนที่ต้องการลดลง ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง แหล่งที่มา และการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตก๊าซชีวมวล ความชื้นในชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

2.5.1.1 ความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล เป็นส่วนที่สามารถอยู่ในรูเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 96 – 97

2.5.1.2 ความชื้นที่ผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินจากความชื้นในรูเปิดของเซลล์ชีวมวล

2.5.1.3 ความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200 – 250 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยความชื้นที่ผิวและความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล ถ้าต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน ความชื้นทั้งหมดควรมีไม่เกินร้อยละ 50

**2.5.2 ขนาดของเชื้อเพลิง (Fuel size)** มีผลกับการเกิดความดันตกคร่อม (Pressure drop) ภายในเตาแก๊สซิฟายเออร์ ถ้าเกิดความดันตกภายในเครื่องมากเกินไปจะทำให้ต้องใช้พลังงานในการนำอากาศเข้าและพาก๊าซที่ได้ออกจากเตาแก๊สซิฟายเออร์มาก เครื่องยนต์ก็จะต้องมีแรงดูดมากพอที่จะเอาชนะความดันตกของระบบทั้งหมด ในทางทฤษฎี อากาศควรจะสัมผัสกับพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงให้

มากที่สุดเพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นและเกิดกระบวนการได้เร็วยิ่งขึ้น หากใช้เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะทำให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ข้ามโซน เป็นสาเหตุของการเกิดเถ้าหลอมเยิ้มติดผนัง (Slag) เพราะถ้าเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่เกินไป เมื่อเผาไหม้แล้วเชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวกและไม่ทันกับการเผาไหม้ที่มีอากาศเข้าเท่าเดิม อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงจึงสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียสซึ่งสูงพอที่จะเหนียวนำไปเกิดเถ้าหลอมในเชื้อเพลิงทุกชนิดได้ จึงควรมีการนำเชื้อเพลิงมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 1 เซนติเมตร จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น

**2.5.3 การกระจายขนาด (Size distribution)** เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาต้องมีขนาดที่สม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะหากขนาดแตกต่างกันมาก อากาศและก๊าซจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่และเล็กที่เกยกัน ทำให้การเผาไหม้บางบริเวณมีความรุนแรงแต่บางบริเวณเย็นตัวลงและอาจจะสลับกันในเวลาต่อมาทำให้เกิดการหลอมเป็นก้อน (Clinker)

**2.5.4 ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk density)** เป็นค่าที่แสดงลักษณะการใช้ปริมาตรของเชื้อเพลิงนั้น กล่าวคือเมื่อเทเชื้อเพลิงที่เป็นเม็ดลงไปภาชนะ รูปทรงของแต่ละเม็ดจะทำให้ผิวของเม็ดเชื้อเพลิงแนบกันไม่ได้ นั่นคือเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงนั้นขึ้น ทำให้เปลืองปริมาตรในภาชนะ บรรจุได้น้ำหนักน้อยเนื่องจากมีช่องว่าง อากาศ ทำให้ค่าความหนาแน่นโดยรวมต่ำลง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตก๊าซจะเปลืองเนื้อที่ประมาณร้อยละ 20 – 70 ของปริมาตรบรรจุ

**2.5.5 สารระเหยในเชื้อเพลิง สารระเหย (Volatile matter)** ที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ซึ่งจะก่อตัวเป็นน้ำมันดินหรือน้ำมันที่กลิ่นตัวต่างๆ ถ้าเชื้อเพลิงมีสารระเหยมากอาจสร้างปัญหาได้ เนื่องจากน้ำมันดินและไอน้ำมันที่อุณหภูมิควบแน่น 120 – 150 องศาเซลเซียสจะเกาะฝังตัวบนผนังจึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

**2.5.6 ซี้เถ้า** เกิดจากสารแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนขณะเผาไหม้ ในความเป็นจริงอาจจะมีถ่านชาร์ค้ำอยู่ด้วย สัดส่วนของซี้เถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาแก๊สซิฟายเออร์ ถ้าสัดส่วนซี้เถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูง ก็จะทำให้พลังงานของก๊าซเชื้อเพลิงลดลง และเตาแก๊สซิฟายเออร์ต้องสำรองเนื้อที่เก็บซี้เถ้ามากขึ้น และหากซี้เถ้าหลอมตัว (ซึ่งมีโอกาสเกิดมากขึ้นเมื่อสัดส่วนซี้เถ้ามีมากขึ้น ซิวมวลส่วนใหญ่จะมีซี้เถ้าประมาณร้อยละ 1 -3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนซี้เถ้าประมาณร้อยละ 10 -20 ) จะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัดพอสสมควร

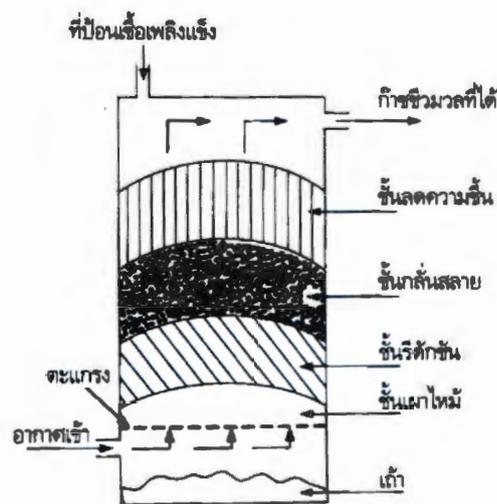
**2.5.7 ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (Bed thickness)** มีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในเตาเผาในกรณีที่ความหนาของชั้นเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันมีช่วงกว้างขึ้นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์

## 2.6 ชนิดของเตาแก๊สซิฟายเออร์

### 2.6.1 เตาแบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง

เตาแบบนี้สามารถแบ่งตามทิศทางการไหลของอากาศเป็น 3 แบบ

2.6.1.1 เตาแบบก๊าซไหลขึ้น (Updraftgasifier) เป็นเตาที่ผลิตใช้เริ่มแรกและเป็นเตาแบบง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาด้านล่าง บริเวณเหนือตะแกรงจะเป็นบริเวณการเผาไหม้เชื้อเพลิง เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ก๊าซร้อนที่ผ่านจากบริเวณเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูง และถูกส่งไปยังบริเวณปฏิกิริยารีดักชันซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนมากเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้เป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และแตกตัวในช่วงอุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นก๊าซก็จะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลใหม่ที่เพิ่งป้อน ก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่จึงระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้นออก ทำให้ก๊าซที่ออกจากเตาชีวมวลอุณหภูมิต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 2.10

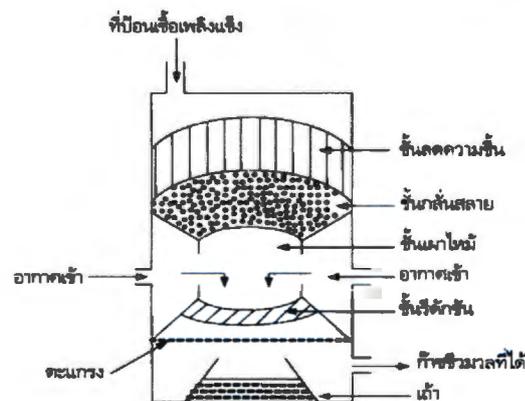


ภาพที่ 2.10 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลขึ้น

เตาประเภทนี้มีรูปแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมาก และก๊าซชีวมวลที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่มีข้อจำกัดคือ ก๊าซที่ผลิตได้จะมีผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำมัน และน้ำมันดินเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากจากบริเวณที่เกิดไพโรไลซิสและกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นก๊าซที่ได้จากเตาประเภทนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้กับหม้อไอน้ำหรือการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร ซึ่งก๊าซที่ได้จะผสมกับอากาศและทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป

เตาเผาประเภทนี้เหมาะกับชีวมวลหลากหลายชนิด ง่ายต่อการเตรียมเชื้อเพลิง มีประสิทธิภาพสูงเพราะได้อุณหภูมิก๊าซออกมาต่ำ ติดตั้งง่ายและสะดวก แต่มีข้อเสียคือมีปริมาณน้ำมันดินออกมามาก เพราะน้ำมันดินที่ผลิตได้ในบริเวณไพโรไลซิสไม่ได้ผ่านบริเวณปฏิริยาการเผาไหม้ก่อนออก จึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนของน้ำมันดินน้อย การกำจัดน้ำมันดินที่ควบแน่นออกมาเป็นปัญหาใหญ่ของแก๊สซิฟายเออร์ประเภทนี้ การปรับการออกแบบบางอย่างสามารถลดปริมาณน้ำมันดินได้ เช่นการดึงก๊าซที่ผลิตได้ออกที่เหนือบริเวณรีดักชัน หรือการเติมไอน้ำร้อนผสมเข้ากับอากาศเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิริยา Water gas และจะได้ก๊าซที่มีคุณภาพดีขึ้น

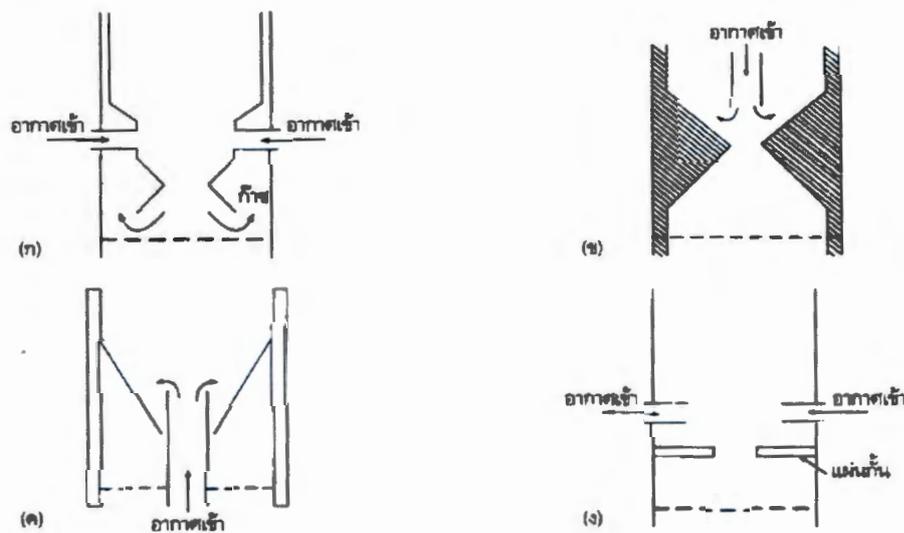
2.6.1.2 เตาแบบก๊าซไหลลง (Downdraft gasifier) เตาประเภทนี้ ออกแบบขึ้นมาเพื่อขจัดน้ำมันดินที่อยู่ในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนสู่ด้านล่างของเตาผ่านกลุ่มของหัวฉีดซึ่งเรียกว่า Tuyers บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ ก๊าซที่ได้จากบริเวณนี้จะเกิดรีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรง ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนและไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 800 – 1,000 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิริยาดูดความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินแม้ปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 ของน้ำมันและน้ำมันที่ได้จากเตาแบบก๊าซไหลขึ้น และก๊าซที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลง เตาแบบก๊าซไหลขึ้นไหลลงจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำถ้าจะอยู่บริเวณตะแกรงดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าถ่านติดออกมากับก๊าซเชื้อเพลิงน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลลง

ในเตาแบบก๊าซไหลลง ไอน้ำมันดินจากไพโรไลซิสจะต้องผ่านบริเวณการเผาไหม้

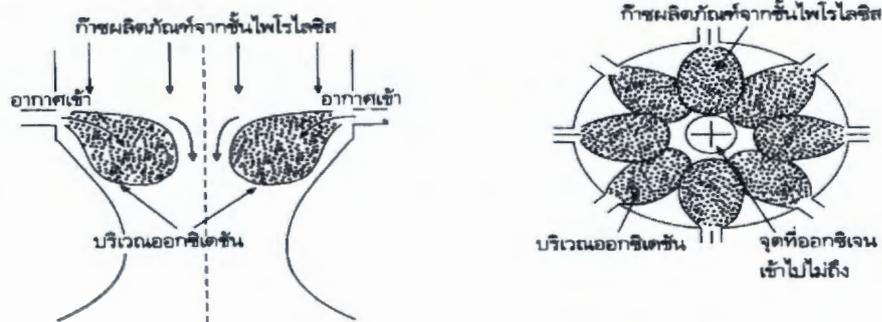
จึงถูกทำให้สลายตัวทางความร้อน เตาประเภทนี้ออกแบบให้มีพื้นที่หน้าตัดแคบลงโดยมีการป้อนอากาศเข้าเหนือจุดพื้นที่หน้าตัดที่แคบที่สุดเรียกว่าคอคอด (Throat) เพื่อกำหนดให้เกิดบริเวณถ่านร้อนแดงแคบ ๆ ที่บังคับให้ก๊าซจากไพโรไลซิสผ่าน ยิ่งบริเวณคอคอดลดลงมากจะทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้เพ่งสูงขึ้นภายในขอบเขตจำกัดระดับหนึ่ง แต่หากคอคอดเล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมากซึ่งจะกีดขวางการไหลของก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลหากมีขนาดไม่เหมาะสม เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบก๊าซไหลลงมีหลายแบบ ซึ่งสามารถจับกลุ่มรวมกันได้ 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ลักษณะคอคอดและการจ่ายลมของเตาแบบก๊าซไหลลง

- (ก) คอคอดปกติ กับท่อป้อนอากาศรอบผนัง
- (ข) คอคอดปกติ กับท่อป้อนอากาศตรงกลางข้าง
- (ค) คอคอดปกติ กับท่อป้อนอากาศตรงกลางชี้ขึ้น
- (ง) แผ่นกั้นกับท่อป้อนอากาศรอบผนัง

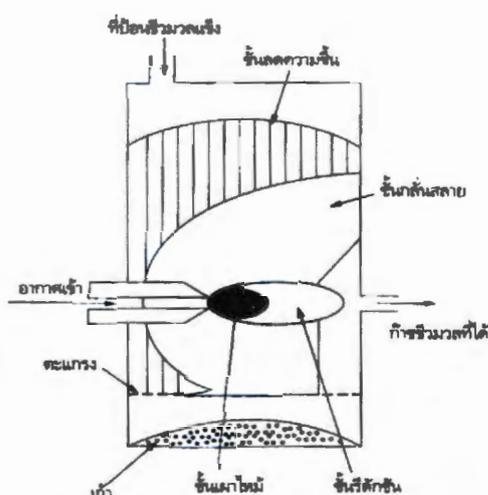
ภาพที่ 2.12 แสดงแผนภาพของบริเวณออกซิเดชันด้านหน้าของท่อป้อนอากาศรอบผนังบริเวณระหว่างท่อติดกับผนังและบริเวณตรงกลางเตาจะเป็นจุดที่ออกซิเจนไปไม่ถึง ทำให้มีอุณหภูมิต่ำ ฉะนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสที่ผ่านบริเวณนี้จะไม่เกิดการเผาไหม้ แต่อาจจะมีการสลายตัวทางความร้อนได้สมบูรณ์ (Complete reforming) ระบบที่ใช้ท่อป้อนอากาศรอบผนังจึงมีโอกาที่จะปล่อยไอน้ำมันดินออกมาได้มากกว่าระบบที่ใช้ท่อป้อนอากาศตรงกลางซึ่งมีโซนออกซิเดชันตรงคอคอดดีและครอบคลุมกว่า อย่างไรก็ตามระบบที่มีท่อป้อนอากาศตรงกลางจะขวางการไหลของเชื้อเพลิงชีวมวลและอาจจะเพิ่มการเกิดปัญหาเกิดขวาง (Bridging) ในคอคอดได้ส่งผลให้ชั้นเชื้อเพลิงหลวม มีช่องให้ก๊าซและไอน้ำมันดินเส็ดลอดไปได้ โดยไม่เกิดปฏิกิริยาแตกตัว



ภาพที่ 2.13 บริเวณการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ

เตาแก๊สซิฟายเออร์แบบก๊าซไหลลงจะไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีเศษถ่านมาก ๆ เพราะสแลกหรือเศษถ่านหลอมที่เกิดขึ้นจากบริเวณออกซิเดชันจะไหลลงด้านล่าง เย็นตัวลงและแข็งตัว เป็นก้อนอย่างรวดเร็ว และจะกีดขวางการไหลของก๊าซและเชื้อเพลิง หากจำเป็นต้องใช้กับเชื้อเพลิงที่มี ถ่านมาก จะต้องทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของเศษถ่านและใช้ตะแกรงที่หมุนหรือขยับได้ ใน เตาแบบนี้ไม่จำเป็นต้องมีการฉีดไอน้ำเข้าไป เพราะปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงและอากาศมีเพียงพอ ต่อการเกิดปฏิกิริยาอยู่แล้ว

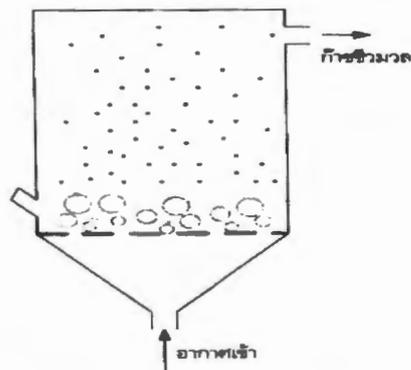
2.6.1.3 แบบก๊าซไหลขวาง เตาประเภทนี้แสดงดังภาพที่ 14 อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีด ซึ่งอยู่ในแนวราบบริเวณการเผาไหม้จะอยู่ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปอีกจะเป็นบริเวณการเกิด ริดักชัน แล้วก๊าซชีววมวลจะออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงรอบเตา ซึ่งอยู่ในแนวตั้งโดยรอบ ไอสาร ระเหยและน้ำมันดินที่ได้จากการไพโรไลซิสจะผ่านบริเวณริดักชันอุณหภูมิสูงก่อนที่จะออกไปสู่ ภายนอกเตา ซึ่งทำให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นพาทนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมี ผลตอบสนองที่เร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของภาวะที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับเตาแบบนี้ควร เป็นถ่านไม้ที่มีคุณภาพสูง [10]



ภาพที่ 2.14 ลักษณะของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบไหลขวาง

### 2.6.2 เตาแบบชั้นของไหล

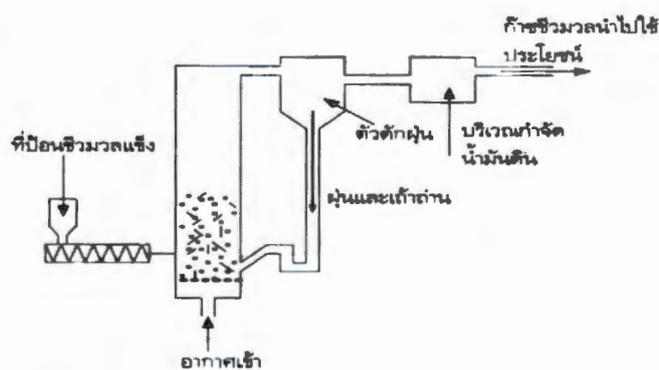
เมื่อพิจารณาเตาแบบชั้นเชื้อเพลิงทั้งสามแบบ จะเห็นว่าการทำงานของกระบวนการในระบบจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพทางกายภาพของเชื้อเพลิง โดยที่จะเกิดปัญหาจากเศษถ่านลอมที่เกิดขึ้นมากเกินไป จึงก่อให้เกิดการอุดตันในเตาบ่อยครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเอาเตาเผาแบบชั้นของไหล (Fluidized bed) มาใช้ดังภาพที่ 2.15 การทำให้มีสถานะเหมือนของไหล (Fluidization) หมายถึง การทำให้กลุ่มเม็ดของแข็งขนาดเล็กเปลี่ยนไปมีสถานะคล้ายของไหลโดยการสัมผัสกับก๊าซหรือของเหลว ในชั้นของไหล (Fluidized bed) แรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อน้ำหนักเม็ดของแข็งจะถูกต้านด้วยแรงจากการไหลขึ้นของก๊าซ ทำให้เม็ดของแข็งอยู่ในสถานะกึ่งแขวนลอย พิจารณาการไหลของก๊าซหรืออากาศผ่านชั้นกลุ่มเม็ดของแข็งที่กองอยู่บนตะแกรงพรุนภายในช่องท่อ เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มสูงขึ้นจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเหล่านี้โดยที่ความเร็วก๊าซต่ำ ๆ กลุ่มเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งกับที่ตามปกติบนพื้นตะแกรง เมื่อความเร็วสูงขึ้นเรื่อย ๆ แรงยกบนเม็ดของแข็งจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งยกตัว ชั้นเม็ดของแข็งขยายตัวออกอยู่ในสภาพกึ่งแขวนลอยคล้ายของเหลวที่กำลังเดือดหากเพิ่มความเร็วก๊าซขึ้นไปอีก ก็จะมีแรงมากพอที่จะเป่าเม็ดของแข็งเหล่านี้ให้หลุดออกไปได้



ภาพที่ 2.15 ลักษณะของเตาแบบชั้นของไหล

เตาแบบนี้มีข้อดีคือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาสามารถกระทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของเถ้าหลอมที่เกิดขึ้น จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากได้ ข้อเสียของเตาแบบนี้คือก๊าซชีววมวลที่ออกจากเตาจะมีเถ้าและฝุ่นถ่านออกมาด้วยมาก เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตามีค่าสูง

เตาแบบชั้นของไหลยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบฟองอากาศ (Bubbling) และแบบหมุนวน (Circulating) ชั้นของไหลแบบฟองอากาศเกิดที่ความเร็วก๊าซต่ำ ในขณะที่ชั้นของไหลหมุนวนถูกพัฒนาเพื่อลดปริมาณถ่านที่หลุดรอดจากปฏิกิริยา (Carbon carryover) โดยการนำกลับมาวนเข้าเตาซ้ำ ชั้นของไหลแบบนี้จะมีความเร็วของก๊าซสูงกว่าแบบฟองอากาศธรรมดา ทำให้มีระดับความปั่นป่วนสูง อนุภาคถูกพัดออกไปนอกชั้นของไหลและถูกดักด้วยลมวนไซโคลนดึงกลับเข้ามาในห้องเผาไหม้อีกครั้งดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างเตาแบบชั้นของไหลหมุนวน

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและการทำงานของเตาเผา [8]

ความไวต่อ	แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง		แบบชั้นของไหล	
	ก๊าซไหลขึ้น	ก๊าซไหลลง	ฟองอากาศ	หมุนวน
ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิง	ปานกลาง	เฉพาะชนิด	ยืดหยุ่นได้	ยืดหยุ่นได้
ขนาดเชื้อเพลิง	ดีมาก	ดี	พอใช้	พอใช้
ปริมาณความชื้น	ดีมาก	พอใช้	ดี	ดี
ปริมาณขี้เถ้า	แย่	แย่	ดีมาก	ดีมาก
อุณหภูมิปฏิกิริยา	1,000°C	1,000°C	850°C	850°C
การผสมกันของเชื้อเพลิง	แย่	แย่	ดีมาก	ดีเยี่ยม
อุณหภูมิก๊าซออก	250°C	800°C	800°C	850°C
ปริมาณน้ำมันดินในก๊าซ	สูงมาก	ต่ำมาก	ปานกลาง	ต่ำ
ปริมาณฝุ่นในก๊าซ	สูง	ปานกลาง	สูงมาก	สูงมาก
การเริ่มต้นกระบวนการ	แย่	แย่	ดี	ดี
การแปลงสภาพคาร์บอน	ดีมาก	ดีมาก	พอใช้	ดีมาก
ประสิทธิภาพทางความร้อน	ดีเยี่ยม	ดีมาก	ดี	ดีมาก
ค่าความร้อนของก๊าซ	แย่	แย่	แย่	พอใช้

## 2.7 พารามิเตอร์และการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบผลิตก๊าซชีววมวลมีหลายค่าเช่น อัตราการไหลของอากาศ อัตราการใช้เชื้อเพลิง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล เป็นต้น และค่าต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณและประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซได้ [6]

### 2.7.1 Superficial velocity

Superficial velocity เป็นค่าที่ใช้ในการควบคุมอัตราการผลิตก๊าซ ค่าความร้อนของก๊าซ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงพลังงานที่ได้และอัตราการผลิตถ่านและน้ำมันดินซึ่งมีความสำคัญมากในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวล มีค่านิยาม Superficial velocity, SV ไว้ดังสมการที่ 2.26

$$SV = \frac{\text{อัตราการผลิตก๊าซชีววมวล}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่น้อยที่สุด}} \text{ (m/s)} \quad (2.26)$$

### 2.7.2 Heart load (Bs)

Bs คือปริมาณของเชื้อเพลิงแห้งที่ใช้หารด้วยพื้นที่หน้าตัดน้อยที่สุด มีหน่วยเป็น kg/cm<sup>2</sup>/h และ Bg คือปริมาตร ก๊าซที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดต่อชั่วโมง มีหน่วยเป็น m<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>/h เนื่องจาก 1 kg ของเชื้อเพลิงแห้งที่อยู่ด้านล่างของพื้นที่หน้าตัดดังกล่าว สามารถผลิตก๊าซชีววมวลได้ 2.5 m<sup>3</sup> ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองได้ดังสมการที่ 2.27-2.28

$$B_g = 2.5 B_s \quad (2.27)$$

$$B_g = 0.36 SV \quad (2.28)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า Heart load จะใช้ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงเท่านั้น ซึ่งค่า Heart load นี้เป็นหัวใจหลักในการออกแบบเพื่อกำหนดค่าอื่นๆต่อไป

### 2.7.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ER, $\phi$ )

เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซชีววมวล จึงได้มีการกำหนด อัตราส่วนสมมูลขึ้น โดยให้นิยามว่า อัตราส่วนสมมูลระหว่างน้ำหนักของอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงแห้งจริง เทียบกับ อัตราส่วนสมมูลของน้ำหนักของอากาศต่อน้ำหนักของเชื้อเพลิงแห้งตามทฤษฎี ในการวิเคราะห์ระบบผลิตก๊าซชีววมวลสามารถคำนวณโดยใช้สูตรดังสมการที่ 2.29

$$\text{Equivalence ratio } \phi = \frac{(\text{Flow rate of air supply}) \times (\text{Duration of the run})}{(\text{Mass input of wood}) \times \left(\frac{A}{F} \text{ for } \phi = 1\right)} \quad (2.29)$$

ซึ่งอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง  $\left(\frac{A}{F}\right)$  สำหรับ  $\phi = 1$  คือ 5.22 m<sub>air</sub><sup>3</sup>/kg ของเชื้อเพลิงแห้งอัตราส่วนสมมูล สำหรับการผลิตก๊าซชีววมวลอยู่ในช่วง 0.268 – 0.43 ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วอยู่ในช่วง 0.19- 0.43

กรณี ER = 0 เป็นการสลายตัวด้วยความร้อนโดยไม่ใช้อากาศหรือปฏิกิริยา ไพโรไลซิส

และกรณี ER = 1 แสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ 100% พอดีตามทฤษฎี

### 2.7.4 อัตราแก๊สซิฟิเคชันจำเพาะ (Specific Gasification rate: SRG)

อัตราแก๊สซิฟิเคชันจำเพาะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณเชื้อเพลิงแห้งที่ใช้ไปกับแก๊สซิฟิเคชันให้ได้ก๊าซโปรตีนเซอร์ ต่อ 1 หน่วยพื้นที่ของคอคอดหรือตะแกรงในเวลา 1 ชั่วโมง หน่วยที่ใช้บอกปริมาณคือ g/rn<sup>2</sup>-h โดยคิดจากน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ไม่มีความชื้น

### 2.7.5 Turn Down ratio

ค่าที่เป็นตัวบอกความสม่ำเสมอที่จะเดินเครื่องได้ทั้งขณะเบาเครื่อง และเร่งเครื่อง คือค่า Turn down ratio สำหรับเครื่องผลิตก๊าซ

$$\text{ค่า Turn down ratio} = \frac{\text{ค่าสูงสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชั่นที่เกิดขึ้นได้}}{\text{ค่าต่ำสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชั่นที่เกิดขึ้นได้}} \quad (2.30)$$

ค่าสูงสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชั่นของเครื่องผลิตก๊าซแบบไหลลง =  $1 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-h}$  กรณีใช้ไม่เป็นเชื้อเพลิง ค่าต่ำสุดของอัตราแก๊สซิฟิเคชั่นของเครื่องผลิตก๊าซแบบ Imbert =  $0.3 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-h}$  ค่า Turn down ratio ที่เหมาะสมกับรถยนต์ทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 4 – 6

### 2.7.6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

ค่าที่มีความสำคัญทางด้านเทคนิค ในการอธิบายความสามารถของระบบผลิตก๊าซชีววมวล คือค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งคือปริมาณก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้ต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตก๊าซชีววมวล สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.31

$$\eta_m = \frac{H_g \times Q_g \times 100(\%)}{H_s + M_s} \quad (2.31)$$

โดย

$\eta_m$  = ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีววมวล (%)

$H_g$  = ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )

$Q_g$  = อัตราการไหลของก๊าซชีววมวล ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$H_s$  = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงชีววมวล ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )

$M_s$  = อัตราการใช้เชื้อเพลิง ( $\text{kg}/\text{s}$ )

### 2.7.7 ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล (Heating value)

ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล คำนวณได้จาก องค์ประกอบของก๊าซตามสมการที่ 2.32

$$H_{ig} = \frac{12680 V (\text{CO}) + 10800 V (\text{H}_2) + 35900 V (\text{CH}_4)}{1 + 2.38V (\text{CO}) + 2.38V (\text{H}_2) + 9.52V (\text{CH}_4)} \quad (2.32)$$

$H_{ig}$  = ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวล ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )

$V (\text{CO})$  = สัดส่วนโดยปริมาตรของคาร์บอนมอนอกไซด์ (ก่อนผสมกับอากาศ)

$V(H_2) =$  สัดส่วนโดยปริมาตรของไฮโดรเจนในอากาศ (ก่อนผสมกับอากาศ)

$V(CH_4) =$  สัดส่วนโดยปริมาตรของมีเทนในก๊าซ (ก่อนผสมกับอากาศ)

ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวลที่ผสมกับอากาศแล้วจะมีค่าประมาณ  $2,500 \text{ kJ/m}^3$

## 2.8 เครื่องยนต์ก๊าซชีวมวล

เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นเครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ภายในปริมาตรจำกัด จนเกิดให้กำลังงานออกมา ที่ใช้งานแพร่หลายได้แก่ เครื่องยนต์ดีเซลที่ผลิตโดย Rudolph diesel และเครื่องยนต์ Otto หรือเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ซึ่งประเทศไทยเรียกว่าเครื่องยนต์เบนซิน ที่ผลิตโดย Nikolus August Otto

การใช้งานก๊าซชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อใช้เป็นต้นกำลังในงานเชิงกลหรือสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นเรื่องที่น่าสนใจมากแต่ในการใช้งานมีข้อที่จะต้องพิจารณาคือ เมื่อใช้ก๊าซชีวมวลผสมอากาศจะมีความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลผสมอากาศและก๊าซโซลีนผสมอากาศ ก๊าซชีวมวลสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ โดยแบ่งตามลักษณะการใช้เชื้อเพลิงได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.8.1 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงเดี่ยว เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวมวลเพียงอย่างเดียว จุดระเบิดด้วยประกายไฟ ดัดแปลงมาจากเครื่องยนต์ก๊าซโซลีนหรือเครื่องยนต์ดีเซลก็ได้ มีข้อดีคือสามารถทำงานโดยใช้ก๊าซชีวมวลเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีสิ่งจำเป็นที่ต้องมีการปรับปรุงเครื่องยนต์ก่อนนำมาใช้งานมีดังนี้ กรณีดัดแปลงจากเครื่องยนต์ดีเซล ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ดังนี้

2.8.1.1 ติดตั้งอุปกรณ์ผสมก๊าซเชื้อเพลิงกับอากาศ (Gas mixer) ที่บริเวณท่อร่วมไอดี บริเวณหน้าลิ้นปีกผีเสื้อ เพื่อผสมอากาศกับเชื้อเพลิง

2.8.1.2 ติดตั้งลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle valve) เพื่อใช้ควบคุมอัตราการไหลของไอดี

2.8.1.3 ติดตั้งวาล์วปรับอัตราการไหลของก๊าซ เพื่อควบคุมปริมาณก๊าซและอากาศในอัตราส่วนที่เหมาะสม

2.8.1.4 ถอดหัวฉีดดีเซลออกแล้วติดตั้งหัวเทียนแทน เพื่อจุดระเบิด และติดตั้งระบบจุดระเบิดใหม่เข้าไป

2.8.2 เครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม (Dual-fuel engine) เป็นเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับก๊าซชีวมวล ทำงานโดยผสมก๊าซชีวมวลกับอากาศให้อัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจ่ายเข้าทางไอดีของเครื่องยนต์ จากนั้นหัวฉีดดีเซลจะฉีดน้ำมันดีเซลปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ น้ำมันดีเซลเป็นตัวเริ่มการเผาไหม้ จากนั้นก็จะเผาไหม้ก๊าซชีวมวลต่อไป มีข้อดีคือ สามารถดัดแปลงเครื่องให้มาใช้กับก๊าซชีวมวลได้ง่าย สามารถเดินเครื่องดีเซลเพียงอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับก๊าซชีวมวลก็ได้

## 2.9 สมรรถนะและตัวแปรในการทำงานของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

สมรรถนะของเครื่องยนต์ หมายถึง ความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งจะถูกกำหนดโดยกำลังสูงสุด หรือ ทอร์กสูงสุด ที่ให้ออกมาที่อัตราเร็วรอบหนึ่งๆ ตลอดช่วงเวลาการใช้งานของเครื่องยนต์ช่วงของอัตราเร็วเครื่องยนต์และกำลังที่เครื่องยนต์ทำงานได้ดี

กำลังและอัตราเร็วที่นิยมใช้ในการแสดงสมรรถนะของเครื่องยนต์จะแบ่งเป็น

(1) กำลังที่กำหนดสูงสุด (Maximum rated power) เป็นกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ให้ออกมาได้ในช่วงการทำงานสั้น ๆ

(2) กำลังที่กำหนดปกติ (Normal rated power) เป็นกำลังสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ให้ออกมาได้สำหรับการทำงานอย่างต่อเนื่อง

(3) อัตราเร็วที่กำหนด (Rated speed) เป็นอัตราเร็วรอบของการหมุนของเพลาช้อเหวียงซึ่งกำลังที่กำหนดถูกให้ออกมา

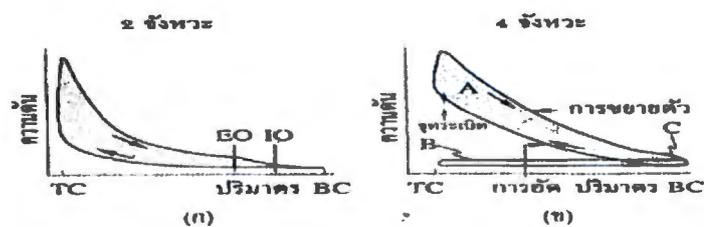
### 2.9.1 กำลัง

กำลัง (Power) เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดสมรรถนะของเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในและเป็นค่าที่กำหนดความต้องการของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เครื่องยนต์ต้องขับเคลื่อนให้ พารามิเตอร์เกี่ยวกับกำลังมีอยู่หลายตัวคือ กำลังบ่งชี้ กำลังเบรก และกำลังความเสียดทาน

### 2.9.2 กำลังบ่งชี้

กำลังบ่งชี้ (Indicated power,  $P_i$ ) เป็นกำลังที่ถ่ายทอดจากเชื้อเพลิงภายในกระบอกสูบไปสู่ลูกสูบ ต่อวัฏจักรการทำงาน (Indicated work per cycle,  $W_{ci}$ ) ที่ได้จากการอินทิเกรตโดยรอบกราฟระหว่างค่าความดันและปริมาตรกระบอกสูบ (P-V diagram) ตลอดวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดังสมการที่ 2.33

$$W_{ci} = \int p dV \quad (2.33)$$



ภาพที่ 2.17 ตัวอย่างของกราฟระหว่างความดันและปริมาตรกระบอกสูบของ  
(ก) เครื่องยนต์สองจังหวะ (ข) เครื่องยนต์สี่จังหวะ [9]

กราฟระหว่างความดันและปริมาตรกระบอกสูบจะหาได้โดยตรงจากเครื่องมือที่เรียกว่า อินดิเคเตอร์เครื่องยนต์ (Engine indicator) ซึ่งเดิมใช้เป็นอินดิเคเตอร์เชิงกลแต่ปัจจุบันนิยมใช้อินดิเคเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้อินดิเคเตอร์อิเล็กทรอนิกส์

ในการหาค่ากำลังบ่งชี้ นอกจากจะหางานต่อวัฏจักรแล้วยังจะต้องวัดอัตราเร็วรอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยงด้วยซึ่งจะได้กำลังบ่งชี้ต่อกระบอกสูบ ( $P_i$ ) เป็นดังสมการที่ 2.34

$$P_i = \frac{W_c N}{n_R} \quad (2.34)$$

โดย  $N$  เป็นอัตราเร็วรอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยง

$n_R$  เป็นจำนวนรอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยงที่ได้จังหวะกำลัง 1 จังหวะต่อลูกสูบ สำหรับเครื่องยนต์สองจังหวะ  $n_R = 1$  และเครื่องยนต์สี่จังหวะ  $n_R = 2$

### 2.9.3 กำลังเบรก

กำลังเบรก ( Brake Power,  $P_b$ ) เป็นกำลังที่วัดได้ที่เพลาค้อเหวี่ยงหรือที่ล้อตุนกำลังของเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นกำลังที่นำไปใช้งานได้นั่นเอง การวัดกำลังเบรกจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าไดนามอมิเตอร์ (Dynamometer) โดยจะวัดออกมาในรูปของทอร์กและรอบการหมุนของเครื่องยนต์ซึ่งจะได้ทอร์กดังสมการที่ 2.35

$$T = Fr \quad (2.35)$$

และกำลังเบรกดังสมการที่ 2.36

$$P_b = 2\pi TN \quad (2.36)$$

โดย  $N$  เป็นรอบการหมุนของเพลาค้อเหวี่ยงซึ่งในหน่วยเอสไอจะได้  $P_b$  (หน่วยเป็น kW)  $= 2\pi N$  (หน่วยเป็น rev/s)  $T$  (หน่วยเป็น Nm)  $\times 10^{-3}$

### 2.9.4 กำลังเสียดทาน

กำลังเสียดทาน (Friction power,  $P_f$ ) หมายถึง กำลังรวมของกำลังที่ใช้ในการนำเอาไอดีเข้า เอาไอเสียออก กำลังที่เอาชนะแรงเสียดทานของชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ และกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นต่อการทำงานของเครื่องยนต์

### 2.9.5 ประสิทธิภาพเชิงกล

จากกำลังบ่งชี้และกำลังเบรก ค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังเบรกกับกำลังบ่งชี้ จะเรียกว่า

ประสิทธิภาพเชิงกล (Mechanical efficiency,  $\eta_m$ ) ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกลจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ ลื่นแรง การออกแบบเครื่องยนต์และอัตราเร็วของเครื่องยนต์

### 2.9.6 ความดันยังผลเฉลี่ย

ทอร์คเป็นการวัดความสามารถในการทำงานของเครื่องยนต์ แต่ทอร์คจะขึ้นอยู่กับขนาดของ เครื่องยนต์ถ้าเครื่องยนต์ขนาดแตกต่างกันจะไม่สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะได้ จึงมีการกำหนดการ วัดสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบขึ้นโดยได้จากการหางานต่อวัฏจักรด้วยปริมาตร กระจัดต่อวัฏจักร ค่าที่ได้มีหน่วยแรงต่อพื้นที่ จึงเรียกว่าความดันยังผลเฉลี่ย (Mean effective pressure, mep) สมการที่ 2.37

$$\text{mep (หน่วยเป็น kPa)} = \frac{P(\text{หน่วยเป็น kW})n_R \times 10^3}{V_d (\text{หน่วยเป็น dm}^3)N(\text{หน่วยเป็น (rev/s)})} \quad (2.37)$$

โดย  $V_d$  เป็นปริมาตรกระจัด

ค่าความดันยังผลเฉลี่ยจะมีความหมายตามกำลังที่ใช้ในการหา ถ้าใช้กำลังบ่งชี้ก็จะได้ เป็นความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (Indicated mean effective pressure, imep) และถ้าใช้เป็นกำลัง เบรก จะได้เป็นความดันยังผลเฉลี่ยเบรก (Brake mean effective pressure, bmep)

### 2.9.7 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

ในการทดสอบเครื่องยนต์ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะถูกวัดเป็นอัตราการไหลของมวล ( $\dot{m}_f$ ) ซึ่งเครื่องยนต์ขนาดใหญ่จะมีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการ เปรียบเทียบได้ จึงกำหนดในรูปแบบของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption, sfc) ซึ่งเป็นอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อหน่วยกำลังที่ให้ออกมาและเป็นการวัด ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ในการใช้เชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานออกมดังสมการที่ 2.38

$$\text{sfc} = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2.38)$$

Sfc (หน่วยเป็น mg/J) =  $\dot{m}_f$  (หน่วยเป็น g/s)/P(หน่วยเป็น kW)

ค่าสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะยิ่งต่ำก็ยิ่งดี ทั่วไปจะคำนวณในรูปแบบของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, bsfc) คืออัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงต่อ หน่วยกำลังเบรกที่ให้ออกมา

### 2.9.8 อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของมวลอากาศ ( $\dot{m}_a$ ) และอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง ( $\dot{m}_f$ ) อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอากาศต่อการไหลของเชื้อเพลิงนี้จะเป็นประโยชน์ในการกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ดังสมการที่ 2.39

$$\text{อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F)} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (2.39)$$

ในช่วงการทำงานปกติสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟทั่วไปที่ใช้น้ำมันเบนซิน จะมีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง  $12 < A/F < 18$  และสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดที่ใช้น้ำมันดีเซลจะมีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง  $18 < A/F < 70$

### 2.9.9 อัตราส่วนการอัดของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิง

ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง โดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนกำลังอัดอยู่ในช่วง 8-12 และสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดจะมีค่า 12-24 แต่เมื่อนำก๊าซชีววมวลมาใช้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและกำลังที่สูงขึ้น จะต้องมีการปรับอัตราส่วนการอัดให้เหมาะสม การคำนวณอัตราส่วนกำลังอัด (CR) หาได้จากสมการที่ 2.40

$$CR = \frac{\text{ปริมาตรกระบอกสูบสูงสุด}}{\text{ปริมาตรกระบอกสูบต่ำสุด}} = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.40)$$

โดยที่  $V_d$  = ปริมาตรกระจัด

$V_c$  = ปริมาตรช่องว่าง

จากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงสามารถปรับอัตราส่วนการอัดได้สูงถึง 17:1 โดยไม่มีสัญญาณการน็อกเกิดขึ้น (Shridha:2001) การเพิ่มอัตราส่วนการอัดสามารถทำได้โดย

2.9.9.1 เปลี่ยนลูกสูบเพื่อลดขนาด Clearance volume

2.9.9.2 เปลี่ยนฝาสูบเพื่อลดขนาด Clearance volume

2.9.9.3 ปาดฝาสูบหรือเปลี่ยนปะเก็นฝาสูบให้บางลงเพื่อลดขนาด Clearance volume

## 2.10 การเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

### 2.10.1 ลักษณะที่สำคัญของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด

ลักษณะที่สำคัญของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดหรือเครื่องยนต์ดีเซลนั้นพอสรุปได้คือ เชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไป ในกระบอกสูบ โดยระบบฉีดเชื้อเพลิงที่ปลายของจังหวะอัดก่อนการเริ่มต้นเผาไหม้ที่ต้องการเล็กน้อย ตามปกติแล้วเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าไปด้วยความเร็วสูง โดยผ่านรูหัวฉีดรูเดียวหรือหลายรู เมื่อเชื้อเพลิงผ่านพ้นปลายของหัวฉีดก็จะแตกเป็นละอองฝอยและพุ่งเข้าไปในห้องเผาไหม้แล้วจะระเหยและผสมกับอากาศที่มีอุณหภูมิและความดันสูงที่อยู่ในกระบอกสูบ เนื่องจากอุณหภูมิและความดันของอากาศสูงกว่าจุดการระเบิดของเชื้อเพลิง การจุดระเบิดเองของส่วนที่เป็นสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศก็จะเกิดขึ้นหลังช่วงล่าช้าไม่กี่องศาเพลอาข้อเหวี่ยง เมื่อเกิดการเผาไหม้ของสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศเกิดขึ้น ความดันในกระบอกสูบก็จะเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการอัดส่วนที่ยังไม่เผาไหม้ ซึ่งทำให้ช่วงล่าช้าก่อนการจุดระเบิดของสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ได้ผสมกันโดยมีสัดส่วนอยู่ในขีดจำกัดที่สามารถเผาไหม้ได้นั้นสั้นลง การเผาไหม้ก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วเวลาในการระเหยของเชื้อเพลิงที่เหลือก็จะลดลงด้วย สำหรับการฉีดเชื้อเพลิงก็จะมีต่อเนื่องไปจนกระทั่งปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการได้เข้าไปในกระบอกสูบแล้ว ส่วนกระบวนการแตกเป็นละอองฝอย การระเหย การผสม ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และการเผาไหม้ก็จะมีต่อเนื่องไปจนกระทั่งเชื้อเพลิงทั้งหมด ได้ผ่านแต่ละกระบวนการดังกล่าวมาแล้ว นอกจากนี้การผสมของอากาศที่เหลือในกระบอกสูบกับก๊าซที่กำลังเผาไหม้และที่เผาไหม้แล้วก็จะเกิดขึ้นต่อไปตลอดกระบวนการเผาไหม้และกระบวนการขยายตัว

จะเห็นได้ว่ากระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดค่อนข้างซับซ้อน โดยรายละเอียดของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับสมบัติของเชื้อเพลิง การออกแบบห้องเผาไหม้ของระบบฉีดเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ สำหรับผลที่สำคัญของกระบวนการเผาไหม้ที่มีต่อการทำงานของเครื่องยนต์มีดังต่อไปนี้

2.10.1.1 เนื่องจากการฉีดเชื้อเพลิงเกิดก่อนการเริ่มต้นการเผาไหม้เล็กน้อย ดังนั้นจึงไม่มีข้อจำกัดของการน็อกเหมือนในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟซึ่งเป็นผลมาจากการจุดระเบิดเองของเชื้อเพลิงและอากาศที่ผสมกันก่อนแล้วในก๊าซส่วนสุดท้าย ดังนั้นเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด จึงสามารถใช้อัตราส่วนการอัดสูงกว่าได้ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงสูงกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

2.10.1.2 เนื่องจากจังหวะการฉีดเชื้อเพลิงถูกใช้ในการควบคุมจังหวะการเผาไหม้ ช่วงล่าช้าระหว่างการเริ่มฉีดเชื้อเพลิงและการเริ่มต้นการเผาไหม้จะต้องสั้น ซึ่งช่วงล่าช้าที่สั้นนี้ยังจำเป็นต่อการรักษาความดันกระบอกสูบสูงสุดไว้ให้ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่เครื่องยนต์จะทนได้ ดังนั้นสมบัติในการจุดระเบิดของสารผสมเชื้อเพลิงกับอากาศจึงต้องอยู่ภายใต้ช่วงที่กำหนด ซึ่งกระทำได้โดยใช้น้ำมันดีเซลที่

มีเลขซีเทนสูงกว่าค่าที่กำหนด

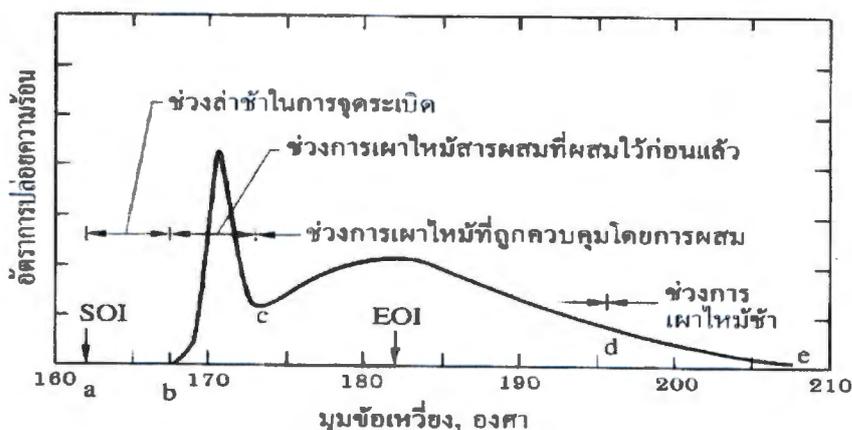
2.10.1.3 เนื่องจากทอร์คของเครื่องยนต์เปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปต่อวัฏจักรโดยที่การไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์เกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้เครื่องยนต์ดีเซลสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีลิ้นเร่ง ดังนั้นงานในการบีบอัดอากาศ เป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงกลที่ภาระบางส่วนสูงกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

2.10.1.4 เมื่อปริมาณเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดเข้าไปต่อวัฏจักรเพิ่มขึ้น ปัญหาการใช้อากาศระหว่างการเผาไหม้จะเกิดขึ้น ซึ่งนำไปสู่การเกิดปริมาณของเขม่า (Soot) จำนวนมากที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดก่อนการคายไอเสียออก ดังนั้นเขม่าจำนวนมากหรือควันดำของไอเสียจึงเป็นตัวจำกัดอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศที่กำลังสูงสุดไว้ที่ค่า 20% (หรือมากกว่า) ซึ่งบางกว่าสารผสมพอดี เป็นผลให้ความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ ของเครื่องยนต์นำอากาศเข้าโดยธรรมชาติ ต่ำกว่าของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟที่สมมูลกัน

2.10.1.5 เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลทำงานด้วยอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศที่บางเสมอ และที่ภาระบางส่วนจะทำงานที่อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงต่ออากาศที่บางมาก ทำให้ค่ายังผลของ  $\gamma (=C_p/C_v)$  ในช่วงกระบวนการขยายตัวสูงกว่าในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงสูงกว่าของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟสำหรับอัตราส่วนการขยายตัวหนึ่งๆ [9] [11]

## 2.10.2 รูปแบบของการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซล

รูปแบบของกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถกำหนดและอธิบายได้จากการศึกษาภาพถ่ายของกระบวนการเผาไหม้และการวิเคราะห์ข้อมูลความดันในกระบอกสูบในช่วงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วจะใช้อัตราการปล่อยความร้อน (Heat release rate) ที่คำนวณจากข้อมูลความดันกระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่าง ๆ เป็นตัวกำหนดรูปแบบของการเผาไหม้ ซึ่งอัตราการปล่อยความร้อน ก็คืออัตราที่ซึ่งพลังงานเคมีของเชื้อเพลิงถูกปล่อยออกมาโดยกระบวนการเผาไหม้นั้นเอง ช่วงต่าง ๆ ของกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลแบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงจะสรุปได้ดังกราฟอัตราการปล่อยความร้อนในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 อัตราการผลิตความร้อนของเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงทั่วไป แสดงช่วงต่างๆของการเผาไหม้ [9]

2.10.2.1 ช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด (Ignition delay period, ab) เป็นช่วงระหว่างการเริ่มต้นของการฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้และการเริ่มต้นของการเผาไหม้ การเริ่มต้นการเผาไหม้หาได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟระหว่าง  $P-\theta$  ได้จากกราฟอัตราการผลิตความร้อนที่หาจากข้อมูล  $P(\theta)$

2.10.2.2 ช่วงการเผาไหม้สารผสมที่ผสมไว้ก่อนแล้วหรือช่วงการเผาไหม้ที่รวดเร็ว (Premixed combustion phase หรือ Rapid combustion phase, bc) ในช่วงนี้เป็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ได้ผสมกับอากาศเป็นสารผสมที่อยู่ในขีดจำกัดของการเผาไหม้ในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิด ซึ่งเมื่อเกิดการเผาไหม้ก็จะเผาไหม้เกือบพร้อมกัน ทำให้การเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่องศาของมุมข้อเหวี่ยงและเป็นผลให้อัตราการผลิตความร้อนในช่วงนี้สูง

2.10.2.3 ช่วงการเผาไหม้ที่ถูกควบคุมโดยการผสม (Mixing-controlled combustion phase, cd) เมื่อเชื้อเพลิงและอากาศซึ่งผสมกันไว้ก่อนแล้วในช่วงล่าช้าในการจุดระเบิดได้ถูกเผาไหม้หมดไป อัตราการเผาไหม้หรืออัตราการผลิตความร้อน จะถูกควบคุมโดยอัตราการเกิดสารผสมที่พร้อมเผาไหม้ (อัตราการผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ) อัตราการผลิตความร้อนในช่วงนี้อาจไปถึงค่าสูงสุดค่าที่สอง (โดยทั่วไปจะต่ำกว่าค่าแรก) หรืออาจไม่ถึงก็ได้ แต่จะลดลงเมื่อกระบวนการเผาไหม้ดำเนินต่อไป

2.10.2.4 ช่วงการเผาไหม้ช้า (Late combustion phase, de) เป็นช่วงที่การปล่อยความร้อนเกิดขึ้นต่อไปที่อัตราต่ำในจังหวะขยายตัว ซึ่งเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เล็กน้อย และเป็นการเผาไหม้ต่อไปของเขม่าและสารที่เกิดจากการเผาไหม้สารผสมหนา (เช่น  $CO, H_2$  ฯลฯ)

### 2.11 การแปรผันของการเผาไหม้ระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักร

สาเหตุของการแปรผันของการเผาไหม้ระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักรมาจากปัจจัย 3 ข้อคือ การแปรผันระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักรในการเคลื่อนที่ของสารผสมในกระบอกสูบในขณะที่หัวเทียนให้ประกายไฟ การแปรผันของปริมาณและเชื้อเพลิงที่ถูกดูดเข้ามาในกระบอกสูบ การแปรผันเนื่องจากความสามารถในการผสมของอากาศ เชื้อเพลิงและก๊าซที่ค้างอยู่ภายในกระบอกสูบโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณใกล้หัวเทียน

พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวบ่งบอกการแปรผันของการเผาไหม้ระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักรที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ความดันในกระบอกสูบสูงสุด ( $P_{max}$ ) มุมข้อเหวี่ยงที่เกิดความดันในกระบอกสูบสูงสุด และความดันยังผลเฉลี่ยบ่งชี้ (IMEP) โดยการเผาไหม้ที่เร็ว วัฏจักรต่อวัฏจักรที่มีความดันสูงจะเกิดขึ้นใกล้กับศูนย์ตายบนและห่างออกไปในวัฏจักรที่มีความดันต่ำลงมา ส่วนการเผาไหม้ช้าวัฏจักรที่มีความดันสูงจะอยู่ไกลจากตำแหน่งศูนย์ตายบนและขยับเข้าใกล้ศูนย์ตายบน ในวัฏจักรที่มีความดันต่ำกว่า สอดคล้องกับค่า IMEP ของแต่ละวัฏจักรก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ตัวแปรที่บ่งบอกการแปรผันระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักร สามารถบอกเป็นค่าคงที่ได้ เป็นสัมประสิทธิ์การแปรผันของ IMEP (Coefficient of variation in indicated mean effective pressure,  $COV_{imep}$ ) ซึ่งเขียนเป็นสมการที่ 2.42 ได้ดังนี้

$$COV \text{ of IMEP} = \frac{\sigma_{imep} \times 100}{IMEP_{avg}} \quad (2.41)$$

โดยที่  $\sigma_{imep}$  = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ imep

$IMEP_{avg}$  = ค่าเฉลี่ยของ IMEP จากจำนวนวัฏจักรทั้งหมดที่นำมาคำนวณ

รวมถึงสัมประสิทธิ์การแปรผันของค่าความดันในกระบอกสูบสูงสุด (Coefficient of variation in maximum pressure) ซึ่งเขียนเป็นสมการที่ 2.43 ได้ดังนี้

$$COV \text{ of } P_{max} = \frac{\sigma_{pmax} \times 100}{Pmax_{avg}} \quad (2.42)$$

โดยที่  $\sigma_{pmax}$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $P_{max}$

$Pmax_{avg}$  เป็นค่าเฉลี่ยของ  $Pmax$  จากจำนวนวัฏจักรทั้งหมดที่นำมาคำนวณ

## 2.12 การวิเคราะห์ความดันในกระบอกสูบ

ข้อมูลความดันกระบอกสูบที่มุมข้อเหวี่ยงต่างๆตลอดช่วงจังหวะอัดและจังหวะขยายตัวสามารถนำไปใช้วิเคราะห์การหาอัตราการปล่อยพลังงานเคมีของเชื้อเพลิง มักเรียกว่าอัตราการปล่อยความร้อนหรืออัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่ออธิบายลักษณะของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัด โดยวิธีการหานั้นกระทำโดยการใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับระบบเปิด เมื่อพิจารณาให้อยู่ในสภาวะความดันและอุณหภูมิสม่ำเสมอ ซึ่งเขียนได้เป็นสมการที่ 2.43

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i = \frac{dU}{dt} \quad (2.43)$$

โดยที่  $\frac{dQ}{dt}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบเข้าไปในระบบ  
 $p \frac{dV}{dt}$  = อัตราการถ่ายเทงานโดยระบบที่เนื่องมาจากการกระจัดของขอบเขตของระบบ  
 $\dot{m}_i$  = อัตราไหลของมวลเข้าไปในระบบผ่านขอบเขตของระบบที่ตำแหน่ง  $i$  (การไหลออกจากระบบจะมีค่าเป็นลบ)  
 $h_i$  = เอนทัลปีของมวล  $i$  ที่เข้าหรือออกจากระบบ  
 $U$  = พลังงานของสารที่อยู่ภายในขอบเขตของระบบ

สำหรับเครื่องยนต์แบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรงนี้ สารที่บรรจุในกระบอกสูบจะเป็นระบบเปิด มวลที่ไหลผ่านขอบเขตของระบบ ก็คือเชื้อเพลิงและแก๊สที่ไหลเข้าไปในชอก ดังนั้นไม่คิดมวลที่ไหลเข้าไปในชอก สมการที่ 2.43 จะเขียนได้

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \dot{m}_f h_f = \frac{dU}{dt} \quad (2.44)$$

การวิเคราะห์หาอัตราการปล่อยความร้อน ถ้า  $U$  และ  $h_f$  ถูกคิดให้เป็นพลังงานภายในสัมผัส (พลังงานภายในที่ขึ้นกับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว) ของสารที่บรรจุในกระบอกสูบและเอนทัลปีสัมผัสของเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปตามลำดับแล้ว  $\frac{dQ}{dt}$  ก็จะกลายเป็นผลต่างระหว่างพลังงานเคมีหรือความร้อนที่ปล่อยออกมาโดยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (ปริมาณบวก) และการถ่ายเทความร้อนจากระบบ (ในเครื่องยนต์จะเป็นการถ่ายเทความร้อนจากระบบและตามเครื่องหมายทางอุณหพลศาสตร์จะเป็นปริมาณลบ) และเนื่องจาก  $h_{s,f} \approx 0$  สมการ 2.44 จะได้

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_{ch}}{dt} - \frac{dQ_{ht}}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt} \quad (2.45)$$

โดย  $\frac{dQ_n}{dt}$  เป็นอัตราการปล่อยความร้อนสุทธิซึ่งเป็นผลต่างระหว่างอัตราการปล่อยความร้อนรวม  $\frac{dQ_{ch}}{dt}$  และอัตราการถ่ายเทความร้อนไปสู่ผนัง  $\frac{dQ_{ht}}{dt}$  จะเท่ากับอัตราที่งานกระทำต่อลูกสูบ  $p \frac{dV}{dt}$  บวกกับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในสัมผัสของสารในกระบอกสูบ  $\frac{dU_s}{dt}$  เมื่อสมมติต่อไปให้สารในกระบอกสูบเป็นแก๊สอุดมคติจะได้

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{dT}{dt} \quad (2.46)$$

และจากกฎของแก๊สอุดมคติ ( $pV = mRT$ ) เมื่อสมมติให้  $R$  คงตัวจะได้

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T} \quad (2.47)$$

แทนค่า  $dT$  ในสมการที่ 2.47 ลงในสมการ 2.46 จะได้ตั้งสมการที่ 2.48

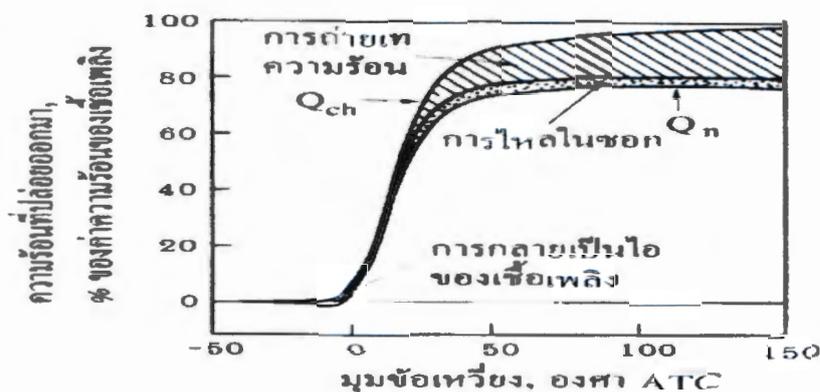
$$\frac{dQ_n}{dt} = \left(1 + \frac{C_v}{R}\right) p \frac{dV}{dt} + \frac{C_v}{R} V \frac{dP}{dt}$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{dt} \quad (2.48)$$

โดยที่  $\gamma$  เป็นอัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ  $\frac{C_p}{C_v}$  และในการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล ช่วงของค่า  $\gamma$  ที่เหมาะสมจะเป็น 1.3 - 1.35 แต่ถ้าต้องการค่า  $\gamma$  ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ในการวิเคราะห์ข้างต้นก็ควรใช้ค่า  $\gamma$  ของอากาศที่ปลายของจังหวะอัดก่อนการเผาไหม้ซึ่งมีค่าประมาณ 1.35 และค่า  $\gamma$  สำหรับแก๊สที่เผาไหม้แล้วมีค่าประมาณ 1.26-1.3

ภาพที่ 2.19 แสดงขนาดของการปล่อยความร้อนรวมและสุทธิ การถ่ายเทความร้อน ผลของการไหลเข้าไปในชอก และความร้อนของการกลายเป็นไอและการเพิ่มความร้อนของเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เทอร์โบชาร์จ ทำงานที่ภาวะและอัตราความเร็วเครื่องยนต์ปานกลาง ซึ่งพบว่าเอนทาลปีของการกลายเป็นไอของน้ำมันดีเซลจะน้อยกว่าร้อยละ 1 ของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความร้อนให้แก่ไอเชื้อเพลิงจากอุณหภูมิของการฉีดไปเป็นอุณหภูมิของอากาศที่ถูกอัดทั่วไปจะมีค่าประมาณร้อยละ 3 ของ ค่า

ความร้อนของเชื้อเพลิง ส่วนการถ่ายเทความร้อนรวมตลอดช่วงการเผาไหม้จะมีค่าร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 20 ของความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาทั้งหมด



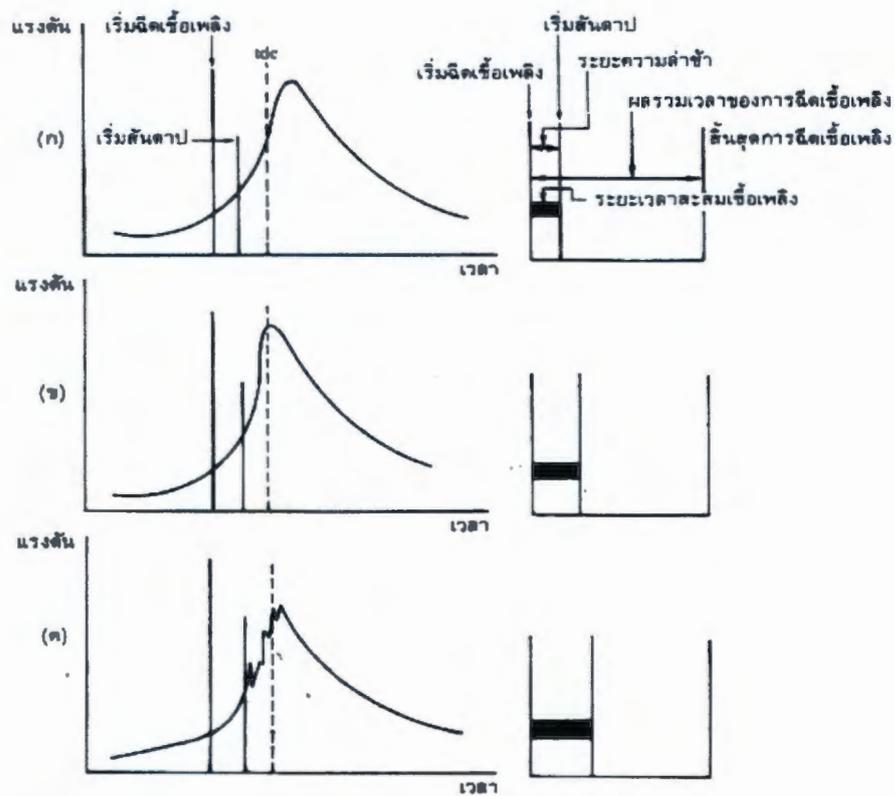
ภาพที่ 2.19 กราฟของการปล่อยความร้อนรวมและสุทธิในช่วงการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซล ระบบฉีดเชื้อเพลิงโดยตรง เทอร์โบชาร์จ ทำงานที่ภาวะและอัตราความเร็ว เครื่องยนต์ ปานกลาง ซึ่งแสดงขนาดของการถ่ายเทความร้อน การไหลในซอก และผลของการกลายเป็นไอและการให้ความร้อนแก่เชื้อเพลิง [9]

### 2.13 การน็อกในเครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลจะเดินได้เรียบสม่ำเสมอขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันในกระบอกสูบ ระหว่างช่วงการสันดาปการเพิ่มขึ้นของแรงดันภายในกระบอกสูบถ้าสูงและรุนแรงก็จะทำให้เครื่องเดินไม่เรียบปกติในการจุดระเบิดให้เชื้อเพลิงสันดาปภายในกระบอกสูบจะต้องจุดระเบิดเชื้อเพลิงอนุภาคแรก ๆ ให้ลุกไหม้ก่อนสิ้นสุดการฉีดของหัวฉีด แต่ถ้าหากเชื้อเพลิงมีการจุดระเบิดล่าช้ามากเกินไปคือถ้าต้องรอจนกระทั่งสิ้นสุดการฉีดของหัวฉีดแล้วก็จะทำให้เชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าไปยังห้องสันดาปสะสมกันจน มีปริมาณมากจึงทำให้มีการเกิดการจุดระเบิดขึ้นรุนแรงกำลังดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดคลื่นเสียงเกิดเสียงเคาะดังขึ้นเรียกว่าเป็นการน็อกของเครื่องยนต์ดีเซลหรือเรียกว่าคอมบัสชันน็อก (combustion knock)

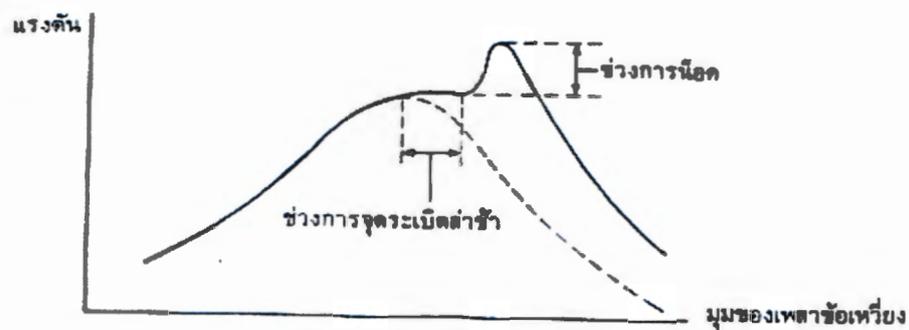
ถ้าความล่าช้าของการจุดระเบิดมีช่วงระยะเวลาสั้นคือเชื้อเพลิงไม่หน่วงเหนี่ยวทำให้มีความล่าช้า ต่อการจุดระเบิดอยู่นานละอองของน้ำมันเชื้อเพลิงอนุภาคแรกๆก็จะสันดาปได้ในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือละอองของน้ำมันที่สะสมอยู่ในห้องสันดาปเพื่อรอการสันดาปจริงมีโอกาสมะสมอยู่ได้น้อย ดังนั้น อัตราส่วนผสมของมวลที่สันดาปจริงต่ำแรงดันจากการสันดาปจริงจึงไม่เพิ่มขึ้นอย่างรุนแรงลูกสูบจึง ได้รับแรงดันที่ราบเรียบในทางตรงข้ามถ้าความล่าช้าของการจุดระเบิดมีมากปริมาณเชื้อเพลิง ก็จะ สะสมไว้มากเพื่อรอการสันดาปมากดังนั้นเมื่อถึงเวลาที่เชื้อเพลิงสันดาปจึงเกิดการสันดาปที่รวดเร็วและรุนแรง

ผลที่ได้รับก็คือลูกสูบได้รับแรงกระแทกจากการสันดาปบนหัวสูบรุนแรงมากเครื่องจะเดินไม่เรียบ ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 เปรียบเทียบระยะเวลาของการสะสมเชื้อเพลิง

จากภาพเปรียบเทียบให้เห็นช่วงเวลาที่น้ำมันเชื้อเพลิงฉีดสะสมภาพ (ค) เป็นช่วงที่มีระยะเวลาเหมาะสมของเชื้อเพลิงมากที่สุดดังนั้นเมื่อเกิดการสันดาปจึงให้แรงดันสูงและรุนแรงจึงเกิดการน็อคของเครื่องยนต์อย่างไรก็ตามการน็อคของเครื่องยนต์ดีเซลยากที่จะหลีกเลี่ยงได้เนื่องจากเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลยังมีความล่าช้าของการจุดระเบิดอยู่ซึ่งการจุดระเบิดมักจะเริ่มขึ้นปลายระยะของความล่าช้าหลังจากนั้นจึงทำให้เชื้อเพลิงต้องสันดาปอย่างรวดเร็วและรุนแรงจนไม่อาจจะควบคุมได้ การเพิ่มขึ้นของแรงดันอย่างรวดเร็วนี้จึงทำให้เกิดมีเสียงน็อคของเครื่องยนต์แสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 2.21 ซึ่งหากไม่เกิดการน็อคหรือไม่เกิดการจุดระเบิดเกิดขึ้นเส้นโค้งแรงดันจะได้เป็นเส้นโค้งปกติตามแนวเส้นปะเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของแรงดันซึ่งเป็นผลให้มีการน็อคเกิดขึ้นเป็นระยะความล่าช้าของการจุดระเบิด



ภาพที่ 2.21 เส้นโค้งแสดงการจุดระเบิดล่าช้าและการน็อคในเครื่องยนต์ดีเซล

สาเหตุที่ทำให้เกิดการน็อคในเครื่องยนต์ส่วนมากจะเกิดจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าซีเทน นัมเบอร์ต่ำทำให้มีความล่าช้าของการจุดระเบิดมากเวลาการฉีดน้ำมันของหัวฉีดเร็วเกินไปอัตราส่วน ความอัดสูงมากเกินไปการออกแบบห้องสันดาปไม่ดีเป็นต้นปกติอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันภายใน กระบอกสูบจะคิดเป็นจำนวน lb/in<sup>2</sup> หรือ kg/cm<sup>2</sup> หรือ bar ต่อองศาการหมุนของข้อเหวี่ยงจากการ ทดสอบภายในห้องทดสอบปรากฏว่าการน็อคของเครื่องยนต์ดีเซลจะไม่เกิดขึ้นถ้าอัตราการเพิ่มขึ้นของ แรงดันต่ำกว่าประมาณ 2kg/cm<sup>2</sup> ต่อมุมของข้อเหวี่ยงปกติจะเกิดขึ้นในอัตราที่สูงกว่า 3.5 kg/cm<sup>2</sup> ต่อ มุมของข้อเหวี่ยง

#### 2.14 ไบโอดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซล หมายถึงน้ำมัน เชื้อเพลิงที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ด้วย กระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีให้ใกล้เคียงกับโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันดีเซล

กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เรียกว่ากระบวนการ ทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification reaction) โดยมีสารตั้งต้นคือ ไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชหรือสัตว์ทำ ปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ จะได้สารผลิตภัณฑ์คือ สารเอสเตอร์ (เมทิลเอสเตอร์หรือเอทิลเอสเตอร์ขึ้นอยู่กับ แอลกอฮอล์ที่ใช้) และกลีเซอรอล ในการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ จะใช้ ตัวเร่งหรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาให้สมบูรณ์และเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ส่วนแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้คือ เมทานอล(CH<sub>3</sub>OH) หรือ เอทานอล(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) [12]

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมาจากพืชทาง การเกษตร เช่น ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง สบู่ดำ เป็นต้น แต่ที่นิยมมากที่สุดคือ ปาล์มน้ำมัน

### 2.14.1 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่ได้จากการกลั่นจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก ความไวไฟต่ำกว่า จึงสะดวกและปลอดภัยในการเก็บ การบรรจุและการขนส่ง มีการสลายตัวง่ายกว่าหากมีการรั่วไหลออกสู่ธรรมชาติ (Biodegradeble) และไม่เป็นพิษ (Non-Toxic) รวมทั้งไอเสียจากการเผาไหม้จะมีมลพิษน้อยกว่าน้ำมันดีเซล โดยมีเขม่ากลั่นควันและควันดำน้อยกว่ามาก ทำให้การกัดกร่อนอุปกรณ์ของเครื่องยนต์เกิดการสึกหรอน้อยลงไปด้วย [13] มาตรฐานของไบโอดีเซลที่ได้จากการผลิตนั้น จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการผลิตของผู้ผลิต และเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตของแต่ละผู้ผลิต คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่คาดว่าจะผลิตได้นั้น จะเป็นไปตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และประเทศเยอรมัน ได้แก่ ASTM D 6751 EN 14214 และ DIN E 51606 ตามลำดับ [14]

Property	Unit	EN 14214 <sup>a</sup>	Palm Biodiesel	
			Normal Grade	Winter Grade
Ester content	% weight	Min. 96.5	> 98.0	> 98.0
Density @ 15°C	kg/m <sup>3</sup>	860 - 900	878	870 - 890
Viscosity @ 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3.5 - 5.0	4.4	4.0 - 5.0
Flash point	°C	Min. 120	182	150 - 200
Pour point	°C	--	15	-21 to 0
CFPP	°C	See note (b)	15	-18 to -3
Iodine value	--	Max. 120	50 - 55	56 - 83
Cetane number	--	Min. 51	58 - 59	53 - 59
Sulfur	mg/kg	Max. 10	< 10	< 10
Phosphorous	mg/kg	Max. 10	< 10	< 10
Water	mg/kg	Max. 500	< 500	< 500
Unsaturated acid methyl esters	% weight	Max. 12	< 0.5	< 0.5
Polyunsaturated methyl esters	% weight	Max. 1	< 0.1	< 0.1
Methanol	% weight	Max. 0.2	< 0.2	< 0.2
Monoglycerides	% weight	Max. 0.8	< 0.8	< 0.8
Diglycerides	% weight	Max. 0.2	< 0.2	< 0.2
Triglycerides	% weight	Max. 0.2	< 0.2	< 0.2
Free glycerol	% weight	Max. 0.02	< 0.02	< 0.02
Total glycerol	% weight	Max. 0.25	< 0.25	< 0.25

ภาพที่ 2.22 คุณสมบัติของน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล [14]

### 2.15 เหง้ามันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง ชื่อวิทยาศาสตร์ ManihotesculentaCrantz หรือ Manihotesculenta (L.) Crantz (ชื่อพ้องวิทยาศาสตร์ Manihotutilissima Pohl. ) จัดอยู่ในวงศ์ EUPHORBIACEAE มันสำปะหลัง มีถิ่นกำเนิดในแถบที่ลุ่มเขตร้อน มีหลักฐานแสดงว่ามีการเพาะปลูกกันในประเทศโคลัมเบียและเวเนซุเอลามานานกว่า 3,000-7,000 ปีแล้ว โดยมีการสันนิษฐานว่าแหล่งกำเนิดของมันสำปะหลังน่าจะมาจาก 4 แหล่งด้วยกัน คือ แถบประเทศกัวเตมาลาและเม็กซิโก ทิศตะวันตกเฉียง

เหนือของทวีปอเมริกาใต้ ทางทิศตะวันออกของประเทศโบลิเวียและทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของอาร์เจนตินา หรือทางทิศตะวันออกของบราซิล

มันสำปะหลังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดหวาน และชนิดขม โดยชนิดหวานจะใช้เพื่อบริโภคหรือทำอาหารได้โดยตรง เช่น การนำไปนึ่ง เชื่อม ทอด (เช่น สายพันธุ์ระยอง 2 และพันธุ์ 5 นาที) มีปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิกต่ำและไม่มีรสขม ส่วนชนิดขม จะไม่เหมาะสำหรับนำมาบริโภคหรือใช้เลี้ยงสัตว์โดยตรง เนื่องจากมีปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิกสูง ซึ่งมีความเป็นพิษต่อร่างกาย การนำมาใช้ต้องผ่านการแปรรูปก่อน (เช่น พันธุ์ระยอง 1 พันธุ์ระยอง 3 พันธุ์เกษตรศาสตร์ 50) แต่ในประเทศไทยจะมีการปลูกมันสำปะหลังชนิดขมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกันมากกว่าชนิดหวาน

### 2.15.1 ลักษณะของต้นมันสำปะหลัง

ต้นมันสำปะหลัง จัดเป็นไม้พุ่ม มีลำต้นตั้งตรง เป็นไม้เนื้อแข็งที่มีความสูงของลำต้นประมาณ 1-5 เมตร มีการแตกกิ่ง กิ่งที่แตกจากลำต้นหลักเรียกว่า “กิ่งชุดแรก” ส่วนกิ่งที่แตกจากกิ่งชุดแรกเรียกว่า “กิ่งชุดที่สอง” ต้นมันสำปะหลังจะแตกกิ่งเป็นแบบ 2 กิ่ง หรือ 3 กิ่ง ตามลำต้นจะเห็นรอยก้านใบที่หลุดร่วงไปเรียกว่า “รอยแผลใบ” และในระหว่างแผลใบจะเรียกว่า “ความยาวของชั้น” ส่วนที่อยู่เหนือรอยแผลใบมีตา ทุกส่วนของต้นเมื่อนำมาสับจะมีน้ำยางสีขาวไหลออกมา และรากสะสมอาหารเป็นแห่งหนาอยู่ใต้ดิน มีประมาณ 5-10 รากต่อต้น



ภาพที่ 2.23 ต้นมันสำปะหลัง

รากมันสำปะหลัง (หัวมันสำปะหลัง) ระบบรากเป็นแบบรากฝอย รากจะเกิดจากข้อของลำต้นที่ใช้ปลูกและขยายใหญ่เป็นหัว โดยหัวมันสำปะหลังเมื่อนำมาตัดตามขวางจะมีส่วนประกอบดังนี้คือ เปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นใน และส่วนสะสมแป้งหรือที่เรียกว่าไส้กลาง ส่วนอีกข้อมูลหนึ่งระบุว่า รากมันสำปะหลังจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ รากจริง และรากสะสมอาหาร (ทั่วไปเรียกว่าหัว) ที่มี

ปริมาณแบ่งประมาณร้อยละ 15-40 รากสะสมอาหารจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-15 เซนติเมตร และยาวประมาณ 15-100 เซนติเมตร



ภาพที่ 2.24 รากมันสำปะหลัง

เหง้ามันสำปะหลังเป็นส่วนที่อยู่เหนือรากของลำต้นมันสำปะหลัง โดยจะรวมส่วนโคนของลำต้นมันสำปะหลังอีกประมาณ 30 เซนติเมตร คนและสัตว์กินไม่ได้ ชาวไร่มันเก็บเกี่ยวหัวมันสด ลำต้นที่สมบูรณ์จะถูกเก็บไว้เป็นพันธุ์ เหง้าและลำต้นมันสำปะหลังจะถูกทิ้งหลังเก็บเกี่ยวมันสำปะหลัง



ภาพที่ 2.25 เหง้ามันสำปะหลัง

หลังการเก็บเกี่ยวพบว่าเหง้าและลำต้นมันสำปะหลังจะถูกทิ้งไว้ในไร่อัตราส่วนต่อผลผลิตที่ 0.12 ของน้ำหนักผลผลิต หรือประมาณ 2.8 ล้านตันต่อปี เทียบเท่ากับค่าความร้อนของน้ำมันดิบ 923 ล้านลิตร (กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ,2555)เหง้าและลำต้นที่ทิ้งไว้จะถูกเผาทำให้เสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์ จุดเด่นของการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังไปใช้คือ ส่วนมากยังไม่มีผู้นำไปใช้ให้เป็นประโยชน์อย่างจริงจัง ทำให้ไม่มีคู่แข่งในการจัดหาวัตถุดิบ จุดด้อยคือ มี

ความชื้นโดยเฉลี่ยค่อนข้างมาก จากข้อมูลการศึกษาเหง้ามันสำปะหลังที่มีอยู่ในจังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ 53.40 (%W.b.) ค่าความร้อนที่ได้จากเหง้ามันสำปะหลังมีค่าประมาณ 14.59 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม [15] เหง้ามันสำปะหลังจะมีคุณสมบัติในการติดไฟ ได้ยาก เนื่องจากเปลือกนอกมีโครงข่ายของซิลิกาให้ความ แข็งแรง ทนต่อการเผาไหม้ และติดไฟได้ยาก จึงจำเป็นต้องทำการย่อย เหง้ามันสำปะหลังให้มีขนาดเล็กประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้มีขนาดเหมาะสมที่จะป้อนเข้าไป ในระบบเผาไหม้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดการเผาไหม้บริเวณเนื้อในของเหง้ามันได้ดี โดยในช่วงแรกของการเผาไหม้จะเกิดควันสีขาวซึ่งเป็นการสลายตัวของ Volatile Matter ในเหง้ามัน ออกมาเป็น Volatile Gas ไอน้ำและ ฝุ่นละออง จากนั้นจะเกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็วของ Volatile Gas ซึ่งหากเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วจะให้ความร้อนไปใช้ผลิตไอน้ำเพื่อเป็นต้นกำลังในการ นำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า ส่วนซีเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ก็นำมาใช้เป็นปุ๋ย

## 2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พิชาญ มานะบรรยง (2547) [16] ศึกษาการนำเศษถ่านจากไม้พื้นยางพาราที่ได้จากตะกรับเตา หม้อไอน้ำ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงพบว่า มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน ของระบบผลิตก๊าซชีววมวลสูงถึงร้อยละ 87.81 และเมื่อนำก๊าซชีววมวลที่ได้ไปผลิตไฟฟ้าพบว่า ประสิทธิภาพรวมของระบบที่ได้คือร้อยละ 13.5%

ทิพย์สุภินทร์ หินซุย (2550) [17] ศึกษาการนำกากตะกอนจากระบบน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอก ย้อมมาผลิตพลังงานโดยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน โดยกากตะกอนถูกลดความชื้นและอัดเป็นแท่งก่อน นำมาผลิตก๊าซชีววมวล โดยใช้เตาผลิตก๊าซแบบไหลลงที่มีขนาดการผลิต 100 กิโลวัตต์ พบว่าค่าความ ร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าเฉลี่ย 5.03 MJ/Nm<sup>3</sup> ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเท่ากับ ร้อยละ 67.99

รัตนะ เลहनิช (2550) [18] ออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงเพื่อการ อบแห้งปุ๋ย โดยใช้ไม้สับเป็นเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบผลิตก๊าซได้ประมาณร้อยละ 76.24-86.93 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 130kg/h สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงในการอบแห้งปุ๋ยได้ ร้อยละ 45.7 เมื่อเทียบกับเตาพิน

ชฎานนท์ แสงมณีและคณะ (2552) [12] ศึกษาสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้ก๊าซชีว มวลที่ผลิตได้จากไม้อบแห้งและถ่านไม้ ร่วมกับน้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 3.9 ลิตร พบว่าการใช้ก๊าซชีววมวลร่วมกับน้ำมันดีเซลมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้ น้ำมันไบโอดีเซลร่วมกับก๊าซชีววมวล อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีค่าน้อยสุดเมื่อใช้อัตราการไหลของ ก๊าซชีววมวล 462 ลิตรต่ออนาที ซึ่งก๊าซชีววมวลสามารถทดแทนน้ำมันไบโอดีเซลได้ 70%

Pratik N. (2553) [19] ศึกษาการผลิตก๊าซชีววมวลจากเศษไม้โรงงานเฟอร์นิเจอร์ ประเมินสมรรถนะของระบบผลิตก๊าซแบบ Imbert downdraft พบว่าเมื่อความชื้นของเชื้อเพลิงเพิ่มจะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น อัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงคือ 0.205

B.S. Pathak et al. (2552) [20] ทดลองเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงขนาด 1.39 MW<sub>th</sub> โดยคอคอดของเตาออกแบบให้มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อแก้ปัญหาข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในคอคอดแบบทรงกลมเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิที่ขอบและกลางเตาเนื่องจากอากาศไหลเข้าไม่ถึงเป็นผลให้ทาร์เพิ่มขึ้น พบว่าระบบผลิตก๊าซชีววมวลขนาด 50kW<sub>th</sub> มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนร้อยละ 63 ในขณะที่ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีววมวลขนาด 1.93 MW<sub>th</sub> อยู่ในช่วงร้อยละ 70-73 และยังสามารถเดินเครื่องได้ต่อเนื่องมากกว่า 10 ชั่วโมง

N.R. Banapurmath et al. (2553) [21] ศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สี่จังหวะจุดระเบิดด้วยการอัด โดยใช้เชื้อเพลิง Honge oil น้ำมันสะเดาและน้ำมันรำข้าว เมื่อใช้งานโดยตรงและใช้งานร่วมกับก๊าซชีววมวล เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงต่อกับเครื่องยนต์ดีเซลสูบเดียว สี่จังหวะแบบไหลลง หล่อเย็นด้วยน้ำ ขนาด 7HP ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ ใช้ น้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ และน้ำมันพืชร่วมกับก๊าซชีววมวลกับเครื่องยนต์ พบว่า การใช้งานเชื้อเพลิงร่วมให้สมรรถนะของเครื่องยนต์ต่ำกว่าทุกภาระและทุกองศาการฉีดน้ำมันเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงเดี่ยว และปีเดียวกัน N.R. Banapurmath et al. ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีววมวลร่วมกับดีเซล Honge oil และ Honge oil methyl ester โดยใช้และไม่ใช้คาร์บูเรเตอร์ พบว่า การใช้คาร์บูเรเตอร์ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น คิว้นดำและ CO ลดลงและมีสัดส่วนการทดแทนดีเซลถึงร้อยละ 70

S.Hassan et al. (2555) [22] ศึกษาสมรรถนะและมลพิษ จากการใช้ซูเปอร์ชาร์จในเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมดีเซลกับก๊าซชีววมวลเปรียบเทียบกับการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว เตาผลิตก๊าซชีววมวลเป็นแบบไหลลง ผสมก๊าซชีววมวลกับอากาศที่ท่อร่วมไอดี ทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 1,600 รอบต่อนาที ที่ทอร์ค 3,5,7 และ 9 N.m พบว่าการซูเปอร์ชาร์จ เชื้อเพลิงร่วมทำให้ปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลลดลงที่กำลังเท่ากัน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกเพิ่มขึ้น ปริมาณ CO ในไอเสียลดลง ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดลงเมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงร่วมที่ไม่ใช้ซูเปอร์ชาร์จ

ชนภา วรรณศรี (2551) [23] ศึกษาความเหมาะสมในการนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันมาผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้กระถินยักษ์เป็นเชื้อเพลิง พบว่าพลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า 1 kWh มีค่าเท่ากับ 24.03MJ มีต้นทุนในการผลิต 5.17บาท/kWh

วีรชัย อาจหาญ (2551) [15] ศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล พบว่า เหง้ามันสำปะหลังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงคือมีค่าความร้อน (High Heating Value) ค่าสารระเหย (Volatile Mater) ปริมาณธาตุ

คาร์บอน (C) และธาตุไฮโดรเจน (H) ค่อนข้างสูงคือ 14.591 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม, 80 เปอร์เซ็นต์, 46.12 เปอร์เซ็นต์และ 7.55 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สามารถผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีองค์ประกอบของ CO, H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 13.22-14.96 ร้อยละ 16.38-17.91 และร้อยละ 1.96-2.39 ตามลำดับและมีค่าความร้อนระหว่าง 4.90-5.31 เมกกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเผาไหม้เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับอบมันเส้นได้เป็นอย่างดี

ยิ่งลักษณ์ กาญจนฤกษ์ (2545) [24] การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์โครงการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเหมืองมันสำปะหลัง ขนาด 3, 10 และ 30 เมกะวัตต์ พบว่ามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ประมาณ 17,344 และ 930 ล้านบาทตามลำดับ อัตราส่วนผลตอบแทนภายในเท่ากับร้อยละ 9, 17 และ 16 ตามลำดับ ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจากเหมืองมันสำปะหลังมีความเป็นไปได้ในการลงทุนทุกกรณี ซึ่งมีความเหมาะสมมากที่สุดคือขนาด 10 เมกะวัตต์

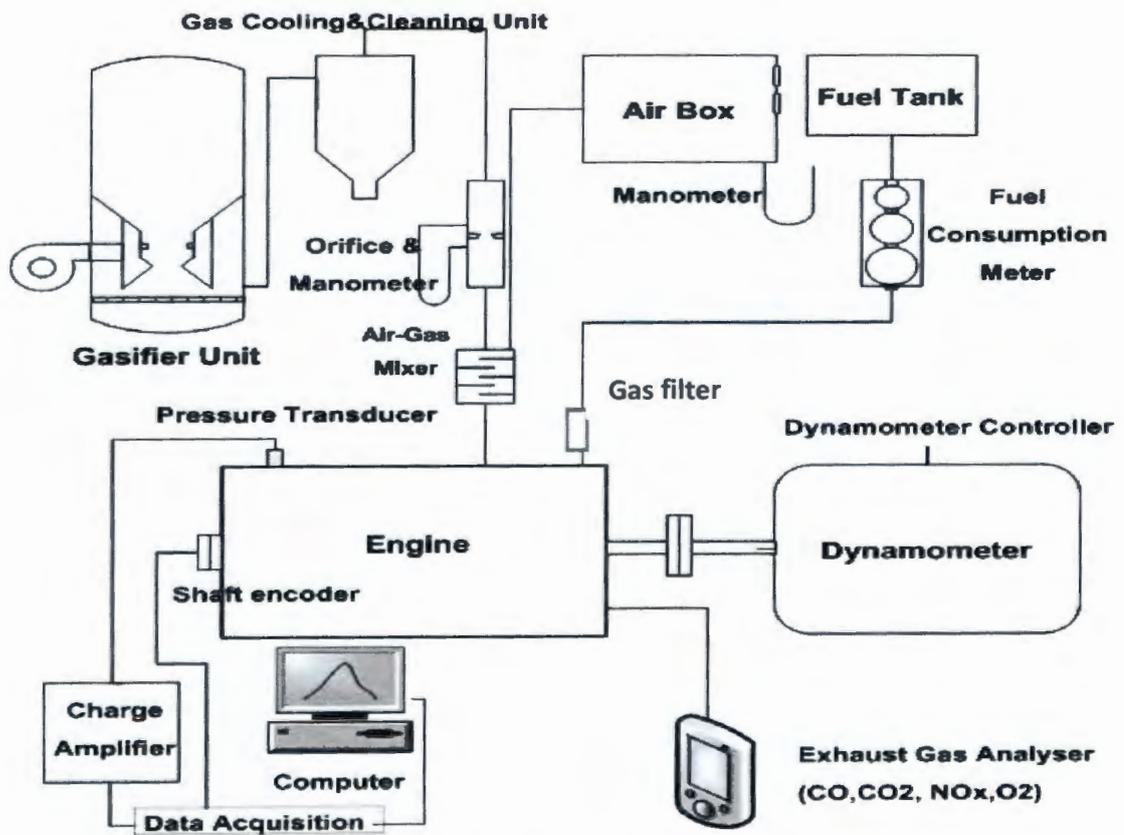
รัฐนนท์ บุญญา (2556) [25] ศึกษาการใช้เหมืองมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอบแห้งมันเส้น โดยกระบวนการผลิตมันเส้นจะใช้วิธีนำมันสำปะหลังมาสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ และตากแดด และกลับมันทุก ๆ 2-3 ชั่วโมงเป็นเวลา 2-3 วันจนกระทั่งความชื้นเหลือร้อยละ 13-15 ทำการทดลองใช้เครื่องอบแห้งแบบเผาตรงและแก๊สซิฟายเออร์โดยทั้งสองใช้เหมืองมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อน พบว่าการอบแห้งโดยเตาแบบเผาตรงสามารถลดความชื้นของมันเส้น 30 กิโลกรัม จากร้อยละ 58 มาเป็นร้อยละ 14 โดยใช้เวลา 180 นาที ใช้เหมืองมันสำปะหลัง 14 กิโลกรัม มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) 16.48 MJ/kg water loss มีอัตราการอบแห้ง (DR) 4.73 kg/h และกรอบแห้งโดยใช้เตาแก๊สซิฟายเออร์ ที่ระยะเวลาและอุณหภูมิเท่ากัน จากความชื้นร้อยละ 58 มาเป็นร้อยละ 14 ใช้เหมืองมันสำปะหลัง 8 กิโลกรัม มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) 10.57 MJ/kg water loss มีอัตราการอบแห้ง (DR) 4.93 kg/h

พุทธินันท์จารุวัฒน์ (2552) [26] ศึกษาแนวทางการนำเหมืองมันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาชีวมวลแบบไซโคลนสำหรับการลดความชื้นผลิตผลเกษตรศึกษารูปแบบของเหมืองมันสำปะหลังสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาชีวมวล 3 รูปแบบคือขึ้นเหมืองมันสำปะหลังเหมืองมันสำปะหลังสับท่อนและเหมืองมันสำปะหลังหั่นย่อยศึกษาต้นทุนการจัดการพลังงานความร้อนและประสิทธิภาพเตาที่ได้ผลการศึกษาด้านทุนการจัดการพบว่ารูปแบบเหมืองมันสำปะหลังสับท่อนมีต้นทุนการจัดการสูงสุดคือ 1.48 บาทต่อกิโลกรัมที่ความสามารถการสับท่อนเหมืองมัน 41.67 กิโลกรัมต่อชั่วโมงรูปแบบเหมืองมันสำปะหลังหั่นย่อยและรูปแบบขึ้นเหมืองมันสำปะหลังมีต้นทุนการจัดการ 0.62 บาทต่อกิโลกรัมและ 0.57 บาทต่อกิโลกรัมตามลำดับผลการทดสอบเตาเผาชีวมวลพบว่ารูปแบบขึ้นเหมืองมันสำปะหลังที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 22 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะให้ค่าประสิทธิภาพเตาเผาสูงที่สุดคือ 70.76 เปอร์เซ็นต์พลังงานความร้อนที่ได้ 77.62 กิโลวัตต์รูปแบบเหมืองมันสำปะหลังสับท่อนที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 24 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะให้ค่าประสิทธิภาพเตาเผาสูงที่สุดคือร้อยละ 87.35

พลังงานความร้อนที่ได้ 104.53 กิโลวัตต์และรูปแบบเหง้ามันสำปะหลังหั่นย่อยที่อัตราการป้อน  
เชื้อเพลิง 22.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมงจะให้ค่าประสิทธิภาพเตาเผาสูงที่สุดคือร้อยละ 90.62 พลังงานความ  
ร้อนที่ได้ 100.13 กิโลวัตต์

### บทที่ 3 อุปกรณ์การทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาสมรรถนะ มลพิษและคุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิง ร่วมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยกำลังอัด โดยมีการดัดแปลงเครื่องยนต์ให้เหมาะสมกับการใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการยานยนต์ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุปกรณ์และที่ใช้ทดสอบมีดังนี้

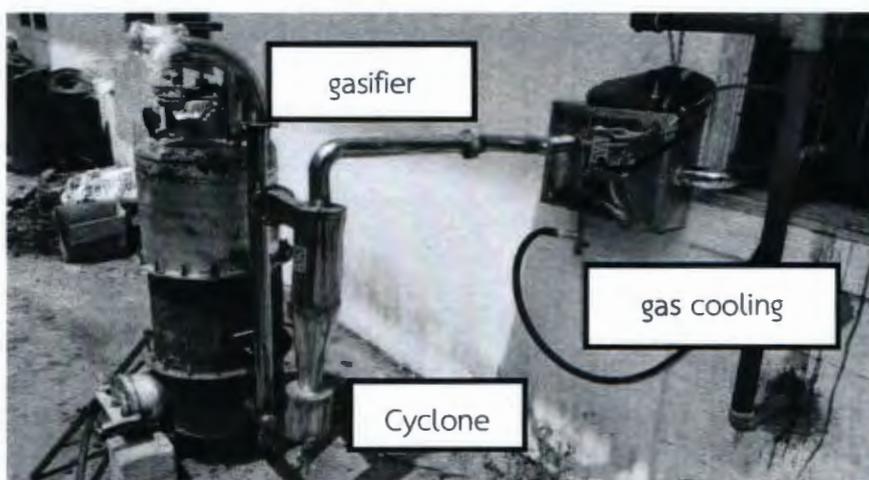


ภาพที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

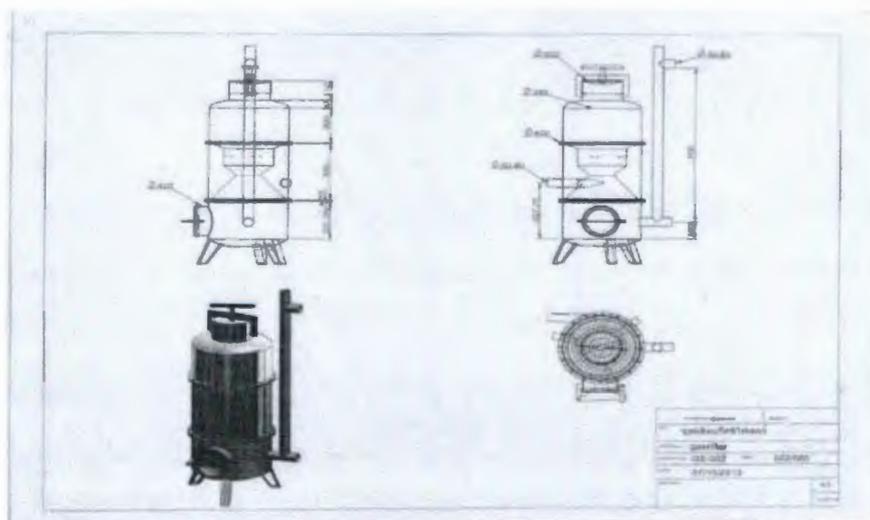
### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง

#### 3.1.1 เตาผลิตก๊าซชีววมวล

เตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ชนิดสองคอคอด ซึ่งออกแบบตามหลักการของ Imbert ขนาดกำลังผลิตก๊าซสูงสุด  $50\text{kw}_{th}$  มีไฮโคคลนดักฝุ่น แผงหล่อเย็น สกรับเบอร์ และกรองระเอียด ติดตั้งอยู่บนแท่นที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ซึ่งระบบทั้งหมดได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นโดยงานวิจัยการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซชีววมวลขนาดเล็ก เพื่อให้เหมาะกับเครื่องยนต์ขนาด 5-5.5 แรงม้า ในกรณีใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ และเหมาะสำหรับเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดขนาด 8 แรงม้า ในกรณีใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ดังแสดงในภาพ 3.2



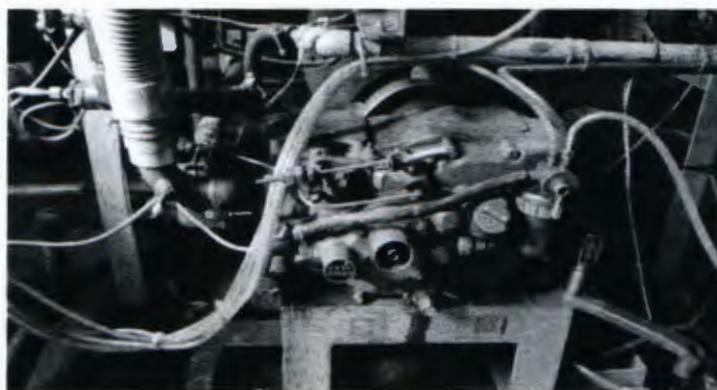
ภาพที่ 3.2 ระบบผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.3 แบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.2 เครื่องยนต์

เครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดลองคือเครื่องยนต์ดีเซล 4 จังหวะ สูบเดี่ยวแบบฉีดเชื้อเพลิง โดยตรง ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น D-800 ดังภาพ 3.3 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์แสดงในตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.4 เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ในการทดสอบ

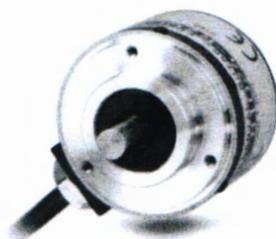
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเครื่องยนต์ทดสอบ

Model	Mitsubishi D-800
Bore x Stroke	82 x 78
No.of cylinder	1
Piston displacement	411 cc.
Maximum output	5.884kW/2400rpm
Maximum torque	25.5N-m/1900rpm
Compression ratio	18

### 3.1.3 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์

เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง 2 ส่วนคือ เซ็นเซอร์และชุดเก็บข้อมูลจากเครื่องยนต์ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์มีดังนี้

1.1.3.1 เซ็นเซอร์วัดองศาเพลาคือ (Encoder) ในภาพ 3.5 เป็นตัววัดองศาของเพลาคือทุกๆ 0.2 องศาเพลาคือเหวี่ยง ทำให้ได้ค่าที่แม่นยำอย่างมาก โดยสัญญาณจากเซ็นเซอร์จะถูกส่งไปที่เครื่องรับสัญญาณ



ภาพที่ 3.5 เซนเซอร์วัดตองศาเพลลาข้อเหวียง

1.1.3.2 เซนเซอร์วัดความดันในห้องเผาไหม้ (Pressure transducer) ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เป็นเซนเซอร์วัดความดันในกระบอกสูบ ผลิตจากผลึกควอตซ์ ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถวัดความดันได้ 0 – 250 เซนเซอร์วัดตองศาเพลลาข้อเหวียงบาร์ มี sensitivity -20 pC/bar และมีช่วงอุณหภูมิในการวัด -20 – 350 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.6 เซนเซอร์วัดความดันในห้องเผาไหม้

1.1.3.3 เครื่องขยายสัญญาณจากเซนเซอร์ ในภาพที่ 3.7 เป็นตัวขยายสัญญาณจากเซนเซอร์ความดัน และอุณหภูมิที่ติดตั้งที่กระบอกสูบ เพื่อวัดอุณหภูมิ และความดัน



ภาพที่ 3.7 เครื่องขยายสัญญาณ

1.1.3.4 เครื่องรับสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณเป็นเครื่องรับสัญญาณข้อมูลที่ได้จากตัวเซนเซอร์ที่ผ่านการขยายสัญญาณมาแล้วเพื่อส่งข้อมูลไปสู่คอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.8 เครื่องรับสัญญาณจากเครื่องขยายสัญญาณ

1.1.3.5 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรมวิเคราะห์การเผาไหม้ Dewesoft



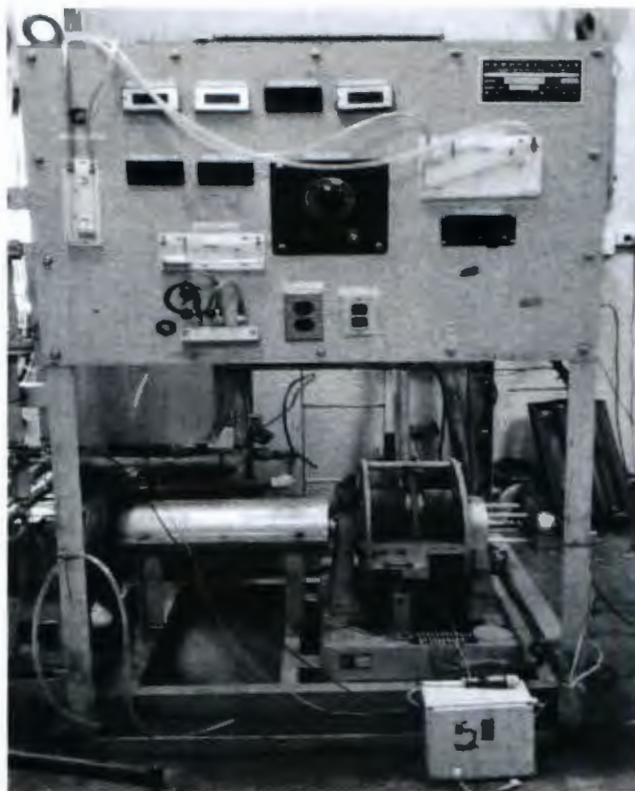
ภาพที่ 3.9 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม Dewesoft

1.1.3.6 อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สามารถวัดปริมาณการใช้น้ำมันได้ 3 ช่วง คือ 5ml 10ml และ 15ml



ภาพที่ 3.10 อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

1.1.3.7 ไดนาโมมิเตอร์ ใช้ในการทดลองนี้ตั้งอยู่ที่อาคารปฏิบัติการยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เป็นไดมิเตอร์แบบ Eddy current พร้อมผังควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 ไดนาโมมิเตอร์พร้อมแผงควบคุม

1.1.3.8 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซจากไอเสียรถยนต์



ภาพที่ 3.12 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย

เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียเครื่องยนต์ รุ่น HM500 ของ Infrared industries ดังแสดงในภาพ 3.12 สามารถวัดก๊าซไอเสียได้ 5 ชนิดคือ Hydrocarbons (HC) Carbon Monoxide (CO) Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Oxygen (O<sub>2</sub>) Nitric Oxide (NO<sub>x</sub>) โดยเครื่องวัดไอเสียมีข้อมูลจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องวัดไอเสีย

Display	Backlit LCD, Graphic 128 x64 mm		
External power	10-16 VDC, less than 1A		
Gases-NDIR	HC,CO and CO <sub>2</sub>		
Gases-Electro Chemical cell	O <sub>2</sub> and NO <sub>x</sub>		
Operating temperature	35°F to 110°F		
Output	RS232,Eight Analog output 0-5 VDC		
Sensors			
Gas	Range	Resolution	Accuracy
Hydrocarbons (HC)	0-10,000ppm	10ppm	±2%
Carbon Monoxide (CO)	0-10%	0.01%	±2%
Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )	0-20%	0.01%	±2%
Oxygen (O <sub>2</sub> )	0-25%	0.01%	±1%
Nitric Oxide (NO <sub>x</sub> )	0-5000 ppm	1 ppm	±2%

### 3.2 เชื้อเพลิงสำหรับการทดลอง

เชื้อเพลิงสำหรับการทดลองนี้ประกอบไปด้วย น้ำมันดีเซล น้ำมันปาล์มไบโอดีเซล และก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้จากเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลขนาด 50 kW<sub>m</sub> โดยใช้เหง้ามันสำปะหลังขนาด 2x2x2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถึง 3x3x3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.13 จากการส่งตัวอย่างก๊าซชีววมวลเพื่อตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ค่าองค์ประกอบก๊าซและค่าความร้อนของก๊าซที่ผลิตได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซลและน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลแสดงดังในตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.13 เหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของก๊าซชีววมวลที่ได้จากการวิเคราะห์

Gas	Percent by volume
CO	5.84
H <sub>2</sub>	7.79
CH <sub>4</sub>	4.03
CO <sub>2</sub>	11.09
Moisture	48.3 (% Wb)
Calorific Value	4.2 MJ/Nm <sup>3</sup>

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง	ดีเซล	ปาล์มไบโอดีเซล
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	860.0	876.9
ความหนืดจลน์ (m <sup>2</sup> /s)	3.8	4.821
จุดวาบไฟ (°C)	55	151
ค่าความร้อนกรอส (kJ/kg)	44,800	39,677

### 3.3 การวัดค่าตัวแปรในการทดลองและการคำนวณ

ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ ได้แก่ ภาระเครื่องยนต์ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของก๊าซ ปริมาณไอเสียและอุณหภูมิจุดต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.3.1 การวัดค่าภาระ ความเร็วรอบและกำลังเครื่องยนต์

ในการทดลองได้วัดค่าภาระของเครื่องยนต์โดยใช้โหลดเซลล์ ซึ่งมีพิสัยสูงสุดรับได้ 20 kgf และมีความละเอียดในการวัดค่า 0.1 kgf โดยแขนของไดนาโมมิเตอร์มีความยาว 238.9mm สามารถคำนวณทอร์กที่ได้จากการวัดดังสมการ

$$T = 0.2389 \times W \times 9.81(\text{Nm}) \quad (3.1)$$

โดย W คือน้ำหนักที่กดลงบนโหลดเซลล์

การวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์วัดโดยใช้เซนเซอร์วัดความเร็วรอบที่ติดตั้งอยู่กับเพลลาของไดนาโมมิเตอร์ และอ่านค่าจากหน้าจอแสดงผลของไดนาโมมิเตอร์ โดยแสดงผลเป็นรอบต่ออนาที ความละเอียดในการแสดงผล 1 รอบต่ออนาที

กำลังของเครื่องยนต์สามารถหาค่าได้ดังสมการ 3.2 แล้วสามารถคำนวณหาBMEP ตามสมการ 2.37

$$P = \frac{2\pi nT}{60} (\text{kW}) \quad (3.2)$$

โดย P คือ กำลังของเครื่องยนต์ (kW)

n คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (rpm)

T คือ ทอร์กของเครื่องยนต์ (Nm)

#### 3.3.2 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

การวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสามารถวัดได้โดยการใช้อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชนิด 3 กระเปาะ โดยใช้นาฬิกาจับเวลาที่ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 15 cc และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดังสมการ 3.3

$$\text{Fuel consumption} = \frac{\dot{m}_f}{t} (\text{l/s}) \quad (3.3)$$

โดย Fuel consumption คืออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (litre/s)

$\dot{m}_f$  คือ ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ (lire)

$t$  คือ เวลาที่วัดได้ (sec)

การวัดอัตราการไหลของก๊าซชีววมวลกับการวัดอัตราการไหลของอากาศเข้าเครื่องยนต์ ใช้ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลผ่านแผ่นออริฟิซ (Orifice plate) และมานอมิเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.13 ซึ่งวัดออกมาเป็นความสูงแตกต่างของน้ำมีหน่วยเป็น มิลลิเมตรของน้ำ ที่สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของก๊าซชีววมวลและอากาศโดยใช้สมการ

$$\dot{m} = CA\sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (3.4)$$

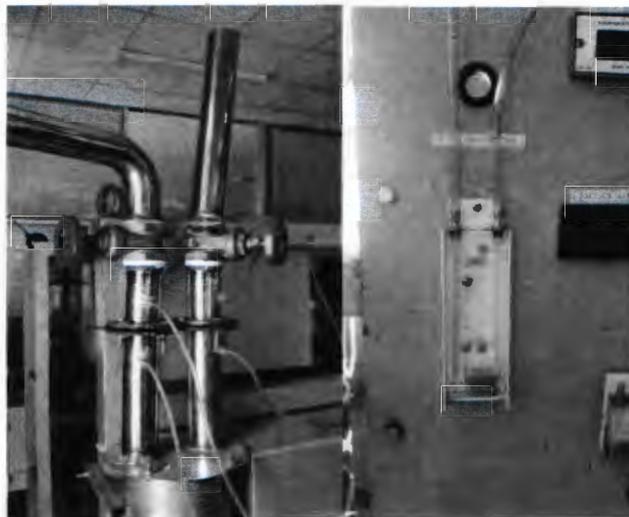
โดย  $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของก๊าซชีววมวลหรืออากาศ (kg/s)

$C$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การไหลของออริฟิซ

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรูออริฟิซ

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซชีววมวลหรืออากาศ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$(p_1 - p_2)$  คือ ค่าความดันตกคร่อมแผ่นออริฟิซ ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )



ภาพที่ 3.14 แผ่นออริฟิซและมานอมิเตอร์

อัตราการทดแทนน้ำมันดีเซล (Diesel saving ratio) คือปริมาณร้อยละที่ก๊าซชีววมวลสามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ที่ภาระและความเร็วรอบเท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\text{Diesel saving ratio} = \frac{m_d - m_p}{m_d} \times 100 \quad (3.5)$$

โดย  $m_d$  และ  $m_p$  เป็นปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลเมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันดีเซลอย่างเดียว และเชื้อเพลิงร่วมตามลำดับ

### 3.3.3 การวัดความดันในกระบอกสูบและการวิเคราะห์ผล

ข้อมูลความดันและปริมาตรในกระบอกสูบได้มาจากอุปกรณ์วัดความดันในกระบอกสูบ และอุปกรณ์วัดองศาเพลาคือข้อเหวี่ยงโดยค่าความดันในกระบอกสูบที่วัดได้มีหน่วยเป็นบาร์ (Bar) ข้อมูลความดันจะบันทึกไว้ทุกๆ 0.2 องศาเพลาคือข้อเหวี่ยง ดังนั้นในการหมุนของเครื่องยนต์ 1 รอบจะมีข้อมูลความดันในกระบอกสูบ 3,600 ข้อมูล และข้อมูลความดันในกระบอกสูบที่วัดได้จะถูกนำไปคำนวณหาค่าอัตราการปล่อยความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักร

ข้อมูลความดันในกระบอกสูบที่องศาเพลาคือข้อเหวี่ยงต่างๆตลอดช่วงจังหวะอัดและจังหวะขยายตัวสามารถนำไปใช้วิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อน โดยใช้สมการ

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} \quad (3.6)$$

โดย Q คือ การปล่อยความร้อนสุทธิ (J)

$\gamma$  คือ อัตราส่วนของความร้อนจำเพาะ ( $c_p/c_v$ ) และในการวิเคราะห์อัตราการปล่อยความร้อนของเครื่องยนต์ดีเซล ช่วงของค่า  $\gamma$  ที่เหมาะสมจะเป็น 1.3 - 1.35

p คือ ความดันในกระบอกสูบ (Pa)

V คือ ปริมาตรกระบอกสูบ ( $m^3$ )

### 3.3.4 การวัดปริมาณไอเสีย

ปริมาณไอเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเครื่องยนต์จะถูกวัดด้วยเครื่องมือวัดไอเสียรุ่น HM5000 โดยติดตั้งเข้ากับปลายท่อไอเสียและจะทำการวัดเมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัว

### 3.3.5 การวัดอุณหภูมิจุดต่างๆ

อุณหภูมิจุดต่าง ๆ ประกอบด้วย อุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิน้ำมันเครื่อง อุณหภูมิน้ำเข้า และน้ำออกจากเครื่องยนต์จะถูกวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งกับเครื่องยนต์ในจุดต่างๆเพื่อใช้ดูเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัว

### 3.4 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ สมรรถนะ และมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล เทียบกับการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว ซึ่งมีการทดสอบดังนี้

#### 3.4.1 การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว

เพื่อทราบถึงสมรรถนะเครื่องยนต์ การปล่อยมลพิษและการวัดความดันในกระบอกสูบ จะทำการทดสอบที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ 1,500 รอบต่อนาที โดยไม่ใส่ภาระ (No load) และที่ภาระต่างๆและเพิ่มภาระขึ้นเป็นช่วงๆ จนถึงภาระสุดท้ายที่เครื่องยนต์ทำได้ซึ่งจะมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

3.4.1.1 เริ่มการทดสอบ โดยการอุ่นเครื่องและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่รอบเดินเบาโดยไม่ใส่ภาระจนกระทั่งอุณหภูมิทุกจุดคงที่และเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัวซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 นาที

3.4.1.2 ปรับปริมาณการฉีดน้ำมันดีเซลโดยใช้คันเร่งจนความเร็วรอบเครื่องยนต์ถึง 1,500 รอบต่อนาทีโดยไม่ใส่ภาระ ปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อให้น้ำหล่อเย็นที่ไหลออกจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิ  $80 \pm 5$  องศาเซลเซียส รอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัวประมาณ 10 นาทีแล้วบันทึกค่า ความเร็วรอบ ภาระ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศ ค่ามลพิษและความดันในกระบอกสูบ

3.4.1.3 ทดสอบในลักษณะเดียวกันตามข้อสองแต่เพิ่มภาระขึ้นเป็นช่วง ๆ ครั้งละ 1 kgf (9.81N) และบันทึกค่าต่างๆเมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัว

3.4.1.4 เมื่อทดสอบจนถึงภาระสูงสุดที่เครื่องยนต์ทำได้แล้วปรับเครื่องยนต์ให้อยู่ในรอบเดินเบาโดยไม่ใส่ภาระประมาณ 5 นาทีแล้วจึงดับเครื่อง

#### 3.4.2 การทดสอบเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้น้ำมันปาล์มไบโอดีเซลร่วมกับก๊าซชีววมวล

ทำการทดลองโดยปรับภาระเพื่อหาอัตราการทดแทนสูงสุด

3.4.2.1 จุดเตาผลิตก๊าซชีววมวลเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าเตาผลิตก๊าซชีววมวลทำงานในสภาวะคงที่ ก่อนจะทำการทดสอบ

3.4.2.2 ปรับปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลให้รอบเครื่องยนต์ได้ 1,500 รอบต่อนาทีโดยไม่ใส่ภาระ

3.4.2.3 ปรับปริมาณก๊าซชีววมวลเข้าเครื่องยนต์ จนเครื่องยนต์มีความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลสูงสุด แล้วค่อยปรับปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลลดลง จนความเร็วรอบเหลือ 1,500 รอบต่อนาทีแล้วทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซชีววมวลกับน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลอย่างละเอียดอีกรอบเพื่อให้แน่ใจว่าเป็นตำแหน่งอัตราการทดแทนสูงสุด

3.4.2.4 ปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น เพื่อให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ไหลออกจากเครื่องยนต์มีอุณหภูมิ  $80 \pm 5$  องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากความแตกต่างของอุณหภูมิ รอให้เครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัวประมาณ 10 นาทีแล้วจึงบันทึกค่า ความเร็วรอบ ภาระ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง อากาศ อุณหภูมิจุดต่างๆ ความดันในกระบอกสูบและมลพิษ

3.4.2.5 ทดสอบลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนที่ 2-4 แต่เพิ่มภาระเป็นช่วงๆ โดยใส่ภาระครั้งละ 1 kgf แล้วบันทึกค่าต่างๆเมื่อเครื่องยนต์อยู่ในสภาวะคงตัว

3.4.2.6 เมื่อทดสอบจนถึงภาระสูงสุดแล้ว ปรับเครื่องยนต์ให้อยู่ในรอบเดินเบาประมาณ 5 นาทีก่อนดับเครื่องยนต์

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและอภิปรายผล

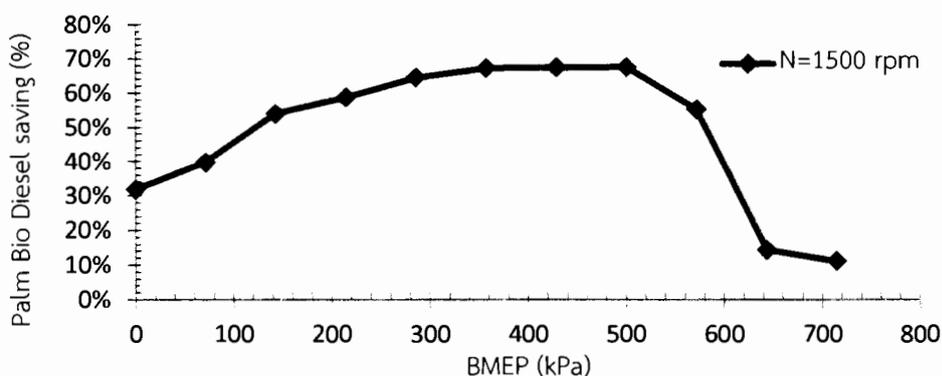
ผลการศึกษาศมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายในและ มลพิษที่ใช้ ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิง ร่วมในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยกำลังอัด

#### 4.1 อัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลและสมรรถนะของเครื่องยนต์

##### 4.1.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำมันดีเซลและปาล์มไบโอดีเซลที่ใช้ในการทดสอบและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ในแต่ละภาระเมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันดีเซลอย่างเดียวและเชื้อเพลิงร่วม และอัตราการทดแทนสูงสุดในแต่ละภาระ

BMEP (kPa)	$m_d$ (kg/h)	$\lambda_d$	$m_p$ (kg/h)	$\lambda_p$	Diesel saving (%)
0.00	0.23	4.51	0.16	2.02	31.88
71.48	0.25	4.11	0.15	2.07	39.71
142.96	0.30	3.52	0.14	2.02	53.99
214.45	0.31	3.35	0.13	1.95	58.71
285.93	0.34	3.05	0.12	1.78	64.52
357.41	0.43	2.44	0.14	1.49	67.22
428.89	0.51	2.06	0.17	1.26	67.41
500.38	0.60	1.74	0.19	1.09	67.57
571.86	0.71	1.46	0.32	0.90	55.30
643.34	0.86	1.21	0.73	0.68	14.44
714.82	1.06	0.98	0.94	0.56	11.25



ภาพที่ 4.1 อัตราส่วนการทดแทนน้ำมันดีเซลด้วยปาล์มไบโอดีเซลและก๊าซชีววมวลที่ภาระ BMEP ต่างๆ

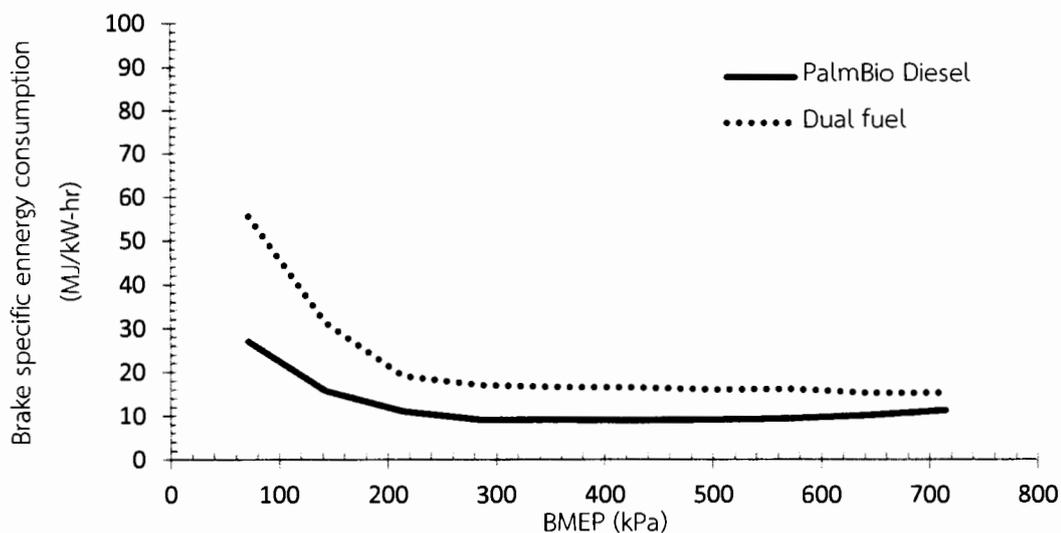
จากตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณการฉีดน้ำมันในแต่ละภาระทั้งในรูปเชื้อเพลิงเดี่ยว และเชื้อเพลิงร่วม โดย  $m_d$  และ  $m_p$  คือปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลอย่างเดียวและปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเมื่อใช้ในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วม ตามลำดับ  $\lambda_d$  และ  $\lambda_p$  คืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสัมพัทธ์เมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลอย่างเดียวและเชื้อเพลิงร่วม ตามลำดับ ที่อัตราส่วนการทดแทนสูงสุดแต่ละภาระ อัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล (Palm Bio Diesel Saving Ratio) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

โดย  $m_d$  และ  $m_p$  เป็นปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลอย่างเดียวกับ ปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเมื่อใช้ในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วม

จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.1 การใช้เชื้อเพลิงก๊าซชีววมวลร่วมกับปาล์มไบโอดีเซลสามารถลดปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลได้ในทุกช่วงภาระเครื่อง โดยสามารถทดแทนได้สูงสุดร้อยละ 67.57 ที่ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 500.38 kPa และที่ภาระเครื่องยนต์สูงกว่านี้อัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากถูกจำกัดด้วยอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศที่เหมาะสม เมื่อภาระเพิ่มขึ้นการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลมากขึ้นเพื่อเพิ่มกำลังให้กับเครื่องยนต์ ทำให้ปริมาณอากาศในกระบอกสูบลดลงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีววมวลทดแทนได้น้อยลงด้วย

#### 4.1.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption)

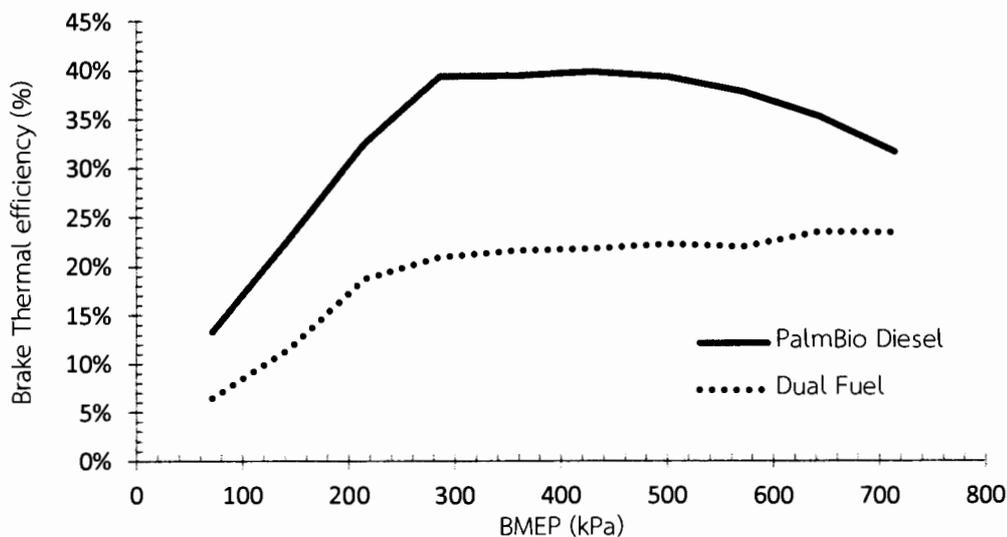
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคำนวณจากอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ พบว่าการใช้งานในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วมมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าการใช้น้ำมันปาล์มไบโอดีเซลอย่างเดียวทุกช่วงภาระ ซึ่งอาจเกิดจากการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลที่น้อยทำให้การแตกตัวเป็นละอองฝอยไม่ดีเท่ากับการฉีดเชื้อเพลิงปาล์มไบโอดีเซลอย่างเดียวในปริมาณมาก จึงต้องใช้เชื้อเพลิงรวมมากกว่าเพื่อให้ได้กำลังเท่ากันดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ภาวะ BMEP ต่าง ๆ

#### 4.1.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

พบว่าการใช้เชื้อเพลิงร่วมให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าการใช้น้ำมันปาล์มไบโอดีเซลอย่างเดียวยุคช่วงภาวะ ซึ่งอาจเกิดจากอัตราส่วนการทดแทนสูงสุด ทำให้อากาศในห้องเผาไหม้ลดลง จึงเกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดและการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และส่วนหนึ่งก๊าซชีววมวลมีค่าความร้อนและความหนาแน่นของพลังงานต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำลงได้ดังภาพที่ 4.3



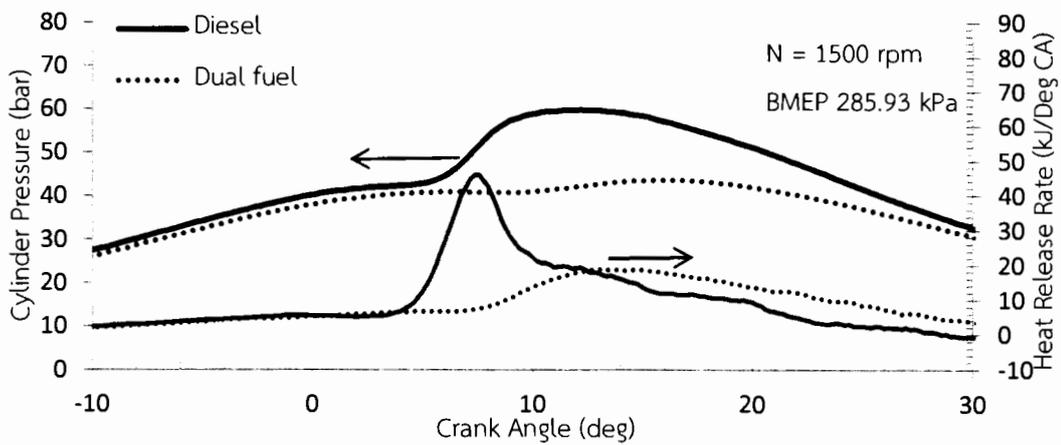
ภาพที่ 4.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ที่ภาวะ BMEP ต่าง ๆ

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะการเผาไหม้

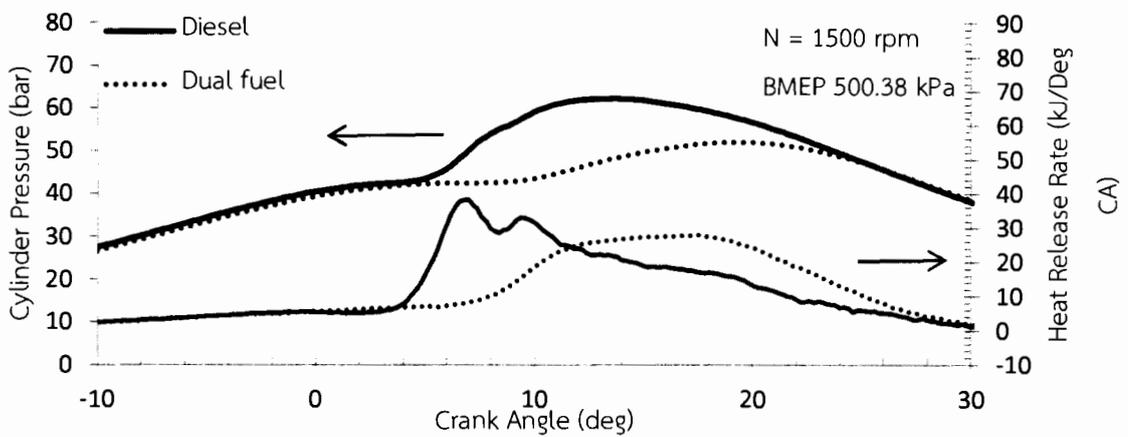
จากข้อมูลความดันภายในกระบอกสูบที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการปล่อยความร้อนโดยใช้ค่าเฉลี่ยจาก 60 วัฏจักรได้ผลดังนี้

พบว่าในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วมที่ภาวะความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 285.93 kPa และ 500.38 kPa ความดันสูงสุดในกระบอกสูบลดลงจากรูปแบบเชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลอย่างเดียว 17.31 บาร์ และ 10.13 บาร์ ตามลำดับ และที่ภาวะความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 571.86 kPa ความดันสูงสุดในกระบอกสูบเพิ่มขึ้น 7.41 บาร์ เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซลอย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการปล่อยความร้อนในช่วง premixed combustion ที่สูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วม ที่ภาวะความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 285.93 kPa และ 500.38 kPa ต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว 26.99 และ 10.47 จูลต่อองศาเซลเซียสต่อหน่วยปริมาตร ตามลำดับ แต่ที่ภาวะความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 571.86 kPa อัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมสูงกว่าอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดของการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว 14.49 จูลต่อองศาเซลเซียสต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งเกิดจากการฉีดน้ำมันดีเซลในสัดส่วนที่สูงกว่าก๊าซชีววมวลมาก ทำให้เกิดความร้อนสูงและเผาไหม้ส่วนผสมของอากาศและก๊าซชีววมวลอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ความดันในกระบอกสูบสูงขึ้น

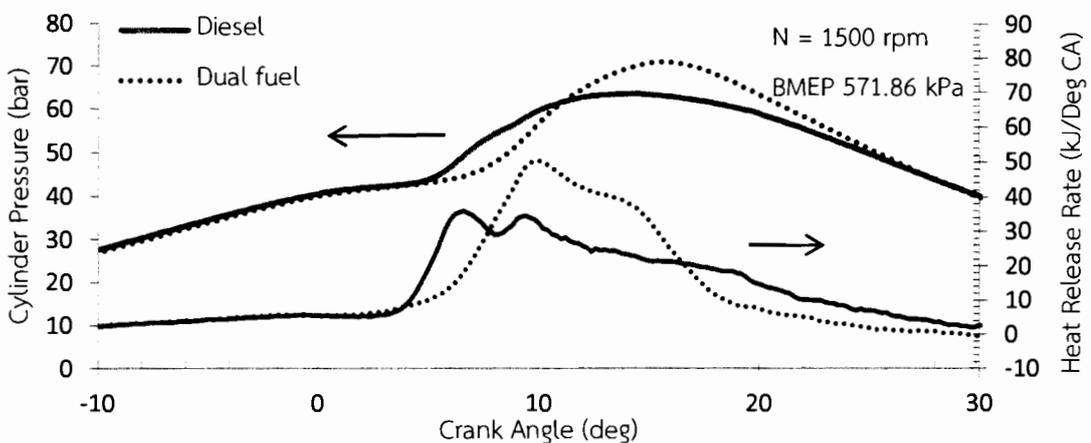
เมื่อวิเคราะห์รูปแบบการเผาไหม้จากลักษณะการปล่อยความร้อนพบว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว เมื่อภาวะเพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วง premixed combustion สั้นลง และช่วง mixing control combustion กว้างมากขึ้น ส่วนจุดเริ่มต้นการเผาไหม้ใกล้เคียงกันทุกภาวะ ซึ่งต่างจากการใช้เชื้อเพลิงร่วม ที่มีอัตราการปล่อยความร้อนต่ำในช่วงภาวะต่ำ และสูงขึ้นเมื่อภาวะเพิ่มขึ้น โดยมีรูปแบบการเผาไหม้แบบ premixed combustion ร่วมกับ mixing control combustion ที่เห็นได้ชัดในภาพที่ 3 (ข) มีช่วงอัตราการปล่อยความร้อนสูงสุดค่อนข้างกว้าง ซึ่งเกิดจากการปล่อยความร้อนของส่วนผสมที่ผสมกันเป็นอย่างดีระหว่างอากาศกับก๊าซชีววมวล แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนก๊าซชีววมวลขึ้นจะส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการจุดระเบิดเพิ่มขึ้นดังภาพที่ 4.4



(ก)



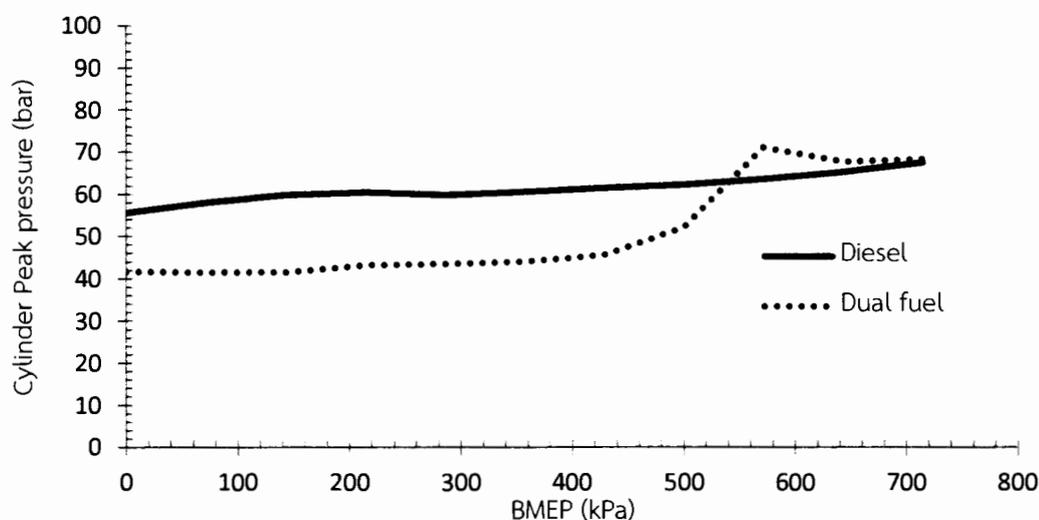
(ข)



(ค)

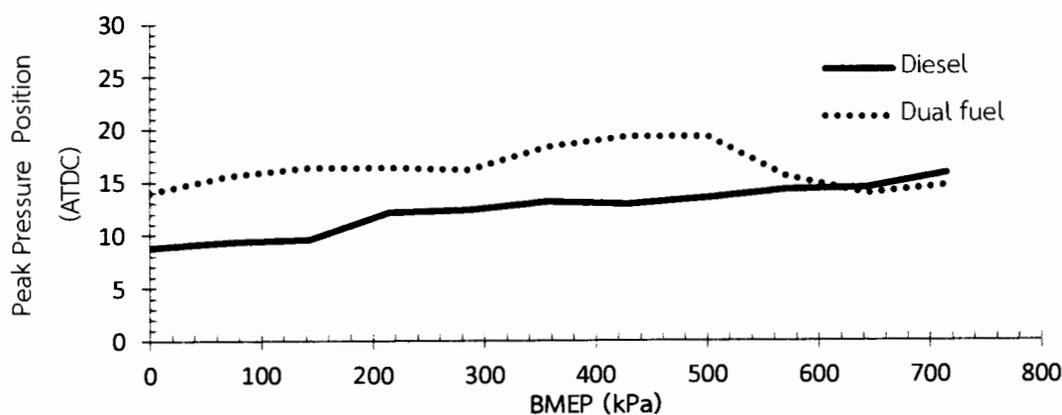
ภาพที่ 4.4 แผนภาพเปรียบเทียบแรงดันในกระบอกสูบและอัตราการปล่อยความร้อนระหว่างเชื้อเพลิงเดี่ยวกับเชื้อเพลิงร่วม(ก) ที่ภาระ  $BMEP 285.93$  kPa (ข) ที่ภาระ  $BMEP 500.38$  kPa (ค) ที่ภาระ  $BMEP 571.86$  kPa

ความดันสูงสุดในกระบอกสูบ พบว่าความดันสูงสุดในกระบอกสูบของการใช้เชื้อเพลิงร่วม ต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว 10-18 บาร์ ในช่วงภาระ 0-500 kPa ซึ่งความล่าช้าในการจุดระเบิดน่าจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ความดันสูงสุดและตำแหน่งความดันสูงสุดในกระบอกสูบเปลี่ยนไป ส่วนที่ภาระ 571.86 – 714.82 kPa มีความดันในกระบอกสูบใกล้เคียงกันเนื่องจากมีปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลมากขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วในช่วง premixed combustion ซึ่งส่งผลต่อความดันสูงสุดในกระบอกสูบโดยตรง ดังภาพที่ 4.5



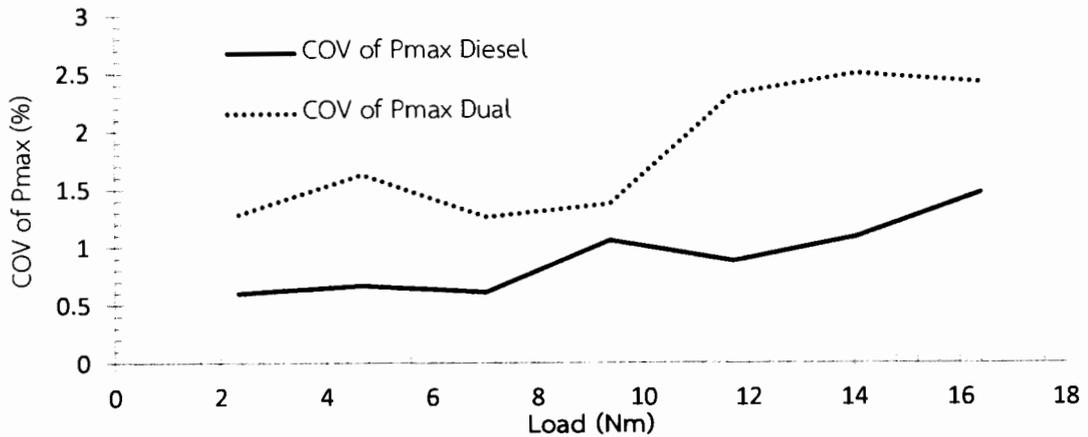
ภาพที่ 4.5 แผนภาพแสดงความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่ภาระ BMEP ต่าง ๆ

ภาพที่ 4.6 พบว่าตำแหน่งความดันสูงสุดในกระบอกสูบของการใช้เชื้อเพลิงร่วมอยู่หลังการใช้ น้ำมันดีเซลอย่างเดียว 3-7 องศาเพลลาข้อเหวี่ยง ซึ่งเป็นผลจากความล่าช้าในการจุดระเบิดด้วย



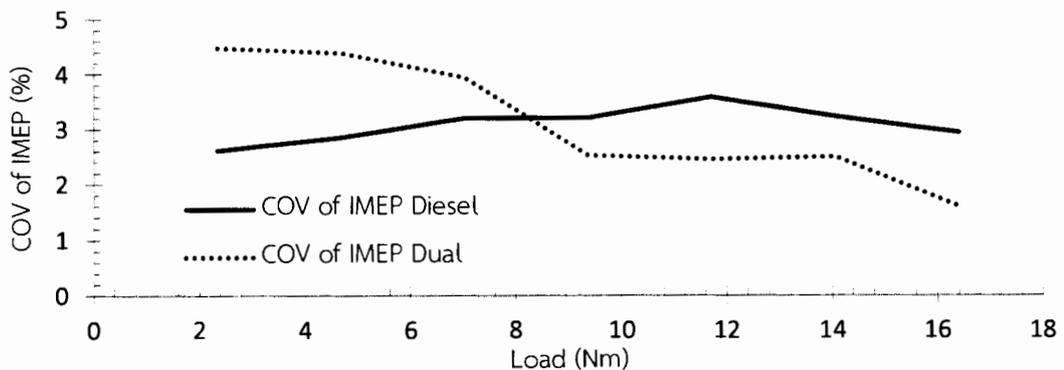
ภาพที่ 4.6 แผนภาพแสดงตำแหน่งการเกิดความดันสูงสุดในกระบอกสูบที่ภาระ BMEP ต่าง ๆ

การแปรผันของการเผาไหม้ระหว่างวัฏจักรต่อวัฏจักรนิยามวัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันของค่าความดันสูงสุด ( $COV_{P_{max}}$ ) และสัมประสิทธิ์การแปรผันของความดันยังผลเฉลี่ยบังชี้ ( $COV_{IMEP}$ ) ในกระบอกสูบ ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการ 2.41 และ 2.42



ภาพที่ 4.7 แผนภาพแสดงสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันในกระบอกสูบสูงสุดที่ภาระต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันระหว่างวัฏจักรของความดันในกระบอกสูบสูงสุดที่ภาระและอัตราการผลิตต่าง ๆ เมื่อภาระเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.6 -2.5



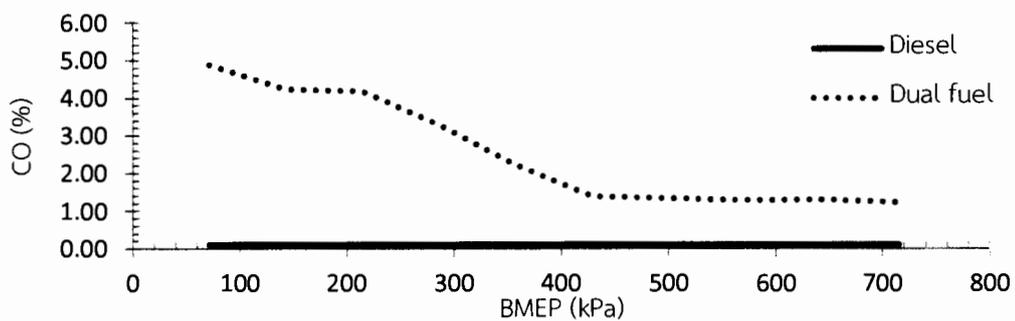
ภาพที่ 4.8 แผนภาพแสดงสัมประสิทธิ์ความแปรผันของความดันยังผลเฉลี่ยบังชี้ที่ภาระต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.8 ช่วงการเผาไหม้ที่ไม่เสถียรเกิดขึ้นช่วง  $COV_{IMEP}$  มีค่ามากกว่าร้อยละ 5 ขึ้นไปจากการทดลองนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันระหว่างวัฏจักรของความดันยังผลเฉลี่ยบังชี้ที่ภาระต่างๆ จากการใช้น้ำมันดีเซลและก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.5 – 4.4 โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อภาระเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้เชื้อเพลิงร่วมในภาระและอัตราการผลิตดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของเครื่องยนต์

### 4.3 ผลการวัดมลพิษ

#### 4.3.1 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในไอเสีย

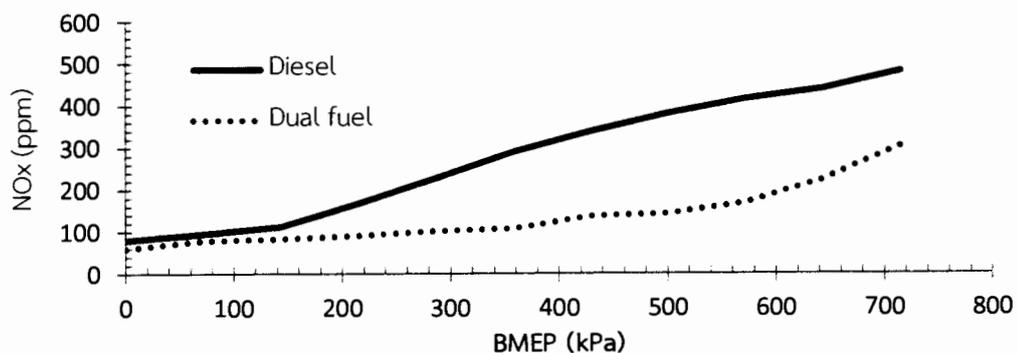
ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงร่วมสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวในช่วงภาระ ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และการใช้เชื้อเพลิงร่วมที่อัตราทดแทนสูง ๆ ทำให้ปริมาณอากาศที่เหลือในกระบอกสูบลดน้อยลง เกิดเป็นส่วนผสมหนาทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะลดลงเมื่อภาระเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น โดยลดลงจากร้อยละ 4.88 ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 71.48 kPa เป็นร้อยละ 1.28 ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 571.86 kPa ดังภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในไอเสียที่ภาระ BMEP ต่าง ๆ

#### 4.3.2 ปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจนในไอเสีย

พบว่าปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงร่วมจะน้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว 20-250 ส่วนในล้านส่วน เนื่องจากการใช้งานเชื้อเพลิงร่วมมีส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงน้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ก่อให้เกิดออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียที่ภาระ BMEP ต่าง ๆ

#### 4.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการศึกษาต้นทุนการจัดการการผลิตก๊าซชีววมวลเพื่อใช้งานเป็นเชื้อเพลิงร่วม กรณีว่าต้องการพลังงานจากเครื่องยนต์ 10 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยเดินระบบ 8 ชั่วโมงต่อวัน รวมเป็น 80 กิโลวัตต์ชั่วโมง จากการทดลองที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยเบรค 500.38 kPa ก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง สามารถทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลสัมพัทธ์สูงสุดร้อยละ 67.57

#### ตารางที่ 4.2 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้ก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง

	เครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วม ก๊าซชีววมวล-ปาล์มไบโอดีเซล	เครื่องยนต์ เชื้อเพลิงเดี่ยว ใช้ปาล์มไบโอดีเซล
ต้นทุนการสร้า งเตาผลิตก๊าซชีววมวล	80,000 บาท	-
ต้นทุนวัตถุดิบ	0.5 บาทต่อกิโลกรัม	25 บาทต่อลิตร
ต้นทุนแต่ละชนิด พลังงาน	- ก๊าซชีววมวล 1.1 บาท ต่อกิโลวัตต์ - ปาล์มไบโอดีเซล 2.225 บาท ต่อกิโลวัตต์	6.918 บาทต่อ กิโลวัตต์
อัตราการใช้วัตถุดิบ	ที่อัตราการทดแทนร้อยละ 67.57 - เหง้ามันสำปะหลัง 2.2 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง - ปาล์มไบโอดีเซล 0.089 ลิตรต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง	0.276 ลิตรต่อ กิโลวัตต์ชั่วโมง
ต้นทุนกรณีต้องการ พลังงาน 80 กิโลวัตต์ ชั่วโมง	- ก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง 88 บาท - ปาล์มไบโอดีเซล 178 บาทต่อวัน รวมเป็น 266บาท	554 บาท
ระยะเวลาในการคืน ทุน	สามารถคืนทุนภายใน 278 วัน กรณีทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน	

จากตาราง 4.2 พบว่าการที่จะเลือกโครงการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ จะต้องมีการลงทุนสร้างเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขึ้นมา แต่ก็สามารถใช้งานและมีระยะเวลาคืนทุนภายใน 1 ปี อีกทั้งการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาใช้งานเป็นเชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซชีววมวลกับปาล์มไบโอดีเซลแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้อีกหลากหลาย จึงมีความคุ้มค่าที่จะนำเหง้ามันสำปะหลังมาผลิตก๊าซชีววมวล

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำเอาเหง้ามันสำปะหลังมาผลิตก๊าซชีววมวลที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่จุดระเบิดด้วยกำลังอัดในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วมกับปาล์มไบโอดีเซล จากการศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษา สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษ ของเครื่องยนต์ในบทที่ผ่านมา สามารถสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

#### 5.1 สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษเมื่อใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วม

การวิเคราะห์สมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้ และมลพิษของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับปาล์มไบโอดีเซลในเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยการอัดสามารถสรุปผลดังนี้

##### 5.1.1 สมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วม

ก๊าซชีววมวลที่ผลิตจากเหง้ามันสำปะหลังสามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้สูงสุดร้อยละ 67.57 ที่ภาระความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 500.38 kPa ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ ชญานนท์ แสงมณีและคณะ [12], Banapurmath et al. [21-22], Hassan et al. [23] ที่พบว่าการใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมสามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ประมาณร้อยละ 60-70 ในขณะที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลทุกช่วงภาระ และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวทุกช่วงภาระ

##### 5.1.2 คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วม

คุณลักษณะการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงร่วมมีรูปแบบการปล่อยความร้อนและการเผาไหม้ที่แตกต่างจากการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว คือมีช่วง Premixed combustion และ Mixing control combustion ที่กว้างกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียว ส่วนความดันในกระบอกสูบมีค่าลดลง 10-18 บาร์ในช่วงภาระ 0-500 kPa ขณะที่ความล่าช้าในการจุดระเบิดและระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น 2-5 องศาเพลลาซอเหวียง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันระหว่างวัฏจักร  $COV_{IMEP}$  และ  $COV_{P_{max}}$  มีค่าใกล้เคียงกับการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวและมีค่าอยู่ในช่วงที่เครื่องยนต์ทำงานได้อย่างเสถียรภาพ คือมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 5

### 5.1.3 มลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วม

การใช้ก๊าซชีววมวลเป็นเชื้อเพลิงร่วมพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงภาระเครื่องยนต์ต่ำและลดลงเมื่อภาระเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นแต่ก็ยังมีค่าสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลอย่างเดียวทุกช่วงภาระ ในขณะที่ออกไซด์ของไนโตรเจนลดลง 20-250 ส่วนในล้านส่วน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การจะปรับปรุงเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้งานก๊าซชีววมวลในรูปแบบเชื้อเพลิงร่วมให้มีสมรรถนะและมลพิษที่ดีขึ้นควรพิจารณาศึกษาผลขององศาการฉีดน้ำมันล่วงหน้า (Pilot diesel injection timing) เพื่อทดสอบสมมติฐาน การปรับองศาฉีดน้ำมันล่วงหน้า 2-5 องศาเพลลาข้อเหวี่ยงจากเดิมว่ามีผลช่วยในเรื่องสมรรถนะและมลพิษอย่างไร

5.2.2 ก๊าซชีววมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมผลิตจากเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง ซึ่งทำการทดสอบสมรรถนะ คุณลักษณะการเผาไหม้และมลพิษของเครื่องยนต์ในระหว่างผลิตก๊าซชีววมวลเลย ซึ่งคุณสมบัติของก๊าซชีววมวลอาจจะไม่คงที่ถึงแม้จะพยายามควบคุมขนาดของเชื้อเพลิง แหล่งที่มาของเชื้อเพลิง อัตราการจ่ายอากาศให้เท่ากันทุกการทดลองแล้วก็ตาม เพื่อให้ผลการทดลองถูกต้องแม่นยำขึ้นควรมีการติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซชีววมวลแบบออนไลน์ (online gas analyzer) หรือมีการเก็บบรรจุก๊าซชีววมวลที่มีคุณสมบัติคงที่ก่อนนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเครื่องยนต์ เนื่องจากระบบนี้เหมาะกับการใช้งานอยู่กับที่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้สะท้อนให้เห็นถึงสภาพการใช้งานก๊าซชีววมวลที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีการนำมาประยุกต์ใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2553) “แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี”, รายงานพลังงานแห่งประเทศไทย 2553. [http://www.dede.go.th/dede/images/stories/6may54\\_circular/energy\\_53\\_2.pdf](http://www.dede.go.th/dede/images/stories/6may54_circular/energy_53_2.pdf). 25 มกราคม, 2559.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2554) “แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564)”, รายงานพลังงานแห่งประเทศไทย 2554. <http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>. 25 มกราคม 2559,
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาและส่งเสริมการใช้ระบบผลิตพลังงานความร้อนด้วยก๊าซชีววมวลสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก. รายงานต่อกระทรวงพลังงาน, 2552.
- . รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาและพัฒนาระบบก๊าซชีววมวลในการสูบน้ำเพื่อการเกษตร. รายงานต่อกระทรวงพลังงาน, 2556.
- ณทพร จินดาประเสริฐ. การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ของก๊าซชีวภาพในเครื่องยนต์สันดาปภายใน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554.
- ชฎานนท์ แสงมณี และคณะ. “สมรรถนะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซชีววมวลและน้ำมันไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิง”, วารสารวิชาการ ม.อบ. 11(2): 1-9, พฤษภาคม – สิงหาคม, 2552.
- ชนาภา วรรณศรี. การประเมินวัฏจักรชีวิตและต้นทุนของการผลิตกระแสไฟฟ้าจากแก๊สซิฟิเคชันของไม้โตเร็ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551
- ทิพย์สุภินทร์ หินชูย. การศึกษาการจำกัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยสุรนารี, 2550.
- นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีววมวล. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, 2553.
- พิชาญ มานะบรรยง. การศึกษาเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงและต่อเนื่องโดยใช้เศษถ่านเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2547.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- พุทธอินทร์ จารุวัฒน์. ศึกษาแนวทางการนำเหง้ามันสำปะหลังมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเตาเผาชีวมวลแบบไฮโคลนสำหรับการลดความชื้นผลิตผลเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552.
- พิศาล สมบัติวงศ์. การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซชีวมวลขนาดเล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- ยิ่งลักษณ์ กาญจนฤกษ์. การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์โครงการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเหง้ามันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- รัฐนนท์ บุญญา. การศึกษาการใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอบแห้งมันเส้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2556.
- รัตนะ เลหวนิช. การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- วรรณช แจงสว่าง. เทคโนโลยีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล. กรุงเทพมหานคร: แดเน็กซ์, 2556.
- วีรชัย อাজার. การพัฒนากระบวนการผลิตวัตถุดิบจากมันสำปะหลังสำหรับอุตสาหกรรมเอทานอล. ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2551.
- สถานีวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและน้ำมันพืช. (2550). “การผลิตปาล์มไบโอดีเซล”, การผลิตไบโอดีเซล. [www.biodiesel.eng.psu.ac.th/whatis.php](http://www.biodiesel.eng.psu.ac.th/whatis.php). 25 มกราคม, 2559.
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร องค์กรมหาชน. (2554) “เทคโนโลยีผลิตปาล์มไบโอดีเซลจากปาล์มน้ำมัน”, คลังข้อมูลสารสนเทศระดับภูมิภาค. [www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-04.php](http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-04.php). 25 มกราคม, 2559.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Azimov,U., and et al. “Effect of syngas composition on combustion and exhaust emission characteristics in a pilot-ignited dual-fuel engine operated in PRIMIER combustion mode”, **International journal of Hydrogen Energy**. 36(18): 11985-11996; February, 2011.
- Banapurmath, P.G. and et al. “Combustion characteristics of 4-stroke CI engine operated on Honge oil, Neem and Rice bran oils when directly injected and dual fuelled with producer gas induction”, **Renewable Energy**. 34(7): 1877-1884; October, 2009.
- Basu, P. “Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines”, **Renewable Energy**. 38(7): 1-9; December, 2012.
- B.S. Pathak and et al. “Performance evaluation of an agricultural residue-based modular throat-type down-draft gasifier for thermal application”, **Biomass and Bioenergy**. 32(1): 72-77; January, 2008.
- Heywood, J.B. **Internal combustion engine Fundamentals**. New York: McGraw hill, 1988.
- N.R Banapurmath, P.G. Tewari. “Comparative performance studies of a 4-stroke CI engine Operated on dual fuel mode with producer gas and Honge oil and its methyl ester (HOME) with and without carburetor”, **Renewable Energy**. 34(4): 1009-1015; October, 2009.
- Pratik, N. and et al. “Experimental studies on producer gas generation from wood waste in downdraft biomass gasifier”, **Bioresource Technology**. 100(12): 3127-3133; June, 2009.
- S. Hanssan and et al. “Performance and emission Characteristics of supercharged producer gas-Diesel dual fuel engine”, **Journal of Applied Sciences**. 11(9): 1606-1611; January, 2011.

ภาคผนวก

## ผลงานจากวิทยานิพนธ์

บทความที่นำเสนอในที่ประชุมทางวิชาการระดับชาติ

ณัฐวิตร คงบำรุง, ประชาสันติ ไตรยสุทธิ “การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซชีววมวลจากเหง้ามันสำปะหลัง-ปาล์มไบโอดีเซล” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30. 5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา  
Paper no AEC0016.

### การคำนวณ

การคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและอัตราการทดแทนน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล

จากสมการที่ 3.5 อัตราการทดแทนน้ำมันดีเซล (Diesel saving ratio) คือปริมาณร้อยละที่ ก๊าซชีววมวลสามารถทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลได้ที่ภาวะและความเร็วรอบเท่ากัน ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการ

$$\text{Diesel saving ratio} = \frac{m_d - m_p}{m_d} \times 100$$

โดย  $m_d$  และ  $m_p$  เป็นปริมาณการฉีดน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลเมื่อใช้ในรูปแบบน้ำมันอย่าง เดี่ยวและเชื้อเพลิงร่วมตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ที่ความดันยังผลเฉลี่ยเบรก 500.38 kPa

$$m_d = 0.599 \text{ kg/h}$$

$$m_p = 0.194 \text{ kg/h}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น PalmBio Diesel saving ratio} &= \frac{0.599 - 0.194}{0.599} \times 100 \\ &= 67.57 \% \end{aligned}$$

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายณัฐวัตร คงบำรุง
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2541-2546 มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี พ.ศ. 2547-2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2551-2557 วิศวกร แผนกออกแบบและทดสอบประสิทธิภาพรถยนต์ บริษัท อีซูซุเทคนิคส์เซ็นเตอร์ พ.ศ. 2557-ปัจจุบัน ประกอบธุรกิจส่วนตัว