

การศึกษาการใช้ประโยชน์จากร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์  
ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล

นายสุภัทร หนูแย้ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2551

**A STUDY ON WASTE HEAT UTILIZATION FROM  
GENERATOR ENGINE FOR BIOMASS DRYING**

**Supat Nuyam**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the**

**Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2008**

การศึกษาการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตรถยนต์ไฟฟ้า  
สำหรับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อจหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ

(อ. ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยเสน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุภัทร หนูแย้ม : การศึกษาการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิต  
กระแสไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล (A STUDY ON WASTE HEAT  
UTILIZATION FROM GENERATOR ENGINE FOR BIOMASS DRYING)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 128 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิต  
กระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน มาใช้ในการอบแห้ง  
เชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีขั้นตอนการศึกษาคือ (1) ศึกษาปริมาณความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์  
โดยเน้นการทดสอบหาความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์ ผลิตกระแสไฟฟ้า ในภาระการ  
ทำงานของเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้าที่ 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ (2) ศึกษาการนำความร้อน  
เหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบะ โดยความ  
สูงของวัสดุอบแห้ง 50 เซนติเมตร และทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 125-135 องศาเซลเซียส โดยมีอัตรา  
การไหลลมร้อน 3,007 m<sup>3</sup>/hr เชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบแห้ง 2 ชนิด คือ ไม้ยูคาลิปตัส สับและเห้งน้ำมัน  
สำปะหลังสับ

ผลการทดสอบพบว่าที่ภาระการทำงาน 80 กิโลวัตต์ จะมีพลังงานความร้อนออกมากับ  
ไอเสีย 75.52 กิโลวัตต์ ซึ่งจะนำมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จากผลการทดสอบ  
การอบแห้ง พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของการอบแห้งไม้โตเร็วสับและเห้งน้ำมัน  
สำปะหลัง สับ อยู่ระหว่าง 4.05 -4.33 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> และค่าประสิทธิภาพรวมการอบแห้งเฉลี่ย  
ประมาณ 59.83 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบแห้ง จะทำให้  
ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก 21.46 % เพิ่มขึ้น เป็น 41.72 % และพิจารณา  
ประสิทธิภาพการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์จะทำให้ประสิทธิรวมของระบบ  
จาก 17.55% เพิ่มขึ้น เป็น 27.46%

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

SUPAT NUYAM : A STUDY ON WASTE HEAT UTILIZATION FROM  
GENERATOR ENGINE FOR BIOMASS DRYING. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 128 PP.

#### WASTE HEAT RECOVERY/ BIOMASS/ EXHAUST GAS

The main aim of this research was to study the waste heat recovery of an engine-generator set from a small-scale biomass gasification power plant. The heat was used as a heat source for biomass drying. The study procedures of (1) the study of the waste heat quantity generated from an engine-generator which was only focused on the heat from combustion exhaust gas at different load condition of 0, 20, 40, 60 and 80 kW. (2) the study of the utilization of waste heat recovery for biomass drying in which the bin dryer type was used. The experiments were set with conditions of a 50 cm depth of biomass in the bins, the drying temperature of 125-135 °C and the hot air flow rate of 3,007 m<sup>3</sup>/hr. Two types of biomass were selected, namely Eucalyptus camaldulensis chip and cassava rhizome chip.

The experimental results indicated that the heat amount of 75.52 kW was generated accompanying with exhaust gas. This considerable amount of heat was used further for biomass drying. The drying tests showed that the specific power consumption of the selected Eucalyptus camaldulensis chip and cassava rhizome chip was between 4.05-4.33 MJ/kg<sub>H2O</sub> and the average total efficiency of drying was about 59.83%. In addition, recovering waste heat for drying results in an increase of both engine-generator efficiency and power plant overall efficiency from 21.46% to 41.72% and from 17.55% to 27.46 %, respectively.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2008

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย อันประกอบด้วยบุคคลสำคัญดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ ดร. พยุงศักดิ์ จุลยุเสนา อาจารย์ ดร. สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ ที่เป็นประโยชน์ อาจารย์ พรรษา ลิบลับ และ คุณพินิจ จีระคกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ อันเป็นประโยชน์ และช่วยแก้ไขปัญหา

ภารกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

บุคลากร ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ช่วยสนับสนุนการทำวิจัย และบุคคลเคียงข้างผู้วิจัย ที่คอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ และคุณกรรณิการ์ ประเสริฐสังข์ ที่คอยให้คำแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์และคอยให้กำลังใจ

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ ครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ที่ดี ให้แก่ผู้วิจัยและสำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุพจน์ หนูแย้ม และครอบครัวอันเป็นที่รัก ยิ่งที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจ ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีกำลังใจในการดำเนินชีวิตที่ดีตลอดมา

สุภัทร หนูแย้ม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>4</b>
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ประวัติโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน “สุรนารี”.....	4
2.2.1 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน .....	5
2.2.2 ส่วนประกอบของระบบ.....	9
2.3 การใช้แก๊สเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้า โดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน .....	15
2.3.1 การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง .....	16
2.3.2 การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิง .....	16
2.3.3 การนำเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง .....	16
2.4 สมดุลพลังงานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน .....	17

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.5	การหาค่าความจุความร้อนของไอเสีย.....	18
2.5.1	ทฤษฎีการเผาไหม้ .....	18
2.5.2	การหาค่าความจุความร้อนของไอเสีย .....	19
2.6	การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์มาใช้ประโยชน์ .....	20
2.7	การอบแห้ง .....	21
2.7.1	หลักการอบแห้ง .....	21
2.7.2	การอบแห้งไม้ .....	23
2.7.3	ชนิดของเครื่องอบแห้ง .....	24
3	เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย .....	31
3.1	เชื้อเพลิงชีวมวล .....	31
3.2	อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	32
3.3	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย .....	35
3.3.1	การรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น .....	37
3.3.2	การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	37
3.3.3	ทดสอบเดินระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก .....	40
3.3.4	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน .....	42
3.3.5	การศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	43
3.3.6	การศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้	
	ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ .....	44
3.3.7	การศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้า	
	ร่วมกับพลังงานความร้อน .....	48
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	50
4.1	ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	50
4.1.1	สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล (Physical Properties) .....	51
4.1.2	องค์ประกอบ แบบประมาณ (Proximate Analysis) .....	51



## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

4.1.3	องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) .....	52
4.2	การศึกษาสภาวะการเดินระบบและความสามารถในการผลิตแก๊สชีวมวล .....	52
4.2.1	อัตราการไหลแก๊สชีวมวล .....	53
4.2.2	องค์ประกอบของแก๊สชีวมวล (Gas Composition).....	53
4.3	การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล .....	55
4.3.1	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Efficiency) .....	55
4.3.2	ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency) .....	55
4.3.3	ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency) .....	55
4.3.4	อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) .....	55
4.4	การศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	56
4.4.1	พลังงานที่เข้าสู่ระบบ .....	57
4.4.2	พลังงานที่ออกจากระบบ .....	57
4.4.3	ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	57
	รวมพลังงานความร้อน .....	59
4.5	การศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ .....	61
4.5.1	การเปลี่ยนแปลงความชื้นในเวลาต่าง ๆ .....	61
4.5.2	พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง .....	62
4.5.3	ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง .....	62
4.6	ประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด .....	66
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	68
5.1	สรุปผลการทดลอง .....	68
5.1.1	สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	68
5.1.2	ทดสอบการเดินระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก .....	68

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

5.1.3	ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล .....	69
5.1.4	ศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	69
5.1.5	ศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน .....	69
5.1.6	ศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อน จากไอเสียเครื่องยนต์.....	70
5.1.7	ประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด .....	70
5.2	การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์ .....	71
5.3	ข้อเสนอแนะ .....	71
	รายการอ้างอิง .....	72
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ .....	75
	ภาคผนวก ข. ผลการทดลองและข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ .....	82
	ภาคผนวก ค. ตัวอย่างการคำนวณ .....	101
	ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	110
	ประวัติผู้เขียน .....	128

## สารบัญตาราง

### ตารางที่ หน้า

4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	50
4.2 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	51
4.3 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	51
4.4 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบสารพิษแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	52
4.5 องค์ประกอบของแก๊สชีวมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีวมวล .....	54
4.6 ผลการแสดงผลประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน .....	56
4.7 พลังงานที่เกิดขึ้น ในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า.....	57
4.8 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสีย ที่ภาระการทำงานต่าง ๆ.....	58
4.9 การคำนวณค่าความพลังงานที่ถ่ายเทกับน้ำหล่อเย็นที่ภาระการทำงานต่าง ๆ.....	59
4.10 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน .....	59
4.11 แสดงผลทดสอบการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสีย.....	63
4.12 ผลการประเมินประสิทธิภาพรวมของคันแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	67
ข1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบแก๊สชีวมวลที่ภาระงานต่าง ๆ.....	83
ข2 ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลพลังงานภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	84
ข3 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสสับความชื้นที่ 1 .....	86
ข4 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสสับความชื้นที่ 2 .....	88
ข5 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างแห้งมันสำปะหลังสับความชื้นที่ 1 .....	90
ข6 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างแห้งมันสำปะหลังสับความชื้นที่ 2 .....	92
ข7 สมบัติทางความร้อนของน้ำ .....	94
ข8 คุณสมบัติของแก๊สฮีเลียม ที่อุณหภูมิใด ๆ.....	96
ข9 คุณสมบัติของแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิใด ๆ .....	97
ข10 คุณสมบัติของแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิใด ๆ .....	97
ข11 คุณสมบัติของแก๊สแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิใด ๆ .....	98
ข12 คุณสมบัติของแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิใด ๆ.....	98
ข13 คุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิใด ๆ .....	99

## สารบัญตาราง (ต่อ)

## ตารางที่ หน้า

ค1	สัดส่วนทางเคมีของแก๊สชีวมวล .....	107
ค2	สัดส่วนของแก๊สต่าง ๆ ในไอเสีย.....	108
ค3	การหาค่าความจุความร้อน .....	109

## สารบัญรูป

### รูปที่ หน้า

2.1	ปฏิกิริยาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง .....	6
2.2	แผนผังกระบวนการผลิตแก๊สของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี .....	12
2.3	ส่วนประกอบสำคัญต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี ฯ.....	13
2.4	สมดุลพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์แก๊สชีวมวล .....	18
2.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น .....	23
2.6	เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว.....	25
2.7	เครื่องแห้งแบบพาหะลม (Flash Dryer) .....	26
2.8	ด้านข้างของ Disk Dryers .....	27
2.9	ด้านข้างของ Cascade Dryer.....	28
2.10	Superheat Steam Dryer.....	29
2.11	Batch Dryer .....	30
3.1	เครื่องสับและคัดแยกที่ใช้เตรียมเชื้อเพลิง .....	31
3.2	เชื้อเพลิงชีวมวลหลังจากการลดขนาดและคัดแยก เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการอบแห้ง .....	32
3.3	แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา .....	34
3.4	ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าชีวมวล .....	36
3.5	ขั้นตอนการศึกษานำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบแห้ง .....	37
3.6	เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล .....	39
3.7	แสดงตำแหน่งการเก็บข้อมูลหาสถานะเดินระบบ .....	42
3.8	การวิเคราะห์พลังงานที่ออกจากเครื่องยนต์ .....	44
3.9	ตำแหน่งเครื่องอบแห้งต่อเข้ากับท่อไอเสียของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	47
3.10	ตำแหน่งการวางตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องอบแห้งแบบกระบะ .....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

### รูปที่ หน้า

4.1	กราฟแสดงสัดส่วนเฉลี่ยโดยปริมาตรของแก๊สชีวมวล .....	57
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และกำลังการผลิตไฟฟ้า .....	59
4.3	กราฟแสดงประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน ที่ภาระงานต่าง ๆ .....	60
4.4	กราฟแสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า ร่วมกับพลังงานความร้อน .....	61
4.5	ศึกษาการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสีย เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า .....	63
4.6	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นไม้ยูคาดิบตัดสับขณะอบแห้ง ชั้นล่าง กลาง และบน .....	64
4.7	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเห้งน้ำมันสำปะหลังสับขณะอบแห้ง ชั้นล่าง กลาง และบน .....	65

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	=	ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า
APHA	=	American Public Health Association
ASTM	=	American Society of Testing and Material
C	=	ธาตุคาร์บอน (Carbon)
CO	=	แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbonmonoxide Gas)
CO <sub>2</sub>	=	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide Gas)
CH <sub>4</sub>	=	แก๊สมีเทน (Methane)
CV <sub>g</sub>	=	Calorific Value of Producer Gas
db	=	dry basis
EDXRF	=	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer
E <sub>blower</sub>	=	พลังงานที่ใช้ในการขับพัดลม
GC	=	Gas Chromatography
G <sub>C</sub>	=	Gas Composition (%V)
H	=	ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
H <sub>2</sub>	=	แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Gas)
H <sub>i</sub>	=	ค่าความร้อนแก๊สเชื้อเพลิง
HP	=	แรงม้า
HHV <sub>bio</sub>	=	High Heating Value of Biomass
HHV <sub>fuel</sub>	=	High Heating Value of Fuel
hr	=	ชั่วโมง
Hz	=	ความถี่
kg	=	กิโลกรัม
kVA	=	กิโลวัตต์แอมป์
kW	=	กิโลวัตต์
kWh	=	กิโลวัตต์-ชั่วโมง
L	=	ความยาว

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MC	=	ค่าความชื้น
MJ	=	เมกะจูล
$m_{\text{bio}}$	=	Biomass Consumption
$m_{\text{Fuel}}$	=	อัตราการใช้เชื้อเพลิง
$m_g$	=	อัตราการใช้แก๊สชีวมวล
$m_w$	=	ปริมาณน้ำที่ระเหย
N/A	=	Not Analysis
N	=	ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
$\text{Nm}^3$	=	Normal Cubic Metter
O	=	ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
$\text{O}_2$	=	แก๊สออกซิเจน (Oxygen Gas)
$P_e$	=	Electrical Power
PAC	=	Polymer Aluminum Chloride
PPM	=	Part Per Million
$Q_{\text{exhaust}}$	=	พลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่นำกลับมาใช้ได้
$Q_{\text{fuel}}$	=	พลังงานความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง
$Q_{\text{generator}}$	=	พลังงานในการผลิตไฟฟ้า
$Q_h$	=	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง
$R_c$	=	Constant Rate Drying
$R_f$	=	Falling Rate Drying
rpm	=	revolutions per minute
S	=	ธาตุซัลเฟอร์ (Sulphur)
$\text{Sfc}_{\text{CHP}}$	=	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน
$\text{sfc}_{\text{generator}}$	=	อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า
$\text{SO}_2$	=	แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur Dioxide)



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$V_g$	=	Gas Flow Rate
W	=	ความกว้าง
wb	=	wet basis
$W_f$	=	น้ำหนักของวัตถุดิบหลังอบแห้ง
$W_{in}$	=	น้ำหนักของวัตถุดิบก่อนอบแห้ง
$\bar{X}_E$	=	Equilibrium Moisture Content
$X_i$	=	สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สชีวมวล
$\eta_{all}$	=	Overall Efficiency
$\eta_{gas}$	=	Gasification Efficiency
$\eta_{electrical}$	=	Electrical Efficiency
$\eta_{generator}$	=	Engine-generator Efficiency
$\eta_{heating}$	=	ศักยภาพการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์
$\eta_{heat\ recovery}$	=	Heat recovery Efficiency
$\eta_t$	=	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นที่สนใจและได้รับการยอมรับว่าเป็นพลังงานหมุนเวียน ที่ช่วยลดการปลดปล่อย CO<sub>2</sub> และแก๊สเรือนกระจก

จากผลการศึกษาในปี พ.ศ. 2537 (Yodoyard et al., 1997) พบว่ามีปริมาณการปล่อยแก๊ส CO<sub>2</sub> จากการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจาก Distilled Oil Natural Gas Fuel Oil และ Lignite จำนวนรวมทั้งสิ้น 42.42 ล้านตัน ซึ่งแก๊ส CO<sub>2</sub> เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Green House Effect) ส่งผลให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ดีปัญหาที่สำคัญของการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิงจึงทำให้เชื้อเพลิงราคาสูงขึ้น เช่น การสูงขึ้นของราคาถ่านหินเนื่องจากตันละ 250 บาท เป็น 1,200 บาท ทำให้ในปัจจุบันโรงไฟฟ้าชีวมวลประสบปัญหาเดือดร้อน ส่งผลให้โรงไฟฟ้าชีวมวลโครงการขนาดใหญ่เกิดขึ้นได้ยาก

จากปัญหาที่เกิดขึ้นทำให้ภาครัฐมีนโยบายสนับสนุนให้มีผู้ประกอบการโรงไฟฟ้ารายย่อย (Very Small Power Plant) ขึ้นมาโดยส่งเสริมให้มีโรงผลิตไฟฟ้าหมุนเวียนขนาดเล็ก มีเป้าหมายเพื่อให้มีการใช้เชื้อเพลิงในท้องถิ่นที่กระจายอยู่ตามชุมชนต่าง ๆ มาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลในชุมชนที่มีอยู่ในไร่ นา สวนเกษตรต่าง ๆ มีลักษณะแตกต่างกันไปทั้งขนาดและความชื้นตามพื้นที่การเพาะปลูก

จากการศึกษาด้านแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 100 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2551) พบว่าโรงไฟฟ้าชีวมวลดังกล่าวสามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลได้เกือบทุกชนิด อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าวจะต้องมีขนาดและความชื้นที่เหมาะสมก่อน คือ เชื้อเพลิงที่นำมาใช้ควรมีขนาดอยู่ในช่วง 40 W x 40 L x 60 H mm<sup>3</sup> และมีความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เกิน 15%wb โดยมีขั้นตอน การลดขนาดเชื้อเพลิง โดยส่วนใหญ่จะใช้เครื่องสับย่อยเชื้อเพลิงชีวมวลและการลดความชื้นของเชื้อเพลิง โดยปกติจะลดความชื้นด้วยวิธีตากแดด (Sun Drying) จะใช้เวลานานและใช้พื้นที่มากในการเตรียมวัตถุดิบและในช่วงฤดูมรสุมจะมีอุปสรรคมากในการเตรียมจึงได้มีศึกษาเครื่องอบแห้งมาใช้ในการลดความชื้น ข้อดีของการลดความชื้นด้วยเครื่องอบแห้งคือ ช่วยประหยัดเวลาและเป็นการลดพื้นที่ในการเตรียมเชื้อเพลิง

สายสวาท กุลวัฒนาพร มาลี นำใจหนึ่ง และ กนกพร เนียมศรี (2549) ได้ทำการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานอย่างน้อย 12 ชั่วโมง และใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง สามารถทำลายแมลงได้ทุกกระยะ การเจริญเติบโต ซึ่งเป็นผลดีเมื่อเชื้อเพลิงที่ได้จากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแล้ว เช่น ไม้โตเร็ว เหง้ามันสำปะหลัง จะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเชื้อเพลิงให้คงสภาพการ ใช้งานที่สมบูรณ์

เมื่อพิจารณาระบบการผลิตไฟฟ้าของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย 3 ระบบหลัก คือ (1) ระบบเตาผลิตแก๊สชีวมวล (2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (3) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งใช้ต้นกำลังจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะเห็นว่าการปลดปล่อยพลังงานความร้อนที่ออกมาสู่บรรยากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่มีการปลดปล่อยความร้อนออกมา สามส่วน คือ ส่วนแรกพลังงานความร้อนที่ออกมากับการระบายความร้อนหม้อน้ำของเครื่องยนต์ ส่วนที่สอง พลังงานความร้อนที่ระบายออกสู่บรรยากาศทางไอเสียของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า และส่วนที่สามเป็นพลังงานความร้อนที่สูงสูญเสียไปกับส่วนอื่น ๆ เช่น ผนังเครื่องยนต์ น้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น

ทิพย์สุภินทร์ หินชูช ปภัส ชนะโรด และ วีรชัย อัจหาญ (2551) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน พบว่าในส่วน ของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิสูงในช่วง 550-600 องศาเซลเซียส และมีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ เช่น นำไปใช้เป็นแหล่ง ความร้อนในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลควบคู่ไปกับการผลิตไฟฟ้า เพื่อทดแทนแหล่งพลังงาน ความร้อนต่าง ๆ เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือฟอสซิล เป็นการนำพลังงานความร้อน ที่สูญเสียไปในกระบวนการทำงานของเครื่องยนต์นำกลับมาใช้ใหม่ เป็นทางเลือกที่ดีในกระบวนการอบแห้ง และเป็นการลดต้นทุนการเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลได้อีกด้วย

ในการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนใน เครื่องยนต์ที่สภาวะการทำงานต่าง ๆ และศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจาก ไอเสียของเครื่องยนต์ ผลิตกระแสไฟฟ้า มาใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยอาศัยต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด เล็ก ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จาก งานวิจัยครั้งนี้ จะทำให้ทราบถึงภาวะที่เหมาะสมในการนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้ในการอบแห้ง เชื้อเพลิงชีวมวล และใช้พลังงานให้ได้ประโยชน์มากที่สุด เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าโดยนำมาผลิตความร้อนร่วมกับผลิตไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยนำมาผลิตความร้อนร่วมกับผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อน (Heat Rejection Rate) ของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้ามาใช้ในการลดความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวล

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การศึกษานี้จะใช้ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลเล็กสำหรับชุมชนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิด Downdraft Gasification ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์โดยเชื้อเพลิงในการเดินระบบผลิตกระแสไฟฟ้า คือ ไม้ยูคาลิปตัสสับ โดยใช้เครื่องยนต์กำเนิดไฟฟ้าขนาด 100 กิโลวัตต์ ยี่ห้อ Sheng Dong รุ่น 100GF-RFM ที่ความเร็วรอบคงที่ 1000 rpm ผลิตไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz

1.3.2 ศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากแก๊สไอเสียเครื่องยนต์ที่ภาระงาน 80 กิโลวัตต์มาใช้ในการลดความชื้นเชื้อเพลิง คือ เหง้ามันสำปะหลังสับและ ไม้ยูคาลิปตัสสับโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบอกขนาดถังอบ 3.2 ลูกบาศก์เมตร โดยใช้พัดลมขนาด 2.2 กิโลวัตต์ (3 HP) อัตราการไหลลมร้อนประมาณ 69 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ลมที่ทางเข้าจะผ่านถังผสมอากาศซึ่งมีความจุประมาณ 2.3 ลูกบาศก์เมตร เพื่อปรับลดอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าพัดลม โดยควบคุมอุณหภูมิทางเข้าเครื่องอบแห้งที่ 130 องศาเซลเซียส  $\pm$  5 องศาเซลเซียส

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถนำข้อมูลในการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์สันดาปภายในไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งหรือใช้ร่วมกับงานอื่น ๆ

1.4.2 จากข้อมูลการอบแห้งโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์สามารถนำข้อมูลเพื่อใช้ในการออกแบบหรือพัฒนาเครื่องอบแห้งให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## บทที่ 2

### ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้า การใช้แก๊สเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สมดุลพลังงานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์มาใช้ประโยชน์ การอบแห้งโดยกล่าวถึงเรื่องหลักการอบแห้ง การอบแห้งไม้ ประเภทของเครื่องอบแห้ง ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.2 ประวัติโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน “สุรนารี”

โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนเริ่มก่อสร้างในเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2548 โดยความร่วมมือของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบริษัท ซาตาเคะ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศญี่ปุ่น มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาระบบการผลิตไฟฟ้าจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยอาศัยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาวิจัยและเผยแพร่ไปสู่ชุมชน โดยดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2549 ซึ่งเป็นปีมหามงคลที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช มหาราช ทรงครองราชย์สมบัติ ครบ 60 ปี ซึ่งพระองค์ทรงเปรียบเสมือนพระบิดาแห่งการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ ตามหลัก “เศรษฐกิจพอเพียง” ที่มีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ชีวมวล) ที่มีอยู่ในพื้นที่ มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าหมุนเวียนก่อให้เกิดการพึ่งพาตนเองในด้านพลังงานของชุมชน

ในปีมหามงคลนั่นเอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับพระบรมราชานุญาตให้ใช้ชื่อโรงไฟฟ้าชีวมวลเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี โดยได้รับพระมหากรุณาธิคุณจากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนินเป็นองค์ประธานในพิธีเปิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2549

โรงไฟฟ้าชีวมวล “สุรนารี” นี้มีกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ เป็นโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กใช้เทคโนโลยี Biomass Gasification ชนิด Open Top Downdraft Gasification โดยทำการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบนเตาเผาชีวมวล ที่ใช้หลักการเผาไหม้ที่ควบคุมปริมาณอากาศ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ เชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นของแข็งจะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สที่มีองค์ประกอบสำคัญ คือ แก๊ส

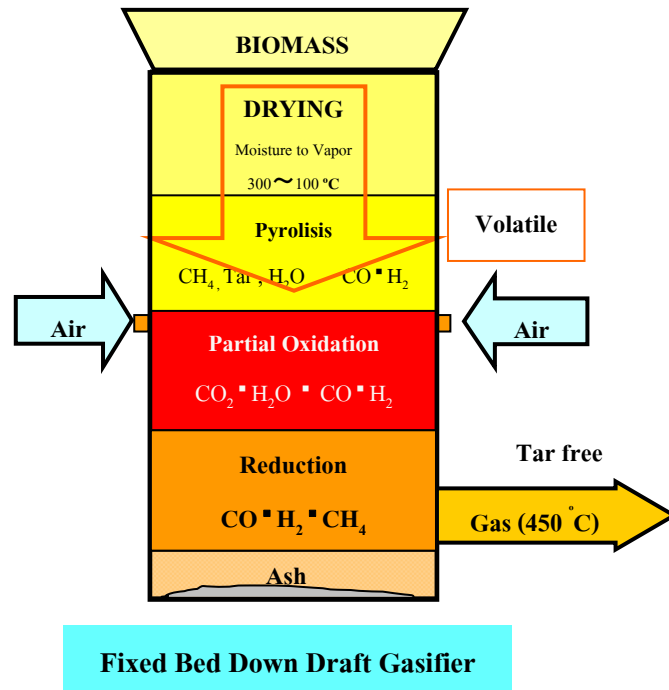
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) 18-22% แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) 18-20% และแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) 1-2% มีค่าความร้อนเฉลี่ย 4.5-5.5 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมหรือแก๊สธรรมชาติได้ โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทำความสะอาดอย่างเหนียวและฝุ่น (Tar and Dust) และลดอุณหภูมิแล้ว จะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่เป็นต้นกำลังผลิตกระแสไฟฟ้าได้

สามารถใช้ได้กับเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (ชีวมวล) ได้ทุกเกือบประเภท เช่น เศษไม้ทางและทะเลสาบปาล์ม แกลบ กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง และอื่น ๆ จึงเหมาะสมกับทุกภาคของประเทศไทย

### 2.2.1 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน

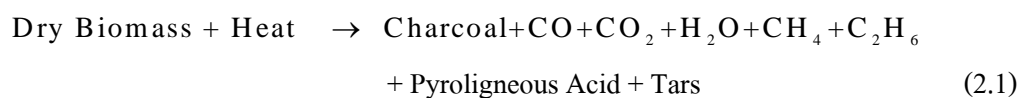
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติด และมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical Reaction) ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบไปด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) และแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) ซึ่งสถานะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าว คือ สถานะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือเป็นสถานะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจนเพราะหากมีแก๊สออกซิเจนเพียงพอหรือมากเกินไปจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Combustion) และมีการปลดปล่อย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ออกมาซึ่งไม่คิดไฟ

วีรชัย อัจฉาญ และคณะ (2551) ได้อธิบายว่าในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถแบ่งโซนการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซน ดังแสดงใน รูปที่ 2.1 โดย โซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาอุณหเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในเตาผลิตแก๊สชนิดไหลลง  
(ที่มา: วีรชัย ออาจหาญ และคณะ, 2551)

- 1) Drying Zone ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่ทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส
- 2) Pyrolysis หรือ Distillation Zone รับความร้อนจากโซน Reduction ทำให้สารระเหยที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500 องศาเซลเซียส ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านกระบวนการนี้ คือ คาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้ ดังสมการที่ (2.1)



3) CombustionหรือOxidation Zone เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอน และไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.3)



ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.2) และ (2.3) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซน Reduction และโซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500 องศาเซลเซียส

4) Reduction Zone แก๊สร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction ในโซนนี้จะมีอุณหภูมิระหว่าง 500-900 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิด มีเทน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ ไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.8)





ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.4) เรียกว่า Boundouard Reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (2.5) เรียกว่า Water Gas Reduction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีววมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ใน โชนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีววมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีววมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีววมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีววมวลมีค่าต่ำ

แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิใน โชน Reduction สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100 องศาเซลเซียส จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของ โชน Reduction

ในขณะที่แก๊สร้อนจาก โชน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่ โชน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.6) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีววมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (แก๊สไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน) แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (2.7) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีววมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction แก๊สไฮโดรเจนบางส่วน จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (2.8) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production

## 2.2.2 ส่วนประกอบของระบบ

ต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วนคือ (1) ระบบเตาผลิตแก๊สชีวมวล (2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส (3) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ และการจัดวางระบบ ดังแสดงใน รูปที่ 2.2 และ 2.3

### 1) เตาผลิตแก๊สชีวมวล

เตาผลิตแก๊สชีวมวล เป็นแบบชนิด Open Top Downdraft Gasifier ภายนอก ทำจากวัสดุโลหะม้วนกลม ภายในบุด้วยฉนวนกันความร้อนทำจากวัสดุทนความร้อนทำหน้าที่เก็บรักษาอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และลดการสูญเสียความร้อน ด้านบนของเตาประกอบด้วย Hopper Feeder รับเชื้อเพลิงชีวมวล และฝาปิดที่ซีลด้วยน้ำ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศเข้าเตาขณะ Shut Down ระบบ ด้านข้างของเตาจะมีทางเข้าของอากาศหลายส่วนเพื่อป้อนอากาศและควบคุมอากาศเข้าสู่เตาสำหรับใช้ในการเผาไหม้ ด้านล่างของเตามีระบบลำเลียงขี้เถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ ออกจากเตา สามารถควบคุมระยะเวลาการลำเลียงขี้เถ้าออกได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ก)

### 2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส

#### ■ Cyclone Collector

เป็นอุปกรณ์แยกฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊สใช้หลักการดักฝุ่นด้วยแรงหนีศูนย์กลางทำให้เกิดแก๊สหมุนวน (Vortex) จากนั้นฝุ่นหรืออนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของ Cyclone Collector ส่วนแก๊สจะหมุนวนอยู่ด้านบนแล้วไหลไปตามท่อออกไปสู่ระบบ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ซึ่งเป็นส่วนประกอบ ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ข)

#### ■ Water Scrubber and Chiller Scrubber

เป็นอุปกรณ์ดักฝุ่นหรืออนุภาคออกจากแก๊ส โดยใช้ละอองของน้ำ ส่วน Chiller Scrubber เป็นอุปกรณ์ดักยางเหนียวและฝุ่นโดยใช้น้ำเย็นซึ่งไอระเหยของยางเหนียวจะ Condense ลงมาพร้อมกับน้ำแล้วไหลลงไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย ลักษณะของ Water Scrubber และ Chiller Scrubber ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ค)

#### ■ ระบบบำบัดน้ำเสีย (Closed-loop Wastewater Treatment)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้เป็นระบบปิด โดยจะหมุนเวียนน้ำที่มาจาก Scrubber แล้วบำบัดโดยใช้วิธีทางเคมี (Chemical Treatment) โดยใช้หลักการการก่อตัวของตะกอนหรือที่เรียกว่า โคแอกกูเลชัน (Coagulation) ซึ่งจะใช้สารเร่งการรวมตัวของตะกอน (Coagulant) คือ (Polymer Aluminum Chloride, PAC) ร่วมกับสารเคมีที่ช่วยในกระบวนการเพื่อให้อนุภาคของตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น ระบบบำบัดน้ำเสียมีส่วนประกอบ คือ

- Flocculation Tank ทำหน้าที่เป็นถังบำบัดน้ำที่ผ่าน Water Scrubber และ Chiller Scrubber เนื่องจากน้ำที่นำไปใช้จะทำหน้าที่ดักฝุ่นหรือยางเหนียวออกจากแก๊สจะไหลกลับลงสู่ถังบำบัดอีกครั้ง จากนั้นน้ำจะถูกส่งไปยัง Flocculation Tank และบำบัดน้ำโดยวิธีทางเคมี (Chemical Treatment) ทำให้ฝุ่นหรืออนุภาคจับตัวกันเป็นก้อนเรียกว่า ตะกอน ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถนำไปตากแห้งแล้วนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อีกครั้ง สำหรับน้ำส่วนที่ใสจะนำกลับไปใช้หมุนเวียนในระบบต่อไป ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ง)

- Buffer Tank เป็นถังเก็บน้ำ/พักน้ำเสีย โดยน้ำเสียที่มาจาก Water Scrubber และ Chiller Scrubber จะถูกดูดดึงกลับมาเก็บไว้ที่ถังรวบรวมน้ำเสีย (Water Tank A) และจะถูกดึงไปบำบัดใน Flocculation Tank และผ่านกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 โดยใช้การกรองด้วย ถ่านคาร์บอน (Active Carbon) ก่อนจะรวบรวมไหลกลับมาถัง (Water Tank B) เพื่อนำกลับไปใช้กับระบบทำความสะอาดแก๊สต่อไป สำหรับน้ำเสียส่วนที่ตกตะกอน จะบำบัดโดยผ่านตะแกรง (Screen) แล้วรวบรวมไปเก็บไว้ในถังรวบรวมน้ำเสีย (Water Tank C) เพื่อนำกลับไปบำบัดอีกครั้ง หนึ่ง ลักษณะของ Buffer Tank ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (จ)

- Biomass Filter Unit  
ทำหน้าที่ดักความชื้น ฝุ่น และอนุภาคอื่น ๆ โดยใช้ไม้ที่สับแล้ว ขนาดเล็กเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่ถูกทำความสะอาดจากระบบ Scrubber นั้นยังมีความชื้นสูง และมีละอองไอน้ำมันดินเหลืออยู่ หน่วยบำบัดนี้จะช่วยยืดอายุการใช้งานของถุงกรองใน Bag Filter Unit ได้ ลักษณะของ Biomass Filter Unit ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ฉ)

- Bag Filter Unit  
ทำหน้าที่ดักฝุ่นหรืออนุภาค และความชื้นครั้งสุดท้ายหลังจากผ่านกระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยฝุ่นหรืออนุภาคที่ผ่านเข้ามาจะถูกจับไว้รวมกันเป็นแผ่นของฝุ่นหรืออนุภาคที่ผิวหน้าของถุงกรองซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากถึง 0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้แก๊สที่สะอาดสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ซ)

### 3) ระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

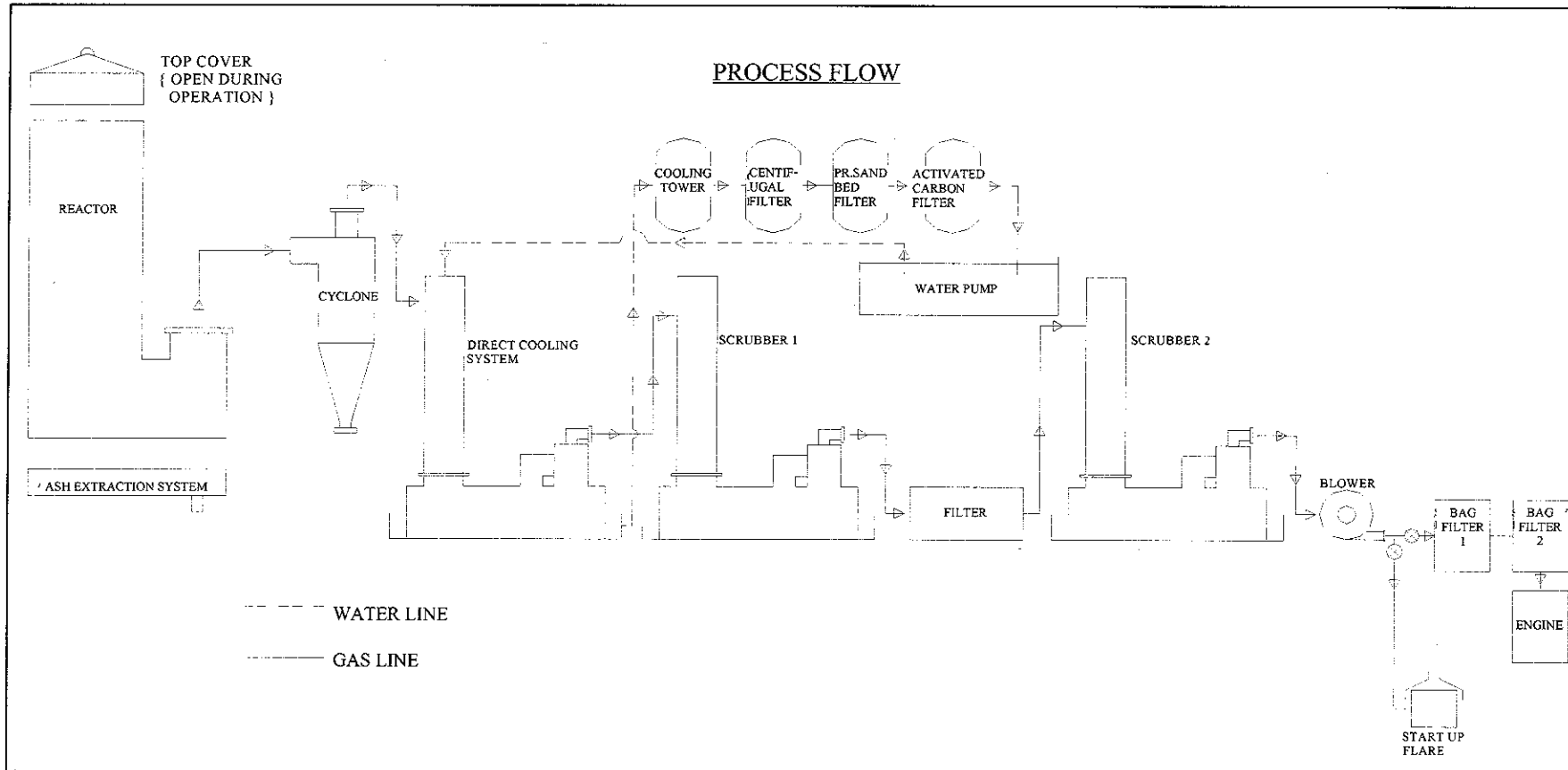
- Start Up Flare  
ทำหน้าที่ทดสอบการลุกไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (Producer Gas) และระบายแก๊สออกจากระบบกรณีฉุกเฉิน Start Up Flare จะติดตั้งไว้ในระบบก่อนทางเข้าเครื่องยนต์ ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ซ)

- Engine-generator Set

เป็นชุดเครื่องยนต์ใช้เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้มาจากการเผาไหม้ภายในเตาผลิตแก๊สชีวมวล แล้วผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการเป็นเชื้อเพลิง แล้วนำกำลังที่ได้จากเครื่องยนต์ไปขับ Generator เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา โดยต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กนี้ได้ติดตั้งชุดเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ายี่ห้อ Sheng Dong: 4 สูบ 150 kVA ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ฎ)

- Control System

ประกอบไปด้วยผู้ควบคุมการทำงานของเตาผลิตแก๊สชีวมวล (Biomass Power Plant Control) ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ฉ) และผู้ควบคุมการไหลของแก๊สชีวมวลที่เข้าเครื่องยนต์ (Biomass Gas Control) ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (ญ)



รูปที่ 2.2 แผนผังกระบวนการผลิตแก๊สของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก. เตาผลิตแก๊สชีววมวล



ข. Cyclone Collector



ค. Water Scrubber and Chiller Scrubber



ง. Flocculation Tank

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบสำคัญต่างๆ ของโรงไฟฟ้าชีววมวลสุรนารี ๑



จ. Buffer Tank



ฉ. Biomass Filter Unit



ช. Bag Filter Unit



ซ. Start Up Flare

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบสำคัญต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี ฯ (ต่อ)



ณ. Biomass Power Plant Control



ญ. Biomass Gas Control



ฎ. Gas-engine Generator Set

รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบสำคัญต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี ฯ (ต่อ)

### 2.3 การใช้แก๊สเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้า โดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน

การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) จะต้องปรับปรุงลักษณะของเครื่องยนต์เพื่อที่จะทำให้เครื่องยนต์นั้น เหมาะสมกับการใช้แก๊สเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และสามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกันกับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน โดยทั่วไป การใช้แก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี (สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย, 2546)



### 2.3.1 การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาใช้ร่วมกับแก๊สเชื้อเพลิง

หรือเรียกอีกอย่างว่า เครื่องยนต์เชื้อเพลิงคู่ (Gas-Diesel Engine หรือ Dual-Fuel Engine) โดยใช้แก๊สเชื้อเพลิงผสมกับอากาศเป็นไอดีเข้าห้องเผาไหม้ ส่วนการจุดระเบิดยังใช้น้ำมันดีเซลฉีดเข้าห้องเผาไหม้ วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องการใช้น้ำมันดีเซลเพื่อการจุดระเบิดประมาณ 10-20% ของการใช้เครื่องยนต์ดีเซลปกติ ดังนั้นทำให้ประหยัดน้ำมันดีเซลได้ 80-90% และไม่ต้องมีการดัดแปลงลักษณะการทำงานเครื่องยนต์ดีเซลแต่อย่างใด

### 2.3.2 การนำเครื่องยนต์ดีเซลมาดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิง

เพื่อใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง (Gas-Otto Engine) โดยเปลี่ยนระบบการจุดระเบิดจากเดิมเป็นการจุดระเบิด โดยการอัดเปลี่ยนมาเป็นการจุดระเบิดด้วยประกายไฟจากหัวเทียน วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการดัดแปลง โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนการอัด (Compression Ratio) ให้ได้ 10-12 และเพิ่มอุปกรณ์ผสมอากาศกับแก๊สเชื้อเพลิงหรือคาร์บูเรเตอร์ (Carburetor) และหัวเทียนเข้าไป ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก

### 2.3.3 การนำเครื่องยนต์แก๊สโซลีนมาใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง

วิธีการแบบนี้เครื่องยนต์ต้องได้รับการออกแบบให้มีอัตราส่วนการอัดให้ได้ 10-12 และมีระบบผสมแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศจากโรงงานผู้ผลิตเครื่องยนต์ ซึ่งเครื่องยนต์ประเภทนี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาสูงกว่าเครื่องยนต์ในหัวข้อที่ 2.3.2 ประมาณ 2 เท่า

สำหรับการใช้เครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า สามารถนำเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิงมาต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ

#### 1) ไดนาโม (Generator)

วิธีนี้จะต้องมีอุปกรณ์หรือวงจรควบคุมความเร็วรอบของการทำงานให้คงที่ เพื่อให้แรงดันและความถี่ทางไฟฟ้าที่ผลิตออกมามีความคงที่ ซึ่งถ้าหากแรงดันและความถี่ไม่มีความคงที่ หากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่อใช้งานจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

#### 2) มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

วิธีนี้จะใช้หลักการที่ว่า เมื่อเครื่องยนต์หมุนด้วยความเร็วรอบมากกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ของมอเตอร์ มอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นไดนาโม ข้อดีของวิธีนี้คือ ระบบผลิตไฟฟ้านี้สามารถต่อพ่วงเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าฯ ได้ทันที โดยระบบจะผลิตเฉพาะกระแสไฟฟ้า ส่วนแรงดันและความถี่จะใช้ของการไฟฟ้าฯ ทำให้ไม่เกิดผลเปลี่ยนแปลงต่อแรงดันและความถี่ ซึ่งหากนำอุปกรณ์ทางไฟฟ้ามาต่อใช้งานจะไม่ทำให้อุปกรณ์เสียหายแต่อย่างใด การนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาต่อพ่วงกับเครื่องยนต์แก๊สเชื้อเพลิง จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของ

ขนาดมอเตอร์และเครื่องยนต์เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมอเตอร์จะต้องมีความเร็วรอบและแรงบิดใกล้เคียงกับแรงบิดสูงสุดของเครื่องยนต์

## 2.4 สมดุลพลังงานในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

จากการสมดุลพลังงานในเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า เครื่องยนต์แก๊สชีวมวล สามารถหาได้จากการทดลองเดินระบบผลิตไฟฟ้า แก๊สชีวมวลจะถูกผสมกับอากาศเพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์ในจังหวะจุด โดยอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและแก๊สชีวมวลสามารถปรับได้โดยใช้วาล์วควบคุม จากสมดุลพลังงานของเครื่องยนต์พบว่า พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สชีวมวล ( $Q_{\text{fuel}}$ ) มีค่าเท่ากับ ผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ( $Q_{\text{electrical}}$ ) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็น ( $Q_{\text{coolant}}$ ) พลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่ ( $Q_{\text{exhaust}}$ ) และพลังงานความร้อนที่สูญเสีย ( $Q_{\text{loss}}$ ) ดังแสดงใน รูปที่ 2.4 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่ (2.9) ถึง (2.13) ได้ดังนี้

$$Q_{\text{fuel}} = Q_{\text{electrical}} + Q_{\text{coolant}} + Q_{\text{exhaust}} + Q_{\text{loss}} \quad (2.9)$$

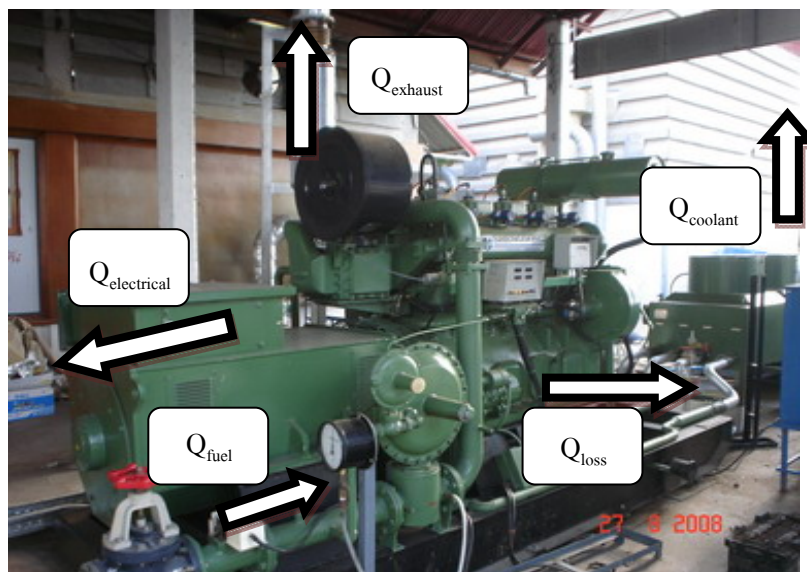
$$Q_{\text{fuel}} = V_g CV_g \quad (2.10)$$

$$Q_{\text{generator}} = \sqrt{3}VI\cos\phi \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{coolant}} = \dot{m}_c C_{p_w} (T_{c_{\text{out}}} - T_{c_{\text{in}}}) \quad (2.12)$$

$$Q_{\text{exhaust}} = \dot{m}_{\text{ex}} C_{p_{\text{ex}}} (T_{\text{ex}_{\text{out}}} - T_{\text{ex}_{\text{in}}}) \quad (2.13)$$

โดยที่  $CV_g$  คือ ค่าความร้อนแก๊สชีวมวล  $V_g$   $\dot{m}_c$  และ  $\dot{m}_{\text{ex}}$  คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล น้ำหล่อเย็น และแก๊สไอเสีย ตามลำดับ  $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสาย  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าในแต่ละสาย  $\cos\phi$  คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์ทางไฟฟ้า  $C_{p_w}$   $C_{p_{\text{ex}}}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.18 kJ/kg°C และ ความจุความร้อนของแก๊สไอเสียที่อุณหภูมิไอเสียนั้น ๆ  $T_{c_{\text{in}}}$   $T_{c_{\text{out}}}$   $T_{\text{ex}_{\text{in}}}$  และ  $T_{\text{ex}_{\text{out}}}$  คือ อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าเครื่องยนต์ น้ำด้านออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 สมดุลพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์แก๊สชีวมวล

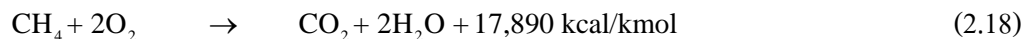
## 2.5 การหาค่าความจุความร้อนในไอเสีย

การหาค่าความจุความร้อนของไอเสียเป็นสิ่งสำคัญในการหาพลังงานความร้อนที่ออกมาจากไอเสีย โดยเราต้องทราบเกี่ยวกับทฤษฎีการเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน เพื่อที่จะทราบสัดส่วนของแก๊สไอเสียเพื่อที่จะนำไปคำนวณค่าความจุความร้อนซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.5.1 ทฤษฎีการเผาไหม้

การเผาไหม้ หมายถึง ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิง (ส่วนใหญ่เป็นธาตุองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอน) กับออกซิเจน และปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา การเผาไหม้ที่สมบูรณ์หรือการเผาไหม้ที่ดี คือ การเผาไหม้ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นแล้วสามารถให้ปริมาณความร้อนเท่ากับค่าความร้อน (Calorific Value) ของเชื้อเพลิง ดังสมการที่ (2.14) ถึง (2.18)



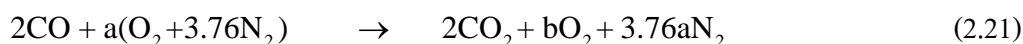
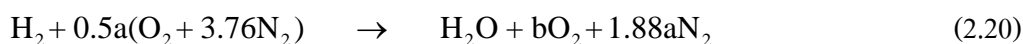
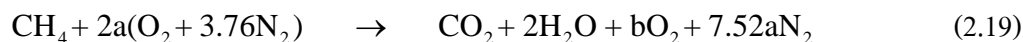


### 2.5.2 การหาค่าความจุความร้อนของไอเสีย

ตามสมการที่ (2.14) ถึง (2.18) จะเห็นว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น การถ่ายเทความร้อนให้แก่ น้ำผลิตเป็นไอน้ำหรือสร้างแรงดันในกระบอกสูบในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งยังมีส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ถูกใช้งาน จะถูกปลดปล่อยออกมาที่ปล่องหรือท่อไอเสีย

ปรีชา ศิริชาญ (2544) จากการเผาไหม้โดยทฤษฎีแล้ว การเผาไหม้ในเครื่องยนต์สันดาปภายในจะเป็นการเผาไหม้แบบปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air) ซึ่งเมื่อพิจารณาแก๊สชีวมวล ซึ่งมีองค์ประกอบของ  $\text{CO}$   $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$

การหาค่าความจุความร้อนของแก๊สไอเสีย จะเป็นผลรวมของความจุความร้อนของแก๊สไอเสียแต่ละตัว ตามสมการการเผาไหม้ที่ (2.19) ถึง (2.21)



เมื่อ

A คือ ปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air)

B คือ ปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen)

โดยที่ความจุความร้อนของไอเสียรวมสามารถหาได้จากผลรวมของค่าความร้อนแก๊สในไอเสีย ดังสมการที่ (2.22) (ณรงค์ฤทธิ์ มุลเจริญ, 2548)

$$C_{\text{Pex}} = \frac{\sum(Y_i M_i C_{P,i})}{M_{\text{mix}}} \quad (2.22)$$

เมื่อ

$Y_i$	คือ	เศษส่วนโดยโมลของแก๊สแต่ละชนิด
$M_i$	คือ	มวลโมเลกุลของแก๊สแต่ละชนิด
$M_{mix}$	คือ	น้ำหนักรวมของแก๊สต่าง ๆ ในไอเสีย (kg)
$C_{p,i}$	คือ	ค่าความจุความร้อนของแก๊สแต่ละชนิดที่สภาวะอุณหภูมินั้น ๆ (kJ/kg °C)

## 2.6 การนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์มาใช้ประโยชน์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์สันดาปภายในมาใช้ประโยชน์สามารถสรุปได้ดังนี้

กฤษฎา กิมเส็ง (2534) ได้ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมจากเครื่องยนต์ใช้แก๊สชีวภาพ โดยใช้เครื่องยนต์แก๊สโซลีนผลิตกระแสไฟฟ้า 20 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1750, 2000, 2250, 2500 และ 2750 รอบต่อนาที พบว่า ถ้าไม่มีการดึงความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์มาใช้ประสิทธิภาพรวมอยู่ระหว่าง 20-39% แต่ถ้ามีการดึงความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์มาใช้โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อนประสิทธิภาพรวมจะอยู่ระหว่าง 24-43%

พยุงค์ศักดิ์ จุลยุเสน และ วีรชัย อัจหาญ (2551) กล่าวว่า ประมาณ 75% ของพลังงานเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพจะถูกปลดปล่อยเป็นความร้อนเหลือทิ้ง (Waste Heat) ดังนั้น จึงควรมีการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์กลับมาใช้ประโยชน์ เช่น อุ่นบ่อหมักแก๊สชีวภาพ ต้มน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในฟาร์ม เป็นต้น เนื่องจากแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มีความร้อนเหลือทิ้งในปริมาณมาก ซึ่งเหมาะสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำหล่อเย็นมีค่อนข้างน้อย โดยอุณหภูมิของแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มีค่าประมาณ 315-600 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีค่าประมาณ 60-120 องศาเซลเซียส

ณรงค์ฤทธิ์ มูลเจริญ (2548) ประเมินความคุ้มค่าและความเหมาะสมของการนำเอาความร้อนทิ้งจากไอเสีย จากกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพในฟาร์มสุกรมาใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเก็บคืนความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ผลการศึกษาพบว่ากรณีที่ไม่มีการเก็บคืนความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ระบบผลิตไฟฟ้าแก๊สชีวภาพจะมีประสิทธิภาพเพียง 16.9% แต่ในกรณีที่มีการเก็บคืนความร้อน ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้นเป็น 24.8%

ณัฐริชา มะโน (2548) ศึกษาศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้แก๊สชีวภาพจากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม ผลการศึกษาทำให้ทราบว่า การนำแก๊ส

ชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงให้ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมโดยใช้เครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ จะให้ผลตอบแทนการลงทุนที่ดีที่สุด

CADDET (1998) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์สันดาปภายในของโรงงานผลิตสิ่งทอ โดยการใช้ไอเสียจากเครื่องยนต์โดยตรงและความร้อนจากระบบระบายความร้อนใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษาพบว่า ในกรณีที่ไม่นำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพเพียง 38.3% และในกรณีนำเอาความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 67.1%

## 2.7 การอบแห้ง

### 2.7.1 หลักการอบแห้ง

การลดความชื้น โดยปกติมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมใช้กับวัสดุทางการเกษตร คือ เชื้อเพลิงชีวมวล จะใช้วิธีการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยทั่วไปจะอาศัยความร้อนจากภายนอก ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุที่อยู่ผิวและเนื้อวัสดุระเหยออกมา ดังสมการที่ (2.23) ทั้งนี้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งจะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (Drying Time) จากความชื้นเริ่มต้นไปสู่ความชื้นที่ต้องการ

$$q_T = h_v A(T_v - T_i) = h_c A(T_v - T_i) + h_r A(T_v - T_i) + u_k A(T_v - T_i) \quad (2.23)$$

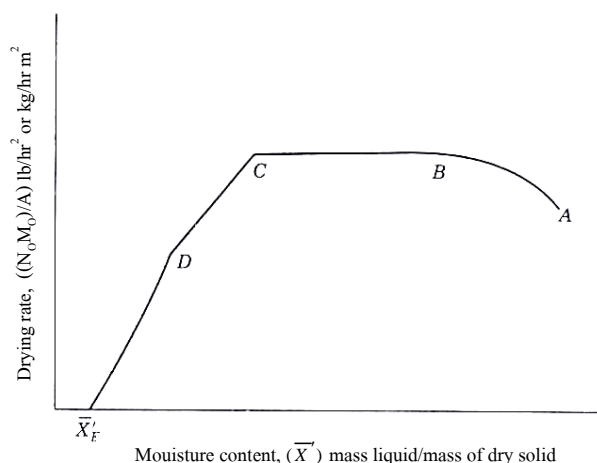
เมื่อ

$h_c$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนจากอากาศร้อนสู่ผิววัสดุ
$h_r$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี ระหว่างวัสดุกับผนังของห้องอบ
$u_k$	คือ	สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของการอบโดยการพา และการนำความร้อนผ่านชั้นวัสดุผิวหน้าซึ่งมีภาระเหຍ
$T_v$	คือ	อุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้ง
$T_i$	คือ	อุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและวัสดุ

ความชื้นเริ่มต้น (Moisture Content) สามารถระบุได้ทั้งเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นเปียก (Wet Basis; %wb) และเปอร์เซ็นต์ความชื้นแห้ง (Dry Basis; %db) ซึ่งใช้ฐานในการเปรียบเทียบแตกต่างกัน Wet Basis หมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักรวมของวัสดุ ส่วน Dry Basis เป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักแห้งของวัสดุเท่านั้น ในการใช้คำนวณและออกแบบ การอบแห้งนิยมใช้ Dry Basis เป็นมาตรฐาน

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้ง คือ สมบัติและประเภทของความชื้นของวัสดุ โดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบไปด้วยความชื้นรอบผิว (Adsorbed Moisture) และความชื้นในเนื้อวัสดุ (Absorbed Moisture) ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่าย นอกจากนี้ ยังมีความชื้นของบรรยากาศ (Relative Humidity) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใด ๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความชื้นอากาศที่ซอบ โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีก แม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content;  $\bar{X}_E$ )

อัตราการอบ (Drying Rate) เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่ง ที่สามารถบอกให้เราทราบถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึง ค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา ดังแสดงใน รูปที่ 2.5 โดยปกติแล้วในการอบแห้งวัสดุหนึ่ง ๆ จะมีอัตราการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง คือ ก) Constant Rate Drying ( $R_C$ ) คือ การอบแห้งในช่วงที่มีอัตราการระเหยน้ำต่อพื้นที่ เป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นเหลือเพื่อ ความชื้นจึงเดินทางมาสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่ถ่ายจากลมร้อนมาที่ผิว ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นรอบผิวหรือความชื้นอิสระ (Unbound Moisture) โดยมีรายละเอียด ดังแสดงใน รูปที่ 2.5 ช่วง B-C และ ข) Falling Rate Drying ( $R_F$ ) คือ การอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลง เมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาที่จะลด ในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และค่า  $R_F$  อาจแปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ช่วง C-D วัสดุบางประเภทอาจมีแต่ Falling Rate ตลอดการอบเลยก็ได้ ทั้งนี้การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงถึงจุดความชื้นสมดุล;  $\bar{X}_E$



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

## 2.7.2 การอบแห้งไม้

สำหรับการการอบแห้งไม้จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติของไม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความชื้นใน ไม้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ (Skaar, 1998) คือ

1. Liquid Water (Free Water) เป็นน้ำที่อยู่ภายในเซลล์ของไม้
2. Bound Water เป็นน้ำที่อยู่บริเวณผนังของเซลล์
3. Water Vapor

ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบไม้จะมีอยู่ 2 แบบ คือ การอบที่อุณหภูมิต่ำและการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง

### การอบแห้งไม้ที่อุณหภูมิต่ำ

การอบแห้งวิธีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการปรับปรุงคุณภาพไม้ สามารถนำมาใช้เป็นฐานความรู้และความเข้าใจในการอบแห้งไม้กรณีนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ทั้งนี้ในการอบแห้งไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ อัตราการอบแห้งแบบคงที่และอัตราการอบแห้งลดลง คล้ายกับการอบแห้งวัสดุเกษตร โดยทั่วไป

- 1) ช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (Constant Drying Rate Period)

ช่วงนี้จะไม่ค่อยเกิดขึ้นกับไม้เนื้อแข็ง แต่จะเกิดขึ้นกับไม้เนื้ออ่อนพอสมควร ช่วงการเกิดขึ้นนี้ไม้จะถูกเปิดขึ้น ผลคือความดันไอน้ำที่ผิววัสดุจะมีค่าเท่ากับความดันไอน้ำภายในห้องอบ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิววัสดุอย่างเดียว

ความร้อนและไอน้ำถูกถ่ายเทเข้าออกบริเวณผิววัสดุ ความร้อนที่ถูกพาเข้าไปภายในจะทำการเปลี่ยนน้ำในวัสดุออกมาเป็นไอน้ำและในช่วงนี้อัตราการอบแห้งจะคงที่ ซึ่งค่านี้



จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายนอก(อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และทิศทางการไหลของลม) อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิภายในเครื่องอบ อย่างไรก็ตามในขณะนี้จะไม่มีการถ่ายเทความร้อนให้กับภายในของวัสดุ

น้ำที่ผิววัสดุถูกออกจากภายในวัสดุโดยถูกขับออกมา โดยปฏิกิริยาแคปิลลารี (Capillary Action) คือ น้ำจะถูกเคลื่อนย้ายจากความชื้นสูงไปสู่ความชื้นต่ำ ช่วงอัตราการอบแห้งครั้งที่นี้ จะเกิดขึ้นนานเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ถูกถ่ายเทออกมา

## 2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Decreasing Drying Rate Period)

ในช่วงนี้ความดันไอน้ำในวัสดุจะลดลงกว่าความดันไอน้ำในเครื่องอบทำให้ปริมาณไอน้ำออกสู่ด้านนอกน้อยลงและปริมาณความร้อนที่ใส่เข้าไปในวัสดุจะมากกว่าความต้องการที่ใช้ในการระเหยน้ำ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเกินความจำเป็น จะถูกถ่ายเทให้กับผิววัสดุและแพร่เข้าไปในเนื้อวัสดุ ในการทำสมดุลพลังงานจะทำให้อุณหภูมิผิววัสดุเพิ่มขึ้นและความชื้นของวัสดุลดลงในที่นี้บ่งบอกได้ว่าในช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

### การอบแห้งไม้ที่อุณหภูมิสูง

การอบแห้งแบบนี้เป็นการลดเวลาในการอบแห้งมากกว่าการอบที่อุณหภูมิต่ำ โดยไม่มีการสูญเสียคุณภาพของวัสดุที่อบแห้ง โดยที่สภาวะการอบแห้งจะต้องใช้อุณหภูมิที่มากกว่าจุดเดือดของน้ำ ซึ่งทำให้ความดันภายในวัสดุสูงมากกว่าปกติ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure Gradient) จะช่วยในการขับเคลื่อนความชื้น ออกสู่ภายนอกของวัสดุ (Lowery, 1979; Kamke and Casey, 1988)

โดยทั่วไปที่ความดัน 1 บรรยากาศ จุดเดือดของน้ำจะมีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส ฉะนั้น เพื่อที่จะทำให้ความดันภายในวัสดุสูงขึ้น อุณหภูมิที่แทรกซึมเข้าไปในวัสดุก็น่าจะมีค่ามากกว่าจุดเดือดของน้ำปกติ โดยมีการใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้ง จากข้อมูลในประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบไม้ Pine สำหรับใช้ในงานก่อสร้างจะต้องทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส ต้องการลมร้อนที่จะนำความชื้นออกจากไม้ในเตาอบ คือ ถ้าวอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ต้องใช้ลมร้อน 5-6 m/s และอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ต้องใช้ลมร้อน 7-9 m/s (Pang S., and A.N., Haslett., n.d.)

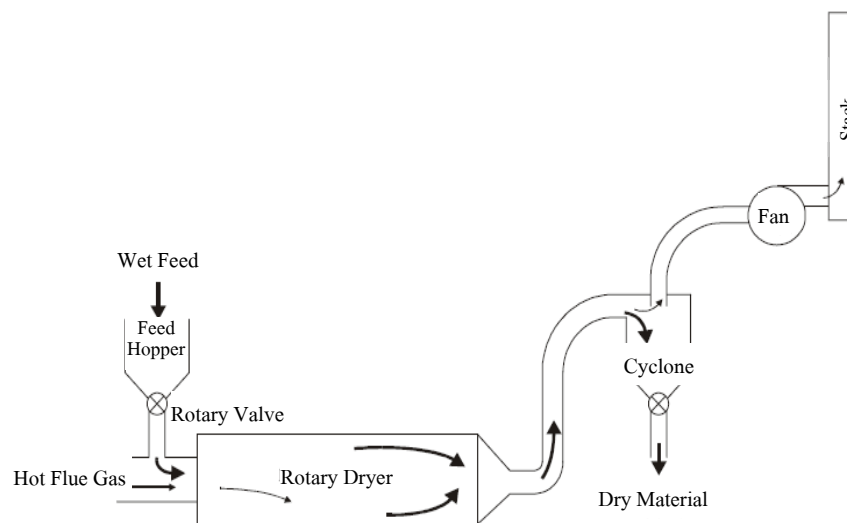
### 2.7.3 ชนิดของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล มีอยู่หลายประเภทจำแนกตามวิธีการและชนิดของถังอบแห้ง ได้ 6 ประเภท (Wade A., Amos, 1998) คือ

1) เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary Dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลายชนิดแต่นิยมใช้สำหรับอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีลักษณะเป็นแบบช่องเดี่ยวที่รับสัมผัสความร้อนโดยตรง ดังแสดงใน รูปที่ 2.6 โดยหลักการ ทำงานจะใช้ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุที่อบโดยตรงภายในตัวถังที่หมุน การหมุนของตัวถังทรงกระบอก จะอาศัยใบพัดช่วยโรยวัสดุอบผ่านอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการลดความชื้น ท่อลมร้อน จะต่อตรงเข้าไปในเครื่องอบแห้งโดยตรงและอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งหัวเผาหรือเครื่องทำความร้อน

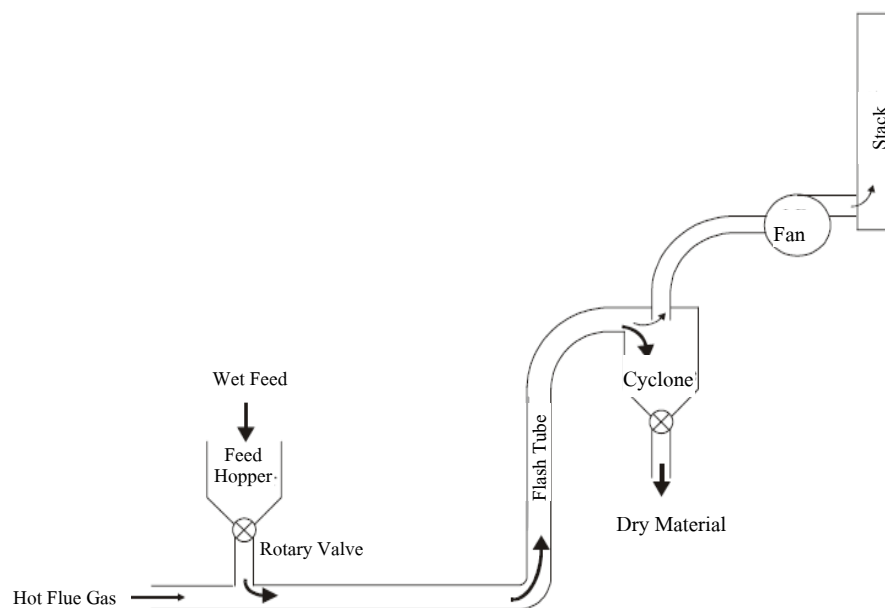
เครื่องอบแห้งแบบโรตารีโดยทั่วไป วัสดุที่อบแห้งและลมร้อนจะไหลทิศทาง ขนานกัน โดยลมร้อนที่สุดจะสัมผัสกับวัสดุอบที่มีความชื้นสูงที่สุด แต่สำหรับวัสดุอบแห้งที่ อุณหภูมิไม่มีผลกระทบต่อวัสดุ ลมร้อนกับวัสดุจะไหลในทิศสวนทางกัน คือ วัสดุอบที่แห้งที่สุดจะ ปะทะลมร้อนที่ร้อนที่สุดและมีความชื้นน้อยที่สุด ในสุดท้ายวัสดุอบที่มีความชื้นน้อยก็จะออกจาก เครื่องอบแห้ง แต่อาจจะมีการลุกไหม้เกิดขึ้น หากวัสดุอบที่แห้งแล้วเจอกับลมร้อนที่อุณหภูมิสูง เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความหนาแน่นปานกลาง เช่น ไม้สับ เหง้ามันสำปะหลังสับ และทางปาล์มสับ



รูปที่ 2.6 เครื่องอบแห้งโรตารี (Rotary Dryer) แบบช่องเดี่ยว

## 2) เครื่องอบแห้งแบบพาดล (Flash Dryers)

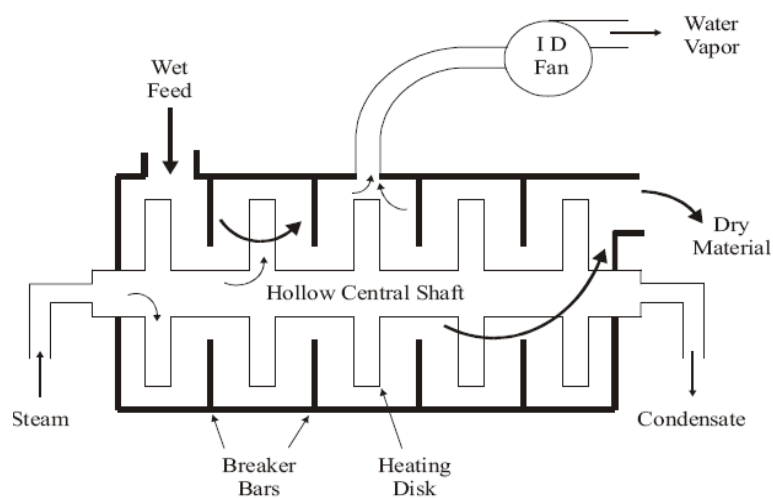
เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลักการทำงาน คือ วัสดุอบจะถูกผสมกับลมร้อนที่มีความเร็วสูง การสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดกันของวัสดุอบกับลมร้อนจะทำให้เกิดการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว วัสดุอบและลมร้อนจะถูกแยกออกโดยใช้ไซโคลน ดังแสดงใน รูปที่ 2.7 ในกรณีที่ต้องการปล่อยลมร้อนออกสู่บรรยากาศจะต้องทำการดักฝุ่นละเอียดออกอีกครั้งโดยใช้ Water Scrubber ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบพาดล (Flash Dryer) คือ ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นเครื่องอบแห้งขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบโรตารี อย่างไรก็ตามอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าจะสูงเพราะใช้ปริมาณลมร้อนที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัด คือ วัสดุอบจะต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา หรือความหนาแน่นต่ำ และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เครื่องอบประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ทะลายปาล์มสับ และชานอ้อย



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งแบบพาดล (Flash Dryer)

### 3) Disk Dryers

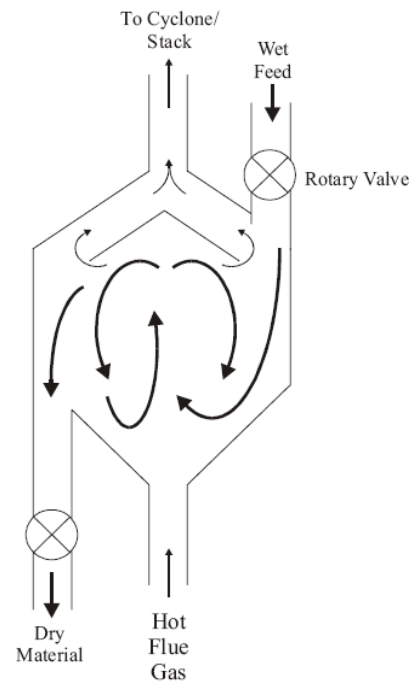
เครื่องอบชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีการเคลื่อนตัวต่ำภายในเครื่องอบ วัสดุอบจะถูกทำให้ร้อนโดยไอน้ำจะเข้าไปในเพลากลาง ซึ่งมีงานที่มีรูติดอยู่เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน โดยมีส่วนที่ยื่นออกมา (Finger) เพื่อช่วยผสมวัสดุและช่วยเก็บสะสมความร้อน เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้งานได้ในสถานะสุญญากาศหรือแรงดันต่ำได้ ส่วนไอน้ำที่ควบแน่นจากการอบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และนำกลับไปสู่หม้อต้ม (Boiler) ได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2.8 เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นโคลน เช่น Sludge ต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 ด้านข้างของ Disk Dryers

### 4) Cascade Dryers (เครื่องอบแห้งแบบโรยตัว)

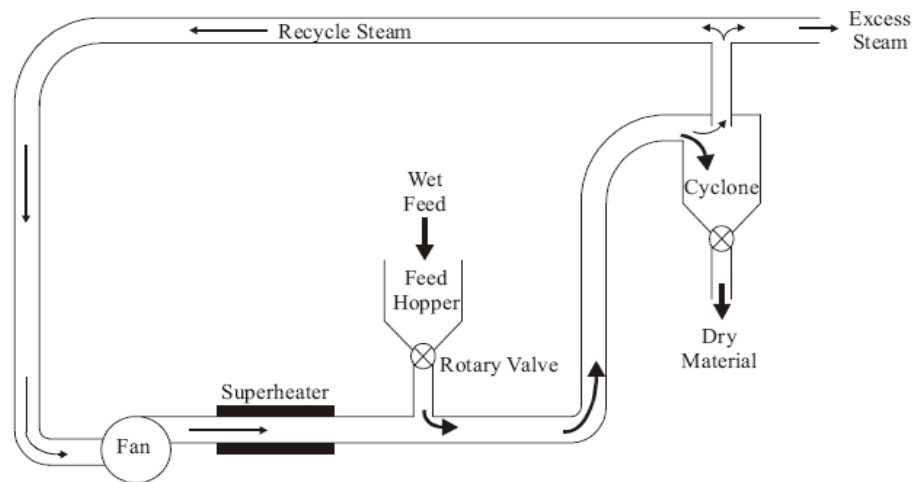
เครื่องอบแห้งชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช แต่เราสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอบที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลได้ หลักการทำงานของเครื่องอบนี้คือ วัสดุอบจะถูกนำเข้าสู่ถัง จะถูกโรยตัวเข้าไปในห้องอบ และลอยตัวโดยลมร้อนจะหมุนเวียนในห้องอบแห้ง ดังแสดงใน รูปที่ 2.9 เมื่อความชื้นลดลงจะทำให้น้ำหนักวัสดุอบเบาลงจะถูกเป่าให้เคลื่อนที่ออกไปทางด้านช่องเปิดด้านข้างของถังอบ โดยทั่วไปวัสดุจะใช้เวลาอยู่ในถังอบประมาณ 2 นาที เครื่องอบแห้งแบบโรยตัวนี้เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีน้ำหนักเบา และสามารถลอยตัวในอากาศได้เหมือนกับเครื่องอบแบบพาหะลม



รูปที่ 2.9 ด้านข้างของ Cascade Dryer

#### 5) Superheat Steam Dryer

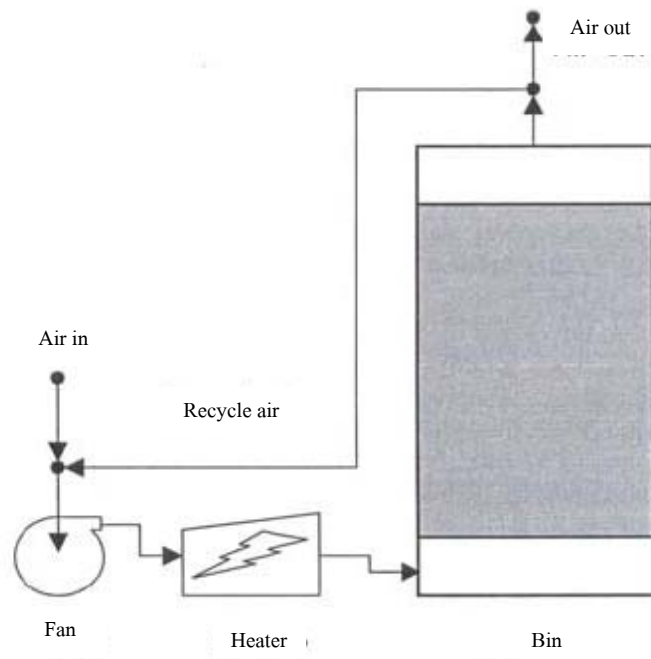
เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานคล้าย ๆ กับ Flash Dryers แต่จะใช้ไอน้ำแทนลมร้อน ดังแสดงใน รูปที่ 2.10 หลักการทำงานคือ จะใช้ไอน้ำมาเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวด มาถึงความชื้นออกจากวัสดุอบแห้ง ซึ่งไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำอิ่มตัว สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการอบแห้งได้อีกประมาณ 90% ขณะที่อีก 10% จะถูกระบายทิ้งหรือเอาไปใช้ในส่วนของโรงงานได้



รูปที่ 2.10 Superheat Steam Dryer

6) Batch Dryer (เครื่องอบแห้งแบบกระบะ)

กระบวนการอบแห้งของเครื่องแห้งแบบกระบะอาศัยหลักการเดินทางของลมร้อนผ่านวัสดุซึ่งอยู่กับที่ โดยการไหลของลมร้อนจะมีทั้งแบบไหลตั้งฉากกับวางของวัสดุไหลขนานไปกับการวางตัวของวัสดุ และไหลสวนทางกับการวางตัวของวัสดุซึ่งประสิทธิภาพในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุที่ใส่ลงไป ในกระบะถ้าใส่วัสดุมากจนเกินไปลมร้อนก็ไม่สามารถที่ลดความชื้นวัสดุได้แห้งเท่ากัน โดยต้องอาศัยการพลิกกลับของวัสดุ เครื่องถึงจะมีประสิทธิภาพสูงซึ่งลมร้อนจะไหลออกสู่บรรยากาศหรือสามารถนำกลับมาใช้อีกได้ เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุชีวมวลเกือบทุกชนิดและเป็นเครื่องอบแห้งที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ดังแสดงใน รูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 Batch Dryer

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงเชื้อเพลิงชีวมวล การเตรียมเชื้อเพลิง เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย ซึ่งสามารถแยกเป็น 4 ส่วน คือ การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ การทดสอบประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าชีวมวล การศึกษาความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า และการทดสอบการนำความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียมาใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล มีรายละเอียดอุปกรณ์และการดำเนินวิจัยดังนี้

#### 3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษานี้ จะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการทดสอบ 2 แบบ คือ

1) เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเดินระบบผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน คือ ยูคาลิปตัสสับ ทำการเตรียมเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องสับและเครื่องคัดขนาด ดังแสดงใน รูปที่ 3.1 และเชื้อเพลิงมีความชื้นไม่เกิน 15%wb

2) เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดสอบเดินระบบการอบแห้งโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า คือ ไม้ยูคาลิปตัสสับและแห้งมันสำปะหลังสับ เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการอบแห้ง ดังแสดงใน รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่องสับและคัดแยกที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิง





ก. ไม้ยูคาลิปตัสตัดสับ



ข. เหง้ามันสำปะหลังสับ

รูปที่ 3.2 เชื้อเพลิงชีวมวลหลังจากการลดขนาดและคัดแยกเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการอบแห้ง

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1) โรงงานต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันชนิด Downdraft Gasification ขนาดกำลังการผลิต 100 กิโลวัตต์ โดยต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ (1) ชุดเตาผลิตแก๊สชีวมวล (2) ระบบทำความสะอาดแก๊ส และ (3) เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ก)

2) ชุดเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ยี่ห้อ Sheng Dong รุ่น 100 GF-PJ รอบการทำงานคงที่ที่ 1000 rpm กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 100 กิโลวัตต์ ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ข)

3) เครื่องอบแห้งแบบกระบอกพร้อมถังผสมอากาศ โดยเครื่องอบแห้งในการทดสอบนี้เป็นเครื่องอบแบบกระบอก (อบแห้งลำไย) ของกลุ่มงานวิจัยหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม มีรายละเอียด คือ มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง (2310 mm. x 231 mm. x 600 mm.) หรือความจุสูงสุดประมาณ 3.2 ลูกบาศก์เมตร ต้นกำลังพัดลมขนาด 2.2 กิโลวัตต์ ปริมาณลมร้อน 3007 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ส่วนถังผสมอากาศจะผสมไอน้ำเข้ากับอากาศภายนอกโดยตรง มีความจุถังผสมอากาศ 2.3 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ค)

4) Gas Chromatography (GC) ยี่ห้อ SIMADSU GC-14B ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ง) ซึ่งมีสภาวะที่ใช้ของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Packing Material	:	Polapacked Q : Molecular Sieve
Column Temperature	:	50 องศาเซลเซียส : 50 องศาเซลเซียส
Injector Temperature	:	80 องศาเซลเซียส : 80 องศาเซลเซียส
Detector Temperature	:	100 องศาเซลเซียส : 100 องศาเซลเซียส
Carrier Gas	:	Helium Gas
Carrier Gas Flow Rate	:	50 L/min. : 20 L/min.

5) เครื่อง Flue Gas Analyzer ยี่ห้อ Testo รุ่น 350XL ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (จ) ซึ่งมีพิสัยการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Temperature	:	-40 ถึง +1200 องศาเซลเซียส ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส
Velocity	:	0 ถึง 40 m/s ความละเอียด 0.1 m/s

6) Power Meter ยี่ห้อ Kyoritsu รุ่น 6300 ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ฉ) มีพิสัยการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Voltage Ranges	:	150/300/600 VAC คลาดเคลื่อน $\pm 0.3\%$
Current Ranges	:	50/100/200/500 AAC คลาดเคลื่อน $\pm 0.3\%$
Power Accuracy	:	$\pm 0.5\% \text{rdg} \pm 0.2\% \text{fs}$

7) Thermo-hygro Meter ยี่ห้อ Testo รุ่น 635 ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ช) มีพิสัยการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Temperature Ranges	:	-20 ถึง +70 องศาเซลเซียส ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส คลาดเคลื่อน $\pm 0.5\%$
Humidity Ranges	:	0 ถึง 100%RH คลาดเคลื่อน $\pm 2\%$

8) ตู้อบลมร้อน Hot Air Oven ยี่ห้อ WTB BINDER ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ซ) มีพิสัยการใช้งานของเครื่องมือ ดังต่อไปนี้

Temperature Ranges	:	5 ถึง 300 องศาเซลเซียส
Internal Dimension	:	31.5 in x 23.6 in x 19.7 in



ก. โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก



ข. เครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า



ค. เครื่องอบแห้งแบบกระบอกกับถังผสมอากาศ



ง. เครื่อง Gas Chromatography (GC)

รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา



จ. Flue Gas Analyzer



ฉ. Power Meter



ช. Thermo-hygro Meter

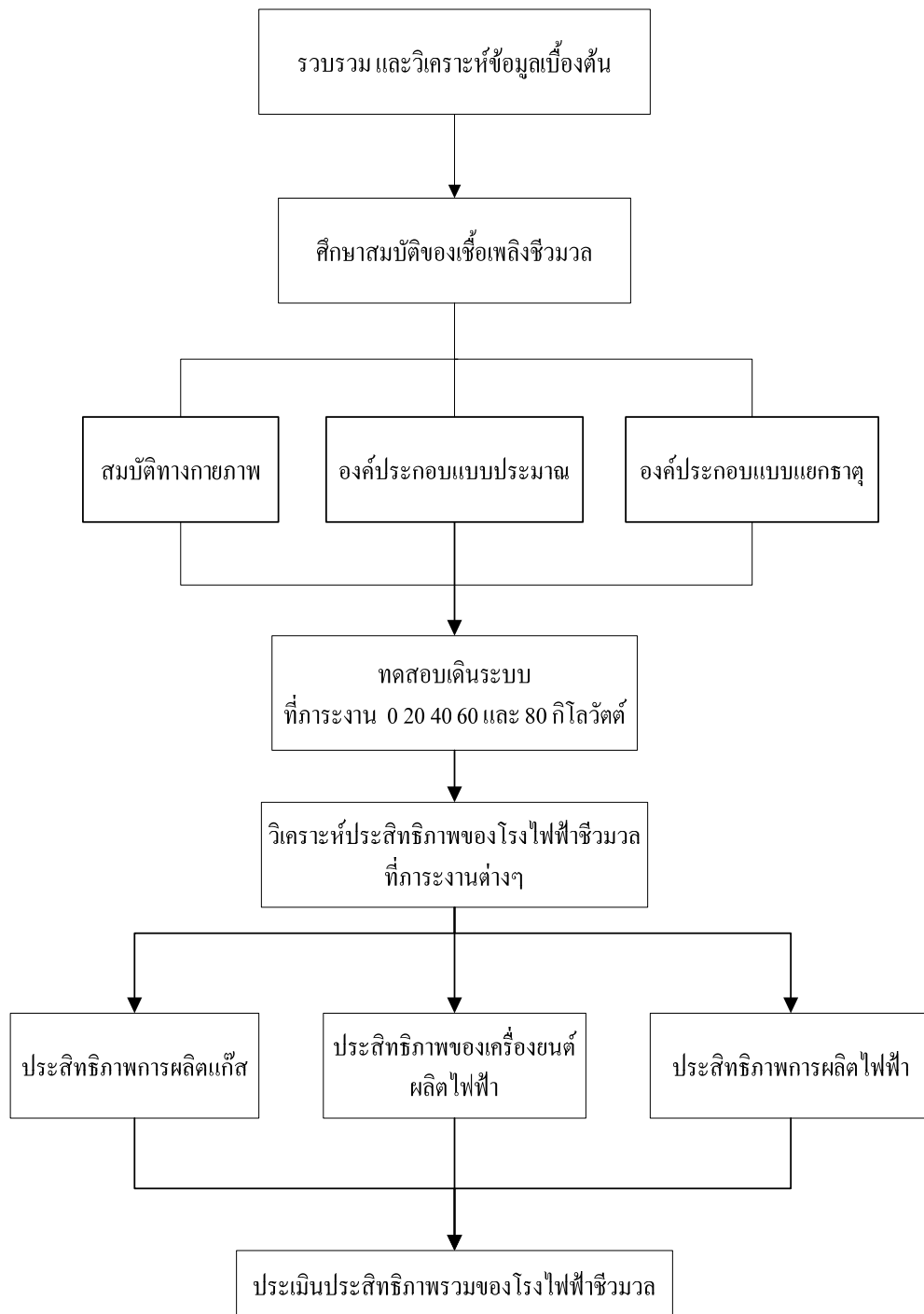


ซ. ตู้อบลมร้อน Hot Air Oven

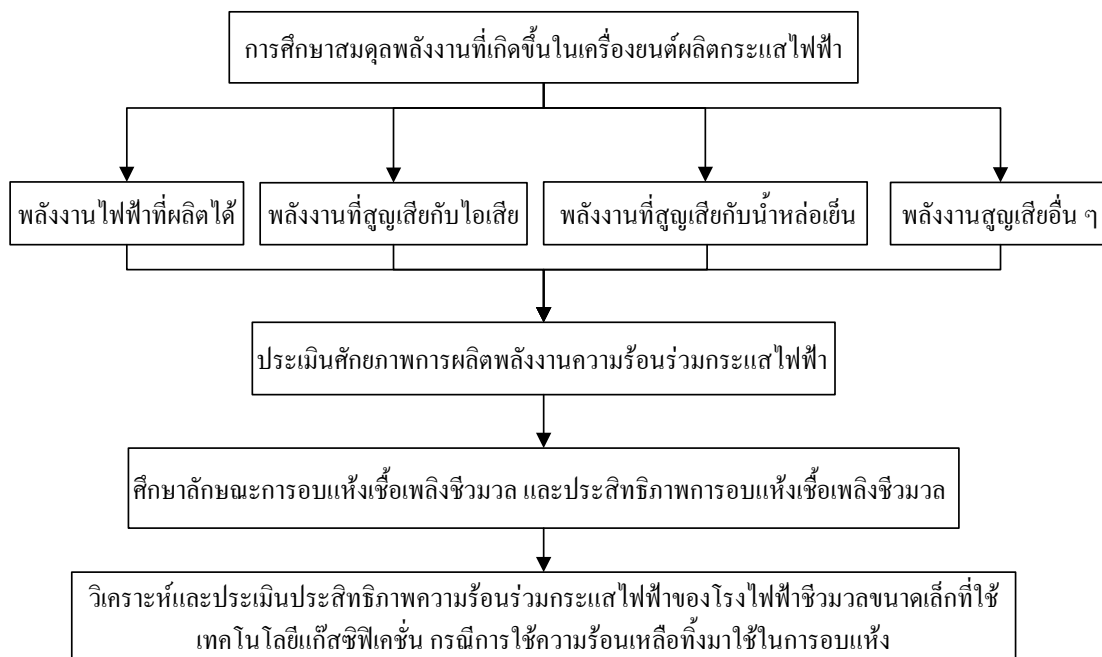
รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา (ต่อ)

### 3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล ประกอบด้วยขั้นตอน ดังแสดงใน รูปที่ 3.4 และ 3.5



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าชีวมวล



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบแห้ง

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย มีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.1 การรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ทำการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ เช่น การตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน ชนิดของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิง สมมูลพลังงานความร้อนในเครื่องยนต์สันดาปภายใน หลักการอบแห้งชนิดเครื่องอบแห้ง และงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์มาใช้ประโยชน์ ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

### 3.3.2 การศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

#### 1) สมบัติทางกายภาพ

ความชื้น มีความจำเป็นเพราะทำให้เราทราบว่า การนำเชื้อเพลิงมาใช้นั้นสามารถนำมาใช้ได้ทันทีหรือต้องมีการลดความชื้นให้ได้ตรงความต้องการอย่างน้อยเพียงใด โดยวิธีการวิเคราะห์ความชื้นจะคิดเป็นร้อยละมาตรฐานเปียก หรือ Wet Basis (ภาคผนวก ก.)

ความหนาแน่น เป็นสมบัติทางกายภาพทั่วไป ทำโดยการวัดค่ามวลต่อปริมาตรเชื้อเพลิงชีวมวล (ภาคผนวก ก.)

## 2) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis)

เพื่อหาองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาความสามารถในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

- ความชื้น (Moisture) คือ ร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งเป็นความชื้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยความร้อน โดยทั่วไปเรียกว่าร้อยละมาตรฐานแห้ง หรือ Dry Basis การวิเคราะห์โดยใช้มาตรฐาน ASTM D1762-84 (ภาคผนวก ก.)

- เถ้า (Ash) คือปริมาณของแข็งอนินทรีย์ที่คงเหลืออยู่ ภายหลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D1762-84 (ภาคผนวก ก.)

- ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) เพื่อหาองค์ประกอบที่สามารถระเหยได้ โดยให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงชีวมวล การวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D1762-84 (ภาคผนวก ก.)

- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) คือ ปริมาณองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนคงตัวที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลคำนวณจากร้อยละกับผลต่างระหว่างความชื้น เถ้า และปริมาณสารระเหย (By Difference)

- ค่าความร้อน (Heating Value) คือ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกขณะเผาไหม้ต่อหน่วยน้ำหนัก (MJ/kg) การวิเคราะห์ใช้มาตรฐาน ASTM D2015-77 (ภาคผนวก ก.)

## 3) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ภายในเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นจากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในการวิเคราะห์จะใช้เครื่อง CHNS Element Analyzer

## 4) การวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษ

เพื่อศึกษาองค์ประกอบของโลหะหนัก Cd Cu Pb Fe Zn และปริมาณธาตุ Cl ในตัวอย่าง เนื่องจากธาตุต่าง ๆ เหล่านี้จะถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งกำเนิดของมลพิษที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การวิเคราะห์องค์ประกอบนี้จะใช้เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF รุ่น ED 2000)

สำหรับเครื่องมือหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุและองค์ประกอบสารพิษของเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงใน รูปที่ 3.6





ก. เตาอบ Hot Air Oven  
(วิเคราะห์ความชื้น)



ข. เตาเผา Muffle Furnace  
(วิเคราะห์ปริมาณเถ้าและสารระเหย)



ค. เครื่อง Bomb Calorimeter  
(วิเคราะห์ค่าความร้อน)



ง. เครื่อง CHNS Elemental Analyzer  
(วิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S)

รูปที่ 3.6 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล





จ. เครื่องเตรียมตัวอย่างชีวมวล  
สำหรับนำไปวิเคราะห์กับเครื่อง EDXRF

ฉ. เครื่อง EDXRF  
(วิเคราะห์ปริมาณธาตุ Cd Cu Pb Fe Zn Cl)

รูปที่ 3.6 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล (ต่อ)

### 3.3.3 ทดสอบการเดินระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก

การศึกษานี้ มีจุดประสงค์เพื่อให้ทราบถึงสถานะในการเดินระบบผลิตกระแสไฟฟ้าระดับต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลของระบบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

#### 1) อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษา อัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่สถานะการผลิตไฟฟ้าที่ 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ เพื่อต้องการทราบ ปริมาณความต้องการเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจาก 0 กิโลวัตต์ จนถึงกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ 80 กิโลวัตต์ ซึ่งถือว่าเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ที่ 80% ของกำลังการผลิตสูงสุด (80% Maximum Load) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ กำหนดการเดินระบบเพื่อผลิตไฟฟ้า 80% ของกำลังการผลิตสูงสุด เนื่องจากเพื่อป้องกันปัญหาในการควบคุมให้สถานะของระบบทำงานคงที่ (เมื่อเดินระบบผลิตไฟฟ้าเกิน 80% ของกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุด ระบบผลิตไฟฟ้าจะทำงานไม่คงที่ ควบคุมได้ยาก) อีกทั้งเครื่องยนต์เดินระบบต่อเนื่องที่กำลังผลิตไฟฟ้าสูง ๆ อาจมีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ได้

#### 2) องค์ประกอบของแก๊สชีวมวล

เพื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล คือ  $\text{CO}$   $\text{H}_2$   $\text{CH}_4$   $\text{N}_2$  และ  $\text{CO}_2$  ในการศึกษานี้จะทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ ( $G_C$ ) ตำแหน่งการเก็บข้อมูล ดังแสดงใน รูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นแก๊สชีวมวลสะอาดเนื่องจากผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิ

ลดความชื้น และทำความสะอาดแล้ว พร้อมทั้งจะนำไปใช้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยเก็บตัวอย่างไว้ในอุปกรณ์บรรจุแก๊สชีวมวล แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สต่าง ๆ ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส (Gas Chromatography) ยี่ห้อ SIMADSU GC-14B ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ง)

จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบมาคำนวณค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล (Calorific Value of Producer Gas,  $CV_g$ ) โดยใช้ความสัมพันธ์ อ้างอิงตามงานวิจัยของ (Jain et al., 2002) ดังสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (3.1)$$

เมื่อ

$X_i$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรขององค์ประกอบแก๊สชีวมวล

$H_i$  คือ ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล ( $CO$   $H_2$   $CH_4$ )

โดยที่  $CO = 13.1 MJ/Nm^3$   $H_2 = 13.1 MJ/Nm^3$  และ  $CH_4 = 41.2 MJ/Nm^3$

3) อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Fuel Consumption)

การหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบ และคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยไฟฟ้า ซึ่งการวัดจะทำโดยชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ถูกเติมใส่ลงไปในเตาปฏิกรณ์โดยใช้ตาชั่ง โดยตำแหน่งการใส่เชื้อเพลิง ( $m_{bio}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 แล้วนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยซึ่งจะได้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง แล้วนำมาคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยไฟฟ้า (kg/kWh) หรืออัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) ดังสมการที่ (3.2)

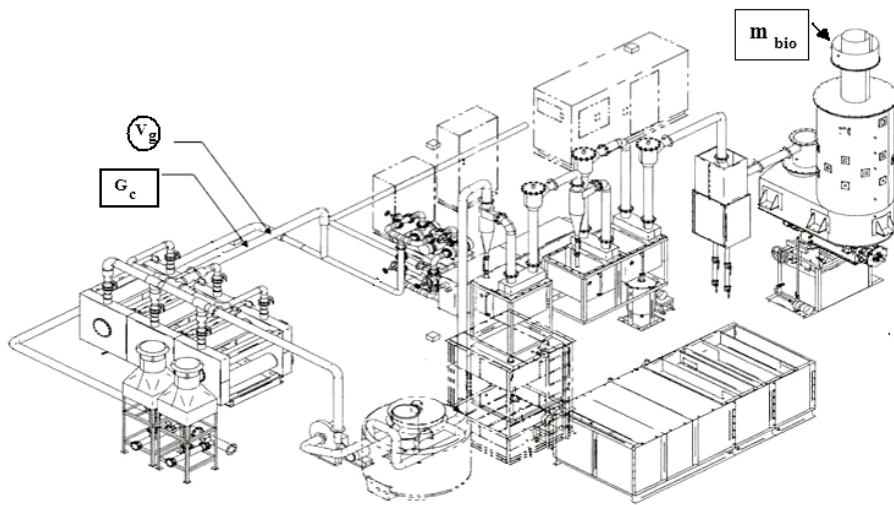
$$\text{Specific Fuel Consumption} = \frac{[\text{Fuel Consumption}]}{[\text{Electrical Power}]}$$

$$\text{Specific Fuel Consumption} = \frac{[m_{\text{Fuel}}/P_c]}{\quad} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$m_{\text{Fuel}}$  คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)

$P_c$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ หรือ Electric Power Output (kW)



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งการเก็บข้อมูลหาสถานะเดินระบบ

### 3.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาประสิทธิภาพโดย อ้างอิงตามงานวิจัยของ (Bhattacharya et al., 2001) ดังสมการที่ (3.3) ถึง (3.5)

#### 1) ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_{\text{gas}}) = \frac{[\text{Rate of Energy Carried by Producer Gas}]}{[\text{Rate of Energy Supplied to Reactor}]}$$

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_{\text{gas}}) = \frac{[V_g \times CV_g]}{[m_{\text{Fuel}} \times \text{HHV}_{\text{Fuel}}]} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$m_{\text{Fuel}}$	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)
$V_g$	คือ	อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )
$\text{HHV}_{\text{Fuel}}$	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (MJ/kg)
$CV_g$	คือ	ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล ( $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ )

## 2) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

$$\text{Electrical Efficiency } (\eta_{\text{electrical}}) = \frac{[\text{Energy equivalent of electrical power}]}{[\text{Rate of energy supplied to reactor}]}$$

$$\text{Electrical Efficiency } (\eta_{\text{electrical}}) = \frac{[3.6 \times P_e]}{[m_{\text{Fuel}} \times \text{HHV}_{\text{Fuel}}]} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$P_e$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ หรือ Electric Power Output (kW)

## 3) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency)

$$\text{Engine-generator Efficiency } (\eta_{\text{generator}}) = \frac{[\text{Energy equivalent of electric power}]}{[\text{Rate of energy supplied to engine}]}$$

$$\text{Engine-generator Efficiency } (\eta_{\text{generator}}) = \frac{[3.6 \times P_e]}{[V_g \times \text{CV}_g]} \quad (3.5)$$

## 3.3.5 การศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

ในการศึกษาในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์พลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าเพื่อนำข้อมูลไปหาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า โดยทำการเก็บข้อมูลการเดินระบบที่ภาระการผลิตไฟฟ้า 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ ตามลำดับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) พลังงานที่เข้าระบบ คือ การหาพลังงานของแก๊สชีวมวล โดยการเก็บตัวอย่างแก๊สเพื่อวิเคราะห์หา องค์ประกอบแก๊สโดยเครื่อง Gas Chromatography และเก็บข้อมูลปริมาณการไหลของแก๊สชีวมวล ( $V_g$ ) ที่ภาระการทำงานต่าง ๆ แล้วนำสัดส่วนของแก๊สมาคำนวณหาค่าความร้อน ( $\text{CV}_g$ ) ของเชื้อเพลิง ดังสมการที่ (3.1) และนำไปหาปริมาณพลังงานที่ภาระการทำงานต่าง ๆ ดังสมการที่ (2.10)

2) พลังงานที่ออกจากระบบ ประกอบด้วย พลังงานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้า พลังงานถ่ายเทออกมาจากไอเสีย พลังงานที่ถ่ายเทไปกับน้ำหล่อเย็น และพลังงานอื่น ๆ คือ พลังงานที่สูญเสียตามอุปกรณ์อื่น ๆ โดยพลังงานที่ออกจากระบบมีวิธีการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

2.1) พลังงานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าสามารถวัดได้จากผู้ควบคุมการทำงานเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยนำข้อมูลมาคำนวณได้ ดังสมการที่ (2.11)

2.2) พลังงานความร้อนที่ออกมาจากไอเสียหาได้ตามทฤษฎี โดยคำนวณจากการวัดองค์ประกอบแก๊สชีวมวลต่าง ๆ จากการวิเคราะห์ผล อุณหภูมิและอัตราการไหล

ของไอเสียด้วยเครื่อง Flue Gas Analyzer ดังแสดงใน รูปที่ 3.10 (ก) แล้วนำมาคูณสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ดังสมการที่ (2.19) ถึง (2.21) เพื่อมาคำนวณหาความจุความร้อนรวมของแก๊สไอเสียตามทฤษฎี ดังสมการที่ (2.22) และคำนวณหาพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสีย ดังสมการที่ (2.13) ดังแสดงการคำนวณใน (ภาคผนวก ค.)

2.3) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นสามารถหาได้จากการวัดอุณหภูมิน้ำทางเข้าและทางออกจากเครื่องยนต์ วัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น โดยปริมาณน้ำหล่อเย็นที่วัดได้จากหม้อน้ำเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Water Flow Meter ซึ่งวัดได้ค่าได้ 349.3 L/min. เมื่อความเร็วรอบเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าถูกควบคุมคงที่ 1000 rpm ดังแสดงใน รูปที่ 3.10 (ข) แล้วคำนวณความร้อนที่ออกมาที่น้ำหล่อเย็น ดังสมการที่ (2.12) และแสดงการคำนวณใน (ภาคผนวก ค.)



ก. เก็บข้อมูลไอเสียเครื่องยนต์



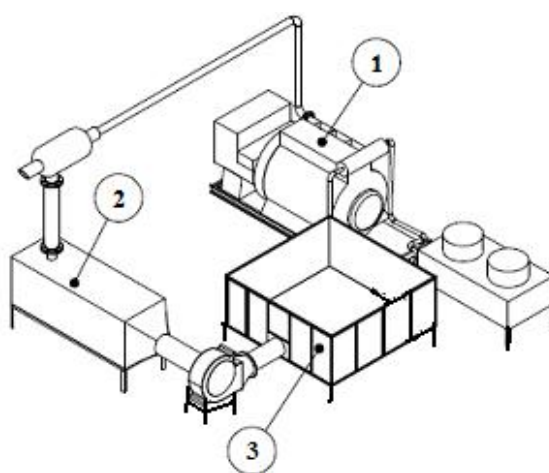
ข. เก็บข้อมูลน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์

รูปที่ 3.8 การวัดวิเคราะห์พลังงานที่ออกจากเครื่องยนต์

### 3.3.6 การศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์

การศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้านี้ เพื่อศึกษาการนำความร้อนจากไอเสียมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล การศึกษารุ่นนี้ได้เลือกเครื่องอบแห้งชนิดกระบะซึ่งเป็นแบบอยู่กับที่ (Static) มาใช้ในการทดสอบการอบแห้งเนื่องจากต้นทุนในการสร้างเครื่องอบแห้งไม่สูงและไม่มีการขับเคลื่อน น่าจะเหมาะสมกับโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยเครื่องอบแห้งเป็นเครื่องอบแบบกระบะ

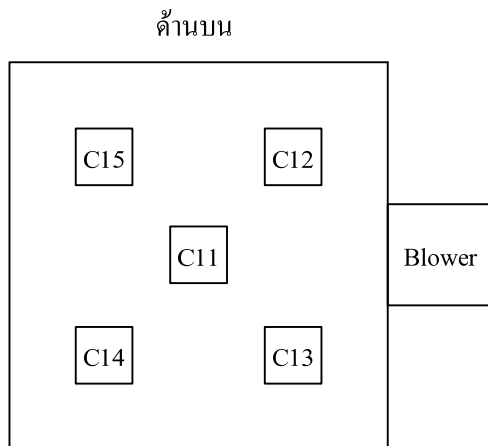
(อบแห้งลำไย) ของกลุ่มงานวิจัยหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรวิศวกรรม ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 (ค) โดยแหล่งความร้อนได้มาจากไอเสียของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยตรง (1) ไอเสียจะถูกนำมาผสมกับอากาศจากภายนอกในถังผสมโดยตรง (2) เข้าสู่เครื่องอบแห้ง (3) โดยบริเวณผิวตั้งแต่ท่อไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์จนถึงเครื่องอบแห้งถูกหุ้มฉนวนความร้อน โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลจะอยู่ระหว่าง 125-135 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน รูปที่ 3.9 โดยทำศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเชื้อเพลิงในการอบแห้ง พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง และประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้



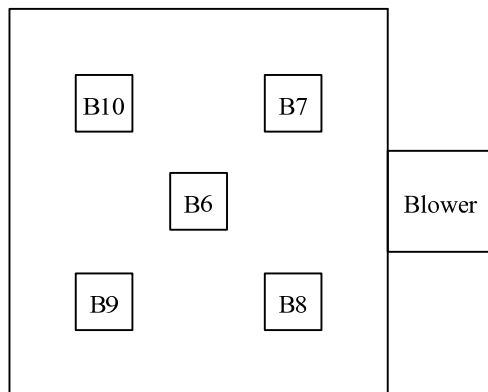
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งเครื่องอบแห้งเข้ากับท่อไอเสียของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

1) การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ

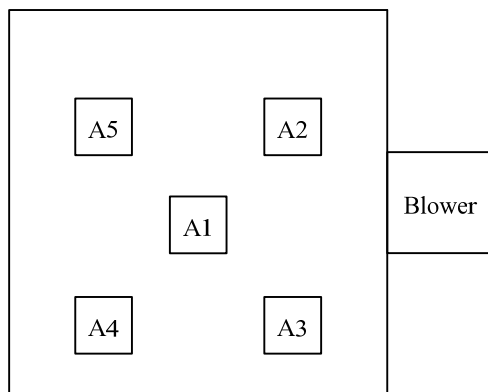
ใส่ไม้ยูคาลิปตัสสับลงไปในถังอบที่ความสูง 50 cm การอบแห้งได้เตรียมตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกทนความร้อนแล้วชั่งน้ำหนักบันทึกข้อมูลแล้วนำไม้ยูคาลิปตัสสับวางในถังอบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ A B และ C ที่ความสูง 0 cm (ชั้นล่าง) 25 cm (ชั้นกลาง) และที่ความสูง 50 cm (ชั้นบน) ตามลำดับ รวม 3 ชั้น ๆ ละ 5 ตัวอย่าง แล้วทำการอบแห้งเชื้อเพลิงโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 125-135 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน รูปที่ 3.10 เก็บตัวอย่างทั้งหมดมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนน้ำหนักของตัวอย่างไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำไปหาค่าความชื้น โดยนำตัวอย่างเข้าสู่อบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าความชื้นในแต่ละชั่วโมง ค่าความชื้นจะเป็นความชื้นเฉลี่ยในแต่ละชั้นความสูงของการอบแห้งตัวอย่าง ทำซ้ำโดยอบแห้งไม้ยูคาลิปตัสสับอีก 1 ครั้ง สำหรับการทดสอบอบแห้งเห้งน้ำมันสำปะหลังสับทำตามขั้นตอนการอบแห้งไม้ยูคาลิปตัสสับในขั้นต้น



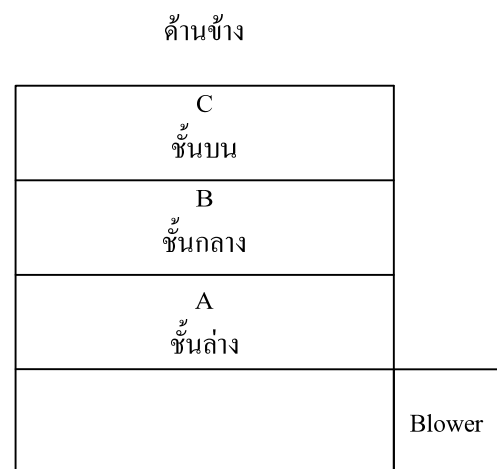
ก) ตำแหน่งเชื้อเพลิงชีวมวลชั้นบน



ข) ตำแหน่งเชื้อเพลิงชีวมวลชั้นกลาง



ค) ตำแหน่งเชื้อเพลิงชีวมวลชั้นล่าง



ง) ตำแหน่งเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชั้น

รูปที่ 3.10 แสดงตำแหน่งการวางตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องอบแห้งแบบกระบะ

## 2) พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

โดยเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในการอบแห้งที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ขับเคลื่อนและพลังงานความร้อนที่ได้จากแก๊สไอเสีย ซึ่งตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่เราต้องการคือ 17.6%db (15%wb) และหาปริมาณน้ำที่ถูกระเหยไปจนเหลือความชื้น 17.6%db (15%wb) จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง ดังสมการที่ (3.6)

$$SEC = \frac{a(\sum E_{blower}) + \sum Q_h}{W_{in} - W_f} \quad (3.6)$$

เมื่อ

SEC	คือ	พลังจำเพาะในการอบแห้ง, MJ/kg <sub>water</sub>
$\sum E_{blower}$	คือ	พลังงานที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อน, MJ
$\sum Q_h$	คือ	พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง, MJ
$W_{in}$	คือ	น้ำหนักของวัตถุดิบก่อนอบ, kg
$W_f$	คือ	น้ำหนักของวัตถุดิบหลังอบ, kg
a	คือ	ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

กรณีการ มณีบุญ (2549) สำหรับการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากค่า a มีความแตกต่างกันอยู่กับประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ใช้เป็นไฟฟ้าที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพ 21% หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของพลังงานความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้ามีค่าประมาณ 4.76 ดังนั้นการคิดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งซึ่งประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อน จึงต้องเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อนโดยคูณแฟกเตอร์ 4.76 เข้ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้า

## 3) ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง

ทำได้โดยการหาพลังที่ใช้ในการระเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณ ดังสมการที่ (3.7)

$$\eta_t = \frac{m_w h_{fg}}{Q_{exhaust}} \times 100 \quad (3.7)$$



เมื่อ

$\eta_t$	คือ	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง, %
$m_w$	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหย, kg
$h_{fg}$	คือ	ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ, kJ/kg
$Q_{\text{exhaust}}$	คือ	พลังงานความร้อนของไอเสียที่นำมาใช้ได้, kW

### 3.3.7 การศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน

การศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.3.5 นำมาคำนวณหาประสิทธิภาพโดยใช้ความสัมพันธ์อ้างอิงตามงานวิจัยของ พยุงศักดิ์ จุลยุเสน และ วีรชัย อัจหาญ (2551) ดังนี้

1) ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency) คำนวณหาได้ ดังสมการที่ (3.8)

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{Q_{\text{generator}}}{Q_{\text{fuel}}}$$

2) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะการผลิตไฟฟ้า (Specific Fuel Consumption) ซึ่งเป็นดัชนีวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังสมการที่ (3.9)

$$\text{sfc}_{\text{generator}} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{\text{generator}}} \quad (3.9)$$

3) ศักยภาพพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ (Heating Efficiency) จากสมดุลพลังงาน โดยพิจารณาพลังงานที่ออกจากระบบพบว่ามี 2 ส่วน คือ พลังงานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าและพลังงานเหลือทิ้ง ซึ่งมีอยู่ 2 ส่วน คือ พลังงานที่ออกมาคือน้ำหล่อเย็น (Coolant) และความร้อนที่ออกไปกับไอเสีย (Exhaust Gas) ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยพลังงานความร้อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อระบบผลิตไฟฟ้า คือ พลังงานความร้อนของแก๊สไอเสีย สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.10)

$$\eta_{\text{heating}} = \frac{Q_{\text{exhaust}}}{Q_{\text{fuel}}} \quad (3.10)$$

4) ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน (CHP Efficiency) คือ ประสิทธิภาพของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับประสิทธิภาพการทำความร้อนของไอเสียเครื่องยนต์มาใช้ประโยชน์ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (3.11)

$$\eta_{\text{CHP}} = \eta_{\text{heating}} + \eta_{\text{generator}} = \frac{Q_{\text{exhaust}} + Q_{\text{generator}}}{Q_{\text{fuel}}} \quad (3.11)$$

5) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน ซึ่งเป็นดัชนีวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงแก๊สชีวมวลต่อพลังงานที่ได้จากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า สามารถคำนวณ ดังสมการที่ (3.12)

$$\text{sfc}_{\text{CHP}} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{\text{generator}} + Q_{\text{exhaust}}} \quad (3.12)$$

6) ประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด (Overall Efficiency)

โดยแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังสมการที่ และพิจารณาประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By-product) โดยมีวิธีการคำนวณ ดังสมการที่ (3.13) และ (3.14)

$$\text{Overall Efficiency } (\eta_{\text{all}}) = \eta_{\text{electrical}} + \eta_{\text{heat recovery}} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\text{Heat recovery Efficiency } (\eta_{\text{heat recovery}}) = \left[ \left[ \frac{3.6 \times Q_{\text{exhaust}}}{m_{\text{bio}} \times \text{HHV}_{\text{bio}}} \right] \times \eta_t \right] \times 100 \quad (3.14)$$

เมื่อ

$m_{\text{bio}}$	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล, kg/hr
$\text{HHV}_{\text{bio}}$	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล, MJ/kg
$Q_{\text{exhaust}}$	คือ	ค่าพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียที่นำกลับมาใช้ได้, kW
$\eta_t$	คือ	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง, %

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษานี้ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล 2 ชนิด คือ ไม้ยูคาลิปตัสสับและเห้งามันสำปะหลังสับ โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบแบบแยกธาตุเพื่อทำการประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตพลังงาน โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงชีวมวลจากทั้ง 2 ชนิดมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน แต่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล (Physical Properties)

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 2 ชนิด พบว่า ไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นอยู่ระหว่าง 40-50%wb และมีความหนาแน่นวัดได้  $357 \text{ kg/m}^3$  มีลักษณะเป็นลำตรง มีความยาวประมาณ 2 เมตร หลังจากการเตรียมโดยผ่านเครื่องสับไม้และผ่านเครื่อง คัดแยกพบว่า ความหนาแน่นของ ไม้ยูคาลิปตัสลดลงวัดได้  $332 \text{ kg/m}^3$  ส่วนเห้งามันสำปะหลังจะมีความชื้นอยู่ในช่วง 50-60%wb มีลักษณะเป็นท่อนยาว 30-40 เซนติเมตร แต่มีกิ่งหรือแ่ง มีความหนาแน่นก่อนเตรียม  $193 \text{ kg/m}^3$  หลังจากการเตรียมโดยผ่านเครื่องสับไม้และผ่านเครื่องคัดแยก จะพบว่า มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น  $313 \text{ kg/m}^3$  ดังแสดงใน ตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

Biomass	ลักษณะทั่วไป	ความชื้น (%MC)	ความหนาแน่น ก่อนเตรียม <sup>1</sup> ( $\text{kg/m}^3$ )	ความหนาแน่น หลังเตรียม <sup>2</sup> ( $\text{kg/m}^3$ )
ไม้ยูคาลิปตัส	ยาว 2-3 m. ขนาด $\phi$ 1-2"	40-50	357	332
เห้งามันสำปะหลัง	ยาว 30-40 cm. ขนาด $\phi$ 1"	50-60	193	313

หมายเหตุ: <sup>1</sup> ก่อนผ่านเครื่องมือเตรียมเชื้อเพลิง

<sup>2</sup> หลังผ่านเครื่องมือเตรียมเชื้อเพลิง

#### 4.1.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

ผลการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า ไม้ยูคาลิปตัส และเหง้ามันสำปะหลัง มีเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยคาร์บอนคงตัวและเถ้า มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งส่วนประกอบเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งค่าความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย คือ 15.32 MJ/kg ส่วนเหง้ามันสำปะหลังจะมีค่าเท่ากับ 14.59 MJ/kg โดยจะมีรายละเอียด ดังแสดงใน ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของเชื้อเพลิงชีวมวล

พารามิเตอร์	ไม้ยูคาลิปตัส	เหง้ามันสำปะหลัง
ความชื้น (%)	1.14	4.66
สารระเหย (%)	79.00	80.00
คาร์บอนคงตัว (%)	17.22	12.61
เถ้า (%)	2.64	2.73
ค่าความร้อน (MJ/kg)	15.32	14.59

#### 4.1.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุพบว่า องค์ประกอบของเชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด ไม่แตกต่างกันมาก ดังแสดงรายละเอียดใน ตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ไม้ยูคาลิปตัสจะมีค่าปริมาณของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่าเล็กน้อย คือ 48.93% และ 8.05% ตามลำดับ ส่วนเหง้ามันสำปะหลังจะมีค่า 46.12% และ 7.55% ตามลำดับ ซึ่งธาตุทั้ง 2 ชนิดนี้จะเป็นธาตุหลักในการเปลี่ยนเป็นความร้อนของแก๊สชีวมวล ซึ่งผลนี้ทำให้ไม้ยูคาลิปตัสนั้นมีค่าความร้อนสูงกว่าเหง้ามันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล

พารามิเตอร์	ไม้ยูคาลิปตัส	เหง้ามันสำปะหลัง
คาร์บอน (%)	48.93	46.12
ไฮโดรเจน (%)	8.05	7.55
ไนโตรเจน (%)	0.52	1.13
ซัลเฟอร์ (%)	0.02	0.03
ออกซิเจน (%)	57.52	54.83

สำหรับผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนและโลหะหนักในเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงใน ตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณคลอรีนในยูคาลิปตัสสับจะมีค่าสูงกว่ามาก คือ 1.767% ส่วนในเห้งมันสำปะหลังจะมีเพียง 0.324% และปริมาณ โลหะหนัก (Fe) พบว่า ในเห้งมันสำปะหลังจะมีปริมาณมากกว่า คือ 1.719% ส่วนในไม้ยูคาลิปตัสสับจะมีเพียง 0.230%

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารพิษแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล

พารามิเตอร์(%)	ไม้ยูคาลิปตัสสับ	เห้งมันสำปะหลังสับ
คลอรีน	1.767	0.324
ทองแดง	0.167	0.037
เหล็ก	0.230	1.719
สังกะสี	0.043	0.034
ตะกั่ว	0.008	0.008

#### 4.2 การศึกษาสถานะการเดินระบบและความสามารถในการผลิตแก๊สชีวมวล

การศึกษาสถานะในการเดินระบบ โดยการศึกษานี้ได้ใช้ไม้ยูคาลิปตัสสับนำมาเป็นเชื้อเพลิงเดินระบบต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ขนาด 100 กิโลวัตต์ ที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากไม้ยูคาลิปตัสมีค่าพลังงานความร้อนสูงกว่าเห้งมันสำปะหลัง และมีปริมาณมากพอในการเดินระบบต่อเนื่อง โดยในการศึกษาจะหาสถานะการเดินระบบที่ภาระงาน 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ ผลการทดสอบทำให้ทราบถึงองค์ประกอบของแก๊สและอัตราการใช้แก๊สเชื้อเพลิง

#### 4.2.1 อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล

การทดสอบความสามารถในการผลิตแก๊สชีววมวลซึ่งทดสอบกับเครื่องยนต์แก๊สยี่ห้อ Sheng Dong รุ่น 100 GF-PJ โดยต่อเข้ากับชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไดนาโม (Generator) ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 125 kVA หรือ 100 กิโลวัตต์ มีระบบควบคุมความเร็วรอบการทำงานคงที่เท่ากับ 1000 rpm และความถี่ไฟฟ้า 50 Hz โดยทำการควบคุมเครื่องยนต์ในการเดินระบบผลิตไฟฟ้าในระดับต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในการผลิตแก๊สชีววมวลในแต่ละการผลิตไฟฟ้าในระดับต่าง ๆ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราการไหลของแก๊สชีววมวล ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 0 กิโลวัตต์ และ 80 กิโลวัตต์ เครื่องยนต์แก๊สที่ใช้ในการทดสอบมีความสัมพันธ์แก๊สชีววมวลอยู่ระหว่าง 163.8-212.4 m<sup>3</sup>/hr ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลของแก๊สชีววมวลที่ต่ำกว่า 163.8 m<sup>3</sup>/hr ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เนื่องจากความจุของแก๊สเชื้อเพลิงนั้นสามารถใช้เดินเครื่องยนต์ในสถานะที่ปราศจากโหลดเท่านั้น แต่ไม่เพียงพอสำหรับไปขับ Generator เพื่อผลิตไฟฟ้าได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของแก๊สชีววมวลและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น จะให้กำลังการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น

#### 4.2.2 องค์ประกอบของแก๊สชีววมวล (Gas Composition)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (ยี่ห้อ SIMADSU รุ่น GC-14B) โดยการเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที ณ ตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องยนต์ โดยตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง (G<sub>c</sub>) ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3.7 องค์ประกอบของแก๊สชีววมวลเฉลี่ยและค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณ (การคำนวณ ดังแสดงใน ภาคผนวก ค.) ที่ภาระงานทั้ง 5 ระดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 4.5 พบว่าองค์ประกอบของแก๊สชีววมวลที่ภาระงานทั้ง 5 ระดับ มีความใกล้เคียงกัน พิจารณาได้จากข้อมูลเปรียบเทียบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วีรัชย์ อัจหาญ และคณะ (2551) ดังแสดงใน รูปที่ 4.1 ทั้งนี้องค์ประกอบของแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้สามารถจัดเป็น 2 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มที่จุดไฟติด (Combustible Gas) ประกอบด้วย CO H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> ในสัดส่วน โดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 17.53%, 19.20% และ 2.61% ตามลำดับ โดยที่ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงคำนวณได้เฉลี่ย 5.89 MJ/Nm<sup>3</sup> ซึ่งจัดเป็นแก๊สที่นำไปใช้เป็นพลังงานหรือนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในได้

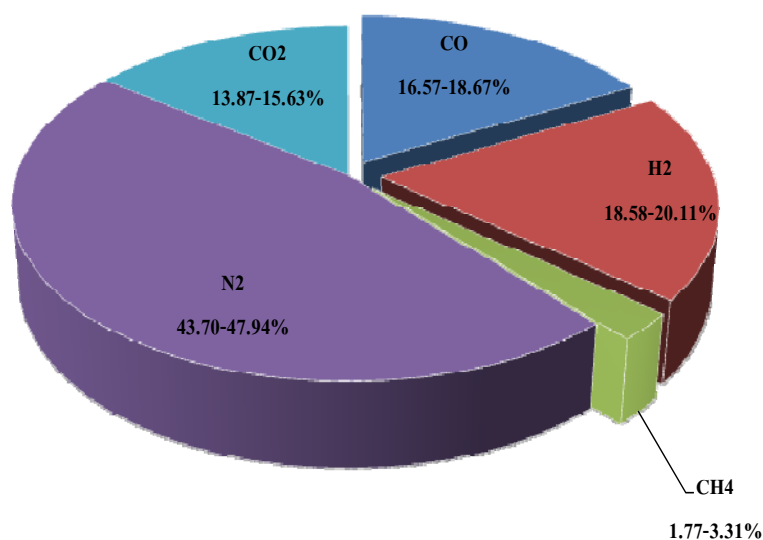
2) กลุ่มที่จุดไฟไม่ติด (Non-combustible Gas) ประกอบด้วย N<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ในสัดส่วน โดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 45.53% และ 15.13% ตามลำดับ

จากการศึกษาสถานะในการเดินระบบพบว่า อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีววมวลเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าชีววมวลของระบบอีกตัวหนึ่ง จากการศึกษพบว่าในสถานะการเดิน

ระบบของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยไม่ได้ผลิตรกระแสไฟฟ้า จะมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิง 70.6 kg/hr แต่เมื่อเดินระบบภาระการทำงานที่ 80 กิโลวัตต์ จะมีการใช้เชื้อเพลิง 107.1 kg/hr ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของแก๊สชีววมวลที่ผลิตจากเชื้อเพลิงชีววมวล

ภาระงาน เครื่องยนต์ ผลิตไฟฟ้า (kW)	อัตราการใช้ เชื้อเพลิง (kg/hr)	คุณสมบัติของแก๊สเชื้อเพลิงชีววมวล						ค่าความร้อน ของแก๊ส ชีววมวล (MJ/Nm <sup>3</sup> )
		อัตราการใช้ ไหลของ แก๊สชีววมวล (m <sup>3</sup> /hr)	สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%)					
			CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	
0	70.6	163.8	16.98	20.11	2.79	44.49	15.63	6.01
20	78.0	170.4	16.57	19.47	2.47	46.39	15.11	5.74
40	84.4	186.6	17.85	18.58	1.77	47.94	13.87	5.50
60	102.2	192.0	17.60	19.07	2.72	45.13	15.47	5.92
80	107.1	214.2	18.67	18.75	3.31	43.70	15.57	6.27
เฉลี่ย			17.53	19.20	2.61	45.53	15.13	5.89



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสัดส่วนเฉลี่ยโดยปริมาตรของแก๊สชีววมวล

### 4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

จากผลการศึกษาสภาวะในการเดินระบบในหัวข้อ 4.2 สามารถนำข้อมูลมาประเมินประสิทธิภาพการผลิตพลังงานได้ ดังแสดงใน ตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.2 ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Efficiency)

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นแก๊สชีวมวล โดยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จาก ตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล ของเชื้อเพลิงชีวมวลในการเดินระบบเพื่อผลิตไฟฟ้าในช่วง 72.81-90.99% ซึ่งประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.2.1

#### 4.3.2 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency)

แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ผลการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์พบว่า ที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ มีประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 7.37%, 14.01%, 9.01% และ 21.46% ตามลำดับ ดังแสดงใน ตารางที่ 4.6

#### 4.3.3 ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

ประสิทธิภาพนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวลและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ผลการประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพบว่า การทำงาน 80 กิโลวัตต์ มีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 17.55% ดังแสดงใน ตารางที่ 4.6

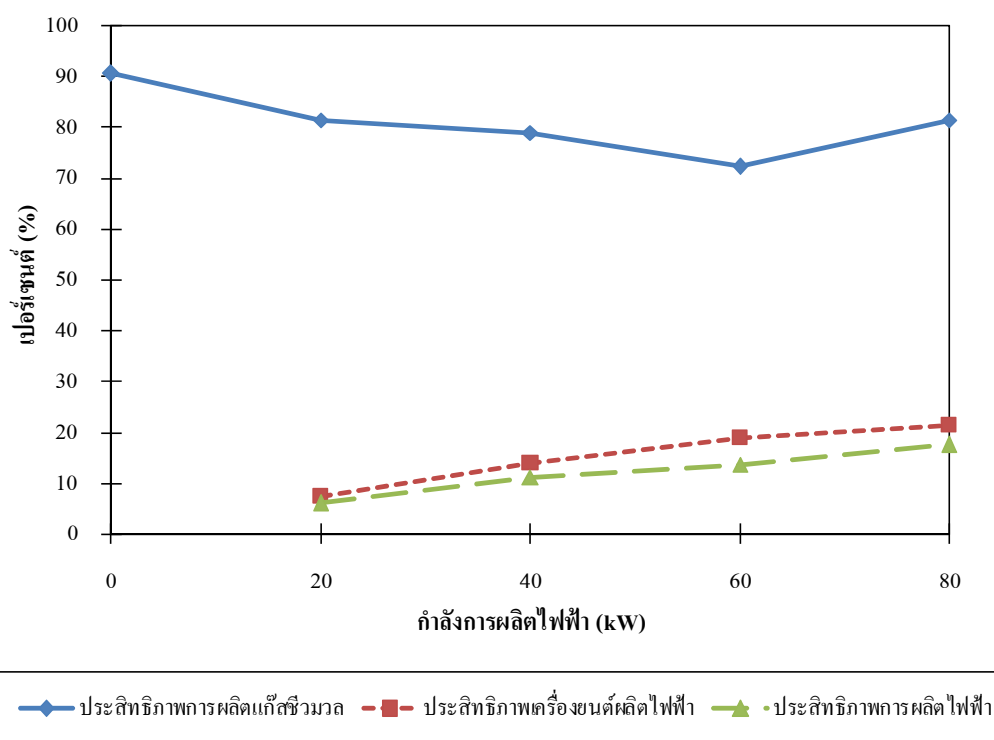
#### 4.3.4 อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption)

อัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้พบว่า ที่ภาระการทำงาน 20 กิโลวัตต์ จะมีค่า 3.90 kg/kWh ส่วนที่ 80 กิโลวัตต์ จะมีค่า 1.34 kg/kWh จะได้ว่าปริมาณอัตราการใช้เชื้อเพลิงจะลดลงเมื่อเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงใน ตารางที่ 4.6



ตารางที่ 4.6 ผลการแสดงผลการประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

กำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	ประสิทธิภาพของระบบ (%)			อัตราสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
	แก๊สชีววมวล	เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า	การผลิตไฟฟ้า	
0	90.99	-	-	-
20	81.84	7.37	6.03	3.90
40	79.40	14.01	11.14	2.11
60	72.81	19.01	13.80	1.70
80	81.80	21.46	17.55	1.34



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการผลิตพลังงานและกำลังการผลิตไฟฟ้า

#### 4.4 การศึกษาสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

จากผลการศึกษาพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าพบว่าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานที่เข้าสู่ระบบและพลังงานที่ออกจากระบบหรือสมดุลพลังงานในเครื่องยนต์ โดยจะทำการศึกษาพลังงานที่เข้าสู่เครื่องยนต์และพลังงานที่ออกจากเครื่องยนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะแสดงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 พลังงานที่เกิดขึ้นในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

พลังงานเข้าสู่ระบบ			พลังงานที่ออกจากระบบ			
Gas Flow (m <sup>3</sup> /hr)	CV <sub>g</sub> (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Q <sub>fuel</sub> (kW)	Q <sub>generator</sub> (kW)	Q <sub>exhaust gas</sub> (kW)	Q <sub>coolant</sub> (kW)	Q <sub>loss</sub> (kW)
163.8	6.01	273.33	0	42.65	48.33	182.35
170.4	5.74	271.31	20	49.70	48.25	153.36
186.6	5.50	285.43	40	55.24	48.13	142.06
192.0	5.92	315.64	60	65.32	48.00	142.32
214.2	6.27	372.78	80	75.52	71.82	145.44

#### 4.4.1 พลังงานที่เข้าสู่ระบบ

ในส่วนนี้ก็คือ พลังงานของแก๊สชีววมวลที่ไหลเข้าในเครื่องยนต์ผสมกับอากาศเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบสมบรูณ์ จากข้อมูลในหัวข้อ 4.2.1 พบว่า ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลไม่แตกต่างกันมาก โดยความต้องการพลังงานความร้อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ทำให้ปริมาณแก๊สเชื้อเพลิงชีววมวลที่เข้าเครื่องยนต์เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาพบว่า ที่กำลังผลิตตั้งแต่ 0 กิโลวัตต์ จนถึง 80 กิโลวัตต์ จะมีความต้องการปริมาณแก๊สชีววมวล 163.8-214.2 m<sup>3</sup>/hr ดังนั้น ค่าพลังงานของแก๊สชีววมวลที่เข้าสู่เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า มีค่าอยู่ระหว่าง 271.31-372.78 กิโลวัตต์ ดังแสดงรายละเอียดดัง ตารางที่ 4.7

#### 4.4.2 พลังงานที่ออกจากระบบ

พลังงานที่ออกจากระบบ ประกอบด้วย พลังงานที่ใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้าซึ่งวัดได้จากเครื่องวัดกำลังการผลิตไฟฟ้าภายในตู้ควบคุม พลังงานที่ออกไปกับไอเสียเครื่องยนต์ พลังงานที่สูญเสียไปกับระบบน้ำหล่อเย็น และพลังงานส่วนที่เหลือจะสูญเสียไปกับระบบอื่น ๆ ที่เหลือ ดังแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 1) พลังงานความร้อนจากไอเสีย

จากการศึกษาพบว่า การเผาไหม้แก๊สชีววมวลในเครื่องยนต์จะได้พลังงานจากเครื่องยนต์ที่นำไปใช้งานและพลังงานความร้อนส่วนหนึ่งจะออกมากับไอเสีย โดยระบายออกสู่บรรยากาศ ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ทำการหาพลังงานความร้อนจากไอเสีย โดยคำนวณหาความจุความร้อนของไอเสียตามสมการในหัวข้อที่ 2.5.2 ที่ภาระการทำงาน 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ ซึ่งถือว่าเครื่องยนต์ในการทดสอบนี้มีการเผาไหม้แบบสมบรูณ์ แล้วย้นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณพลังงานความร้อนจากไอเสีย ดังสมการที่ (2-13) จากการศึกษพบว่าค่าความจุความร้อนของไอเสีย

ที่ได้จากการคำนวณอยู่ระหว่าง 1.17-1.22 kJ/kg°C อุณหภูมิไอเสียมีค่าระหว่าง 243-432 องศาเซลเซียส และพลังงานที่ออกมาที่ไอเสียมีค่า 42.65-75.52 กิโลวัตต์ (วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.) ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การคำนวณค่าพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสีย ที่ภาระการทำงานต่าง ๆ

กำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	อัตราการไหลแก๊สไอเสีย (m <sup>3</sup> /min)	ปริมาตรจำเพาะ (m <sup>3</sup> /kg)	ค่าความจุความร้อนของแก๊สไอเสีย (kJ/kg°C)	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	ความร้อนของแก๊สไอเสีย (kW)
0	13.97	1.28	1.07	243	24	42.65
20	14.35	1.35	1.08	287	27	49.70
40	14.25	1.51	1.11	345	28	55.24
60	15.92	1.63	1.11	394	33	65.32
80	17.68	1.74	1.12	432	33	75.52

## 2) พลังงานความร้อนในน้ำหล่อเย็น

จากการศึกษาพบว่า พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น คือ พลังงานความร้อนที่นำออกมาจากเครื่องยนต์ ดังนั้นการศึกษานี้ ได้ทำการหาปริมาณการไหลของน้ำโดยใช้อัตราไหลของน้ำในหม้อน้ำจะคงที่เนื่องจากปั๊มที่ต่อกับเครื่องยนต์ในการเดินระบบจะใช้รอบการทำงานคงที่ คือ 1000 rpm ซึ่งจะได้อัตราการไหลของน้ำของหม้อน้ำ คือ 349.3 L/min. (20.96 m<sup>3</sup>/hr) และวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องยนต์ ที่ภาระงานต่าง ๆ ซึ่งผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิทางเข้าและทางออกจะแตกต่างกันประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส และข้อมูลที่ได้นำไปคำนวณหาพลังงานที่ถ่ายเทกับน้ำหล่อเย็นพบว่า จะมีค่าอยู่ระหว่าง 48.00-71.82 กิโลวัตต์ (วิธีการคำนวณในภาคผนวก ค.) ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การคำนวณค่าความพลังงานที่ถ่ายเทกับน้ำหล่อเย็นที่ภาระการทำงานต่าง ๆ

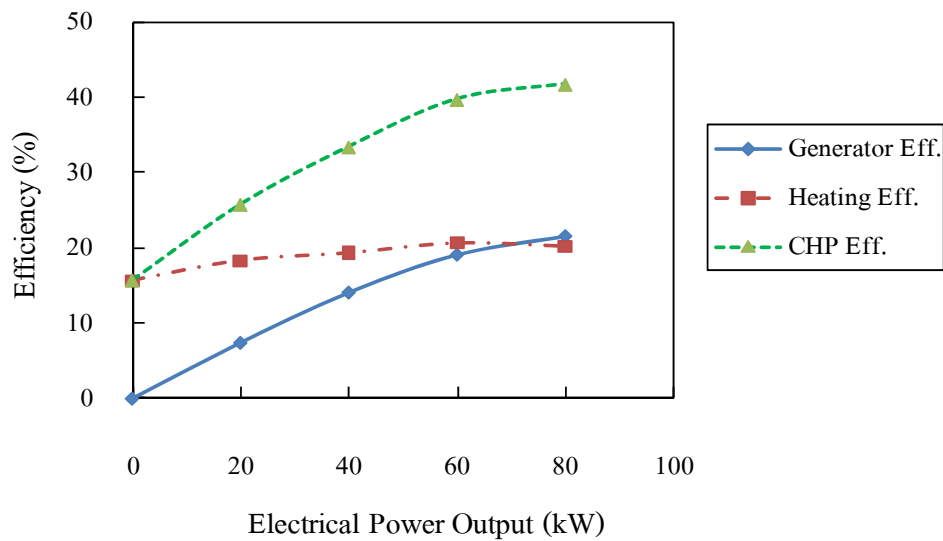
กำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	อัตราการไหล น้ำหล่อเย็น (L/min)	ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg°C)	อุณหภูมิน้ำเข้า เครื่องยนต์ (°C)	อุณหภูมิน้ำออก เครื่องยนต์ (°C)	พลังงานที่ถ่ายเท กับน้ำหล่อเย็น (kW)
0	349.3	4.18	37	39	48.33
20	349.3	4.18	42	44	48.25
40	349.3	4.18	48	50	48.13
60	349.3	4.18	54	56	48.00
80	349.3	4.18	59	62	71.82

#### 4.4.3 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน

จากผลการศึกษาค้นค้นพบว่า ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ( $\eta_{\text{generator}}$ ) เท่ากับ 7.37-21.46% ที่ภาระงาน 20-80 กิโลวัตต์ จากการศึกษาสมดุลพลังงานภายในเครื่องยนต์ ยังมีพลังงานความร้อนเหลือทิ้งที่ยังไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียมีค่า 42.65-75.52 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่น่ากลับมาใช้ประโยชน์ได้โดยมีเสถียรภาพ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาศักยภาพความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าเพื่อประเมินประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน ดังสรุปไว้ใน ตารางที่ 4.10 และ รูปที่ 4.3

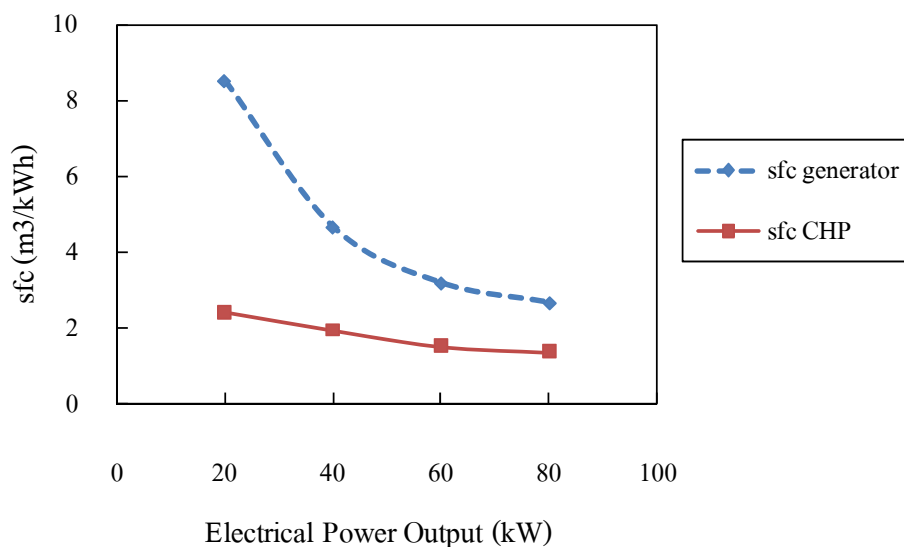
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน

กำลังการผลิตไฟฟ้า (kW)	อัตราการไหล แก๊สชีวมวล (m <sup>3</sup> /hr)	เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน				
		$\eta_{\text{generator}}$ (%)	sfc <sub>generator</sub> (m <sup>3</sup> /kWh)	$\eta_{\text{heating}}$ (%)	$\eta_{\text{CHP}}$ (%)	sfc <sub>CHP</sub> (m <sup>3</sup> /kWh)
0	163.8	-	-	15.60	15.60	-
20	170.4	7.37	8.51	18.32	25.69	2.44
40	186.6	14.01	4.67	19.35	33.36	1.96
60	192.0	19.01	3.20	20.69	39.70	1.53
80	214.2	21.46	2.68	20.26	41.72	1.38



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน ที่ภาระงานต่าง ๆ

จากการศึกษาศักยภาพพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ( $\eta_{\text{heating}}$ ) ในที่นี้พิจารณาพลังงานความร้อนที่ออกมาที่แก๊สไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ที่ภาระการทำงาน 0-80 กิโลวัตต์ จะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 15.60-20.69% พบว่าที่ภาระการทำงาน 60 กิโลวัตต์ มีศักยภาพพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าสูงกว่าภาระการทำงานที่ 80 กิโลวัตต์ เล็กน้อย แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน ( $\eta_{\text{CHP}}$ ) จะมีค่า 15.60-41.72% โดยที่ภาระงานที่ 80 กิโลวัตต์ จะมีค่าสูงสุด สำหรับการพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ( $\text{sfc}_{\text{generator}}$ ) ภาระการทำงานที่ 20 กิโลวัตต์ จะมีค่า 8.51  $\text{m}^3/\text{kWh}$  ส่วนที่ ภาระงานที่ 80 กิโลวัตต์จะมีค่า 2.68  $\text{m}^3/\text{kWh}$  ส่วนอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน ( $\text{sfc}_{\text{CHP}}$ ) ที่ภาระการทำงาน 20 กิโลวัตต์ จะมีค่า 2.44  $\text{m}^3/\text{kWh}$  และภาระงานที่ 80 กิโลวัตต์ จะมีค่า 1.38  $\text{m}^3/\text{kWh}$  จะพบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีความสัมพันธ์ แบบแปรผกผันกับกำลังการผลิตไฟฟ้า เมื่อพิจารณาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ จะเห็นได้ว่าการนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์จะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์ลดลง ดังแสดงใน รูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน

#### 4.5 การศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์

จากการศึกษาสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าและการหาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน พบว่าที่ภาระการทำงานของเครื่องยนต์ 80 กิโลวัตต์มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีการนำความร้อนจากไอเสียที่ภาระการทำงาน 80 กิโลวัตต์ มาใช้เป็นแหล่งความร้อนในการศึกษาการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ

ในการศึกษาในหัวข้อนี้ทำการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล 2 ชนิด คือ ไม้ยูคาลิปตัสสับและเห้งมันสำปะหลังสับ อุณหภูมิในการอบแห้ง 130 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบะ ดังแสดงใน รูปที่ 4.5 ได้ทำการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 2 ชนิด จากความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นที่ต้องการ คือ 15%wb ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นของไม้ยูคาลิปตัสสับความชื้นที่ 1 โดยมีความชื้นเริ่มต้น 35.6%wb จะใช้เวลาในการอบแห้งจนเหลือความชื้น 15%wb ใช้เวลาอบแห้ง 2 ชั่วโมง และความชื้นที่ 2 มีความชื้นเริ่มต้น 46.7%wb จะใช้เวลาในการอบแห้ง 3.5 ชั่วโมง ส่วนเห้งมันสำปะหลังสับความชื้นที่ 1 โดยมีความชื้นเริ่มต้น 50.2%wb จะใช้เวลาในการอบแห้งจนเหลือความชื้น 15%wb ใช้เวลาอบแห้ง 4.5 ชั่วโมง และความชื้นที่ 2 มีความชื้นเริ่มต้น 55.1%wb ใช้เวลาในการอบแห้ง เท่ากับ 5 ชั่วโมงซึ่งจะสังเกตได้ว่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง คือ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูงจะต้องใช้เวลาในการอบแห้งมากขึ้น ดังแสดงใน ตารางที่ 4.12

#### 4.5.2 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากชีวมวลพบว่า การอบแห้งไม้ยูคาลิปตัสสับที่มีความชื้นเริ่มต้น 35.6%wb และ 46.7%wb จะใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 4.33 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> และ 4.14 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ตามลำดับ ส่วนเหง้ามันสำปะหลังสับที่มีความชื้นเริ่มต้น 50.2%wb และ 55.1%wb จะใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 4.05 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> และ 4.08 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ตามลำดับ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าการอบแห้งเชื้อเพลิงสับโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบะและใช้แหล่งความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า จะมีการใช้พลังงานจำเพาะเฉลี่ย 4.15 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>

#### 4.5.3 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง

ผลการศึกษานี้แสดงถึงความสามารถของเครื่องอบแห้งที่สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียไประเหยน้ำภายในเนื้อของเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งจากการทดลองพบว่า การอบแห้งไม้ยูคาลิปตัสสับจะมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 57.18-59.98% ส่วนเหง้ามันสำปะหลังสับจะมีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 60.86-61.31% จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมการอบแห้งค่อนข้างสูงเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูง จึงทำให้น้ำภายในเชื้อเพลิงชีวมวลออกได้ง่าย และได้มีการติดตั้งฉนวนความร้อนท่ไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ บริเวณถังผสมอากาศ ท่อลมร้อน รวมถึงการอุดรอยรั่วบริเวณรอยต่อของเครื่องอบแห้งเพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนจึงทำให้ประสิทธิภาพสูง ดังแสดงใน ตารางที่ 4.11

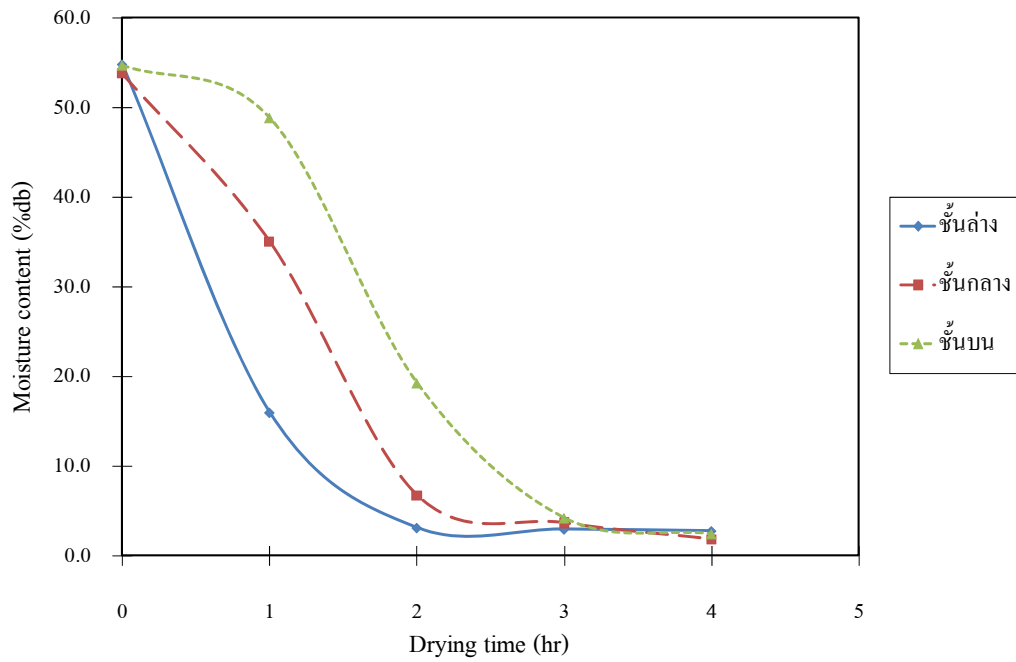
ตารางที่ 4.11 แสดงผลทดสอบการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสีย

ข้อมูล	ไม้ยูคาลิปตัสสับ		เห้งมันสำปะหลังสับ	
	ความชื้นที่ 1	ความชื้นที่ 2	ความชื้นที่ 1	ความชื้นที่ 2
น้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น (kg)	590	720	832	840
ความชื้นเริ่มต้น %db(%wb)	55.2(35.6)	84.8(46.7)	100.8(50.2)	115.1(55.1)
ความชื้นที่ต้องการ %db(%wb)	17.6(15.0)	17.6(15.0)	17.6(15.0)	17.6(15.0)
น้ำหนักที่ความชื้นที่ต้องการ (kg)	447.0	457.5	487.0	459.5
น้ำหนักน้ำที่หายไป (kg)	143.0	262.5	345.0	380.5
เวลาที่ใช้อบ (hr : min)	2 : 00	3 : 30	4 : 30	5 : 00
พลังงานความร้อนจากไอเสียเฉลี่ย (kW)	75.52	75.52	75.52	75.52
อุณหภูมิในการอบแห้ง °C	125-135	125-135	125-135	125-135
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) $\frac{MJ}{kg_{H_2O}}$	4.33	4.14	4.05	4.08
ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง ( $\eta_t$ ) %	57.18	59.98	61.31	60.86

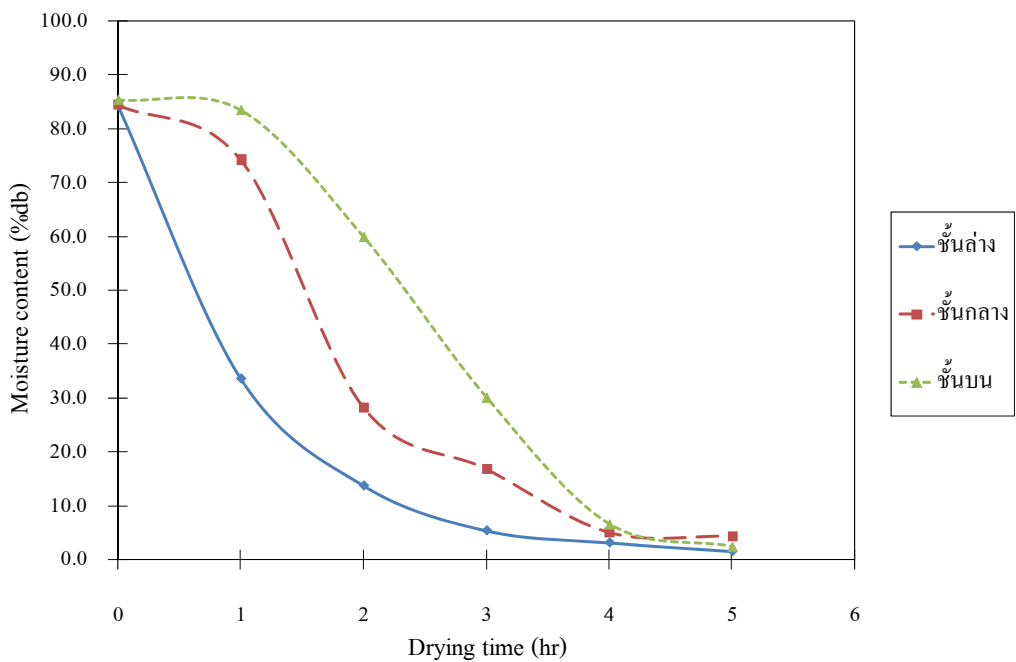


รูปที่ 4.5 ศึกษาการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า



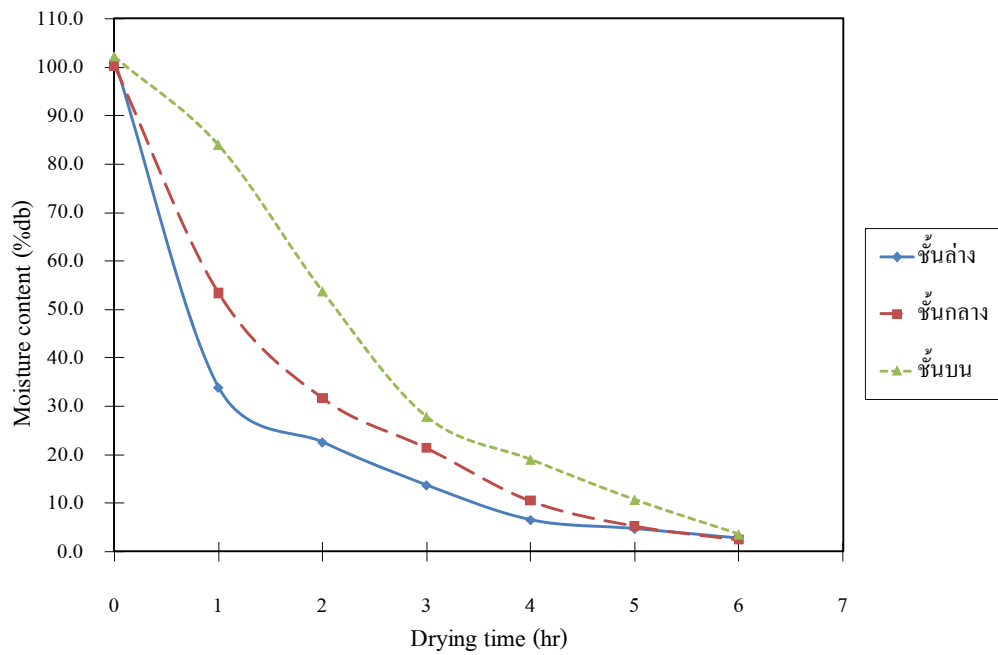


ก. ไม้ยูคาลิปตัสสับ ความชื้นที่ 1

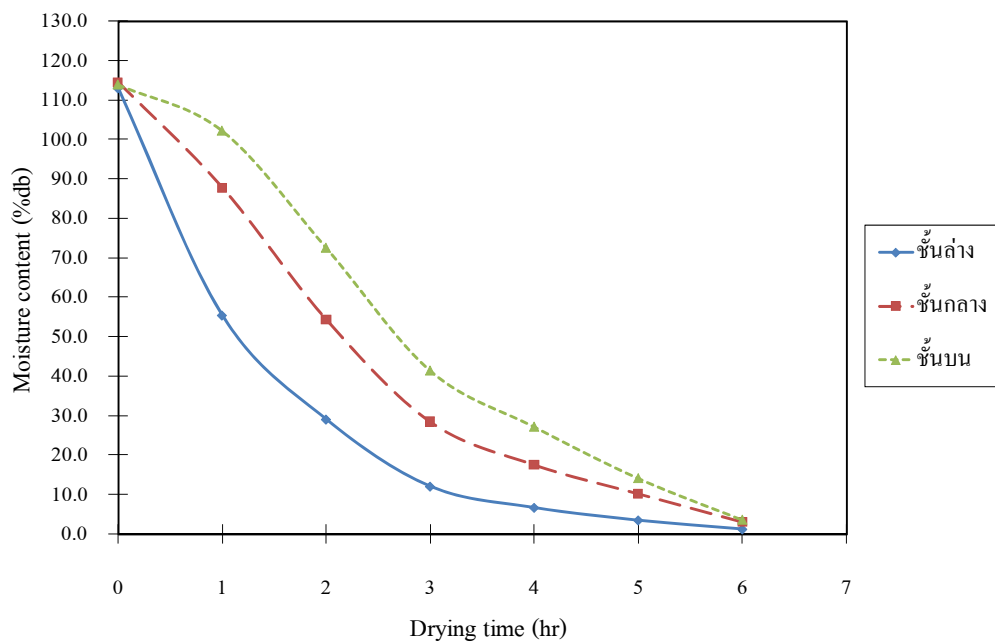


ข. ไม้ยูคาลิปตัสสับ ความชื้นที่ 2

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นไม้ยูคาลิปตัสสับขณะอบแห้ง ชั้นล่าง กลาง และบน



ก. เหง้ามันตำปะหลังสับ ความชื้นที่ 1



ข. เหง้ามันตำปะหลังสับ ความชื้นที่ 2

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นเหง้ามันตำปะหลังสับขณะอบแห้ง ชั้นล่าง กลางและบน

#### 4.6 ประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด

ประสิทธิภาพนี้แสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน และยังพิจารณาถึงประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าหรือเป็นประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล ( $\eta_{all}$ ) ที่ภาระงานต่าง ๆ ในการศึกษาี้เลือกเอาความร้อนไอเสียที่ภาระการทำงานที่ 80 กิโลวัตต์ เนื่องจากเป็นสภาวะการทำงานที่มีประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ารวมพลังงานความร้อนสูงสุดไปใช้เป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้งและจากผลการศึกษาพบว่า การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์จะมีประสิทธิภาพ 9.91% เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด ในกรณีไม่พิจารณาความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ โรงไฟฟ้าชีวมวลจะมีประสิทธิภาพเพียง 17.55% ในกรณีพิจารณาความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 27.46% ดังแสดงใน ตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการประเมินประสิทธิภาพรวมของต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวล

กำลังไฟฟ้า (kW)	อัตราการ ไหลแก๊ส ชีวมวล (m <sup>3</sup> /hr)	คุณสมบัติของโรงไฟฟ้าชีวมวล						
		ประสิทธิภาพ ผลิตแก๊สชีวมวล ( $\eta_{gas}$ ) %	ประสิทธิภาพ การผลิตไฟฟ้า ( $\eta_{el}$ ) %	ประสิทธิภาพ เครื่องยนต์ ผลิตไฟฟ้า ( $\eta_{generator}$ ) %	ศักยภาพการนำความ ร้อนเหลือทิ้งจาก เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ( $\eta_{heating}$ ) %	ประสิทธิภาพของ เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ร่วมพลังงานความร้อน ( $\eta_{CHP}$ ) %	ประสิทธิภาพการ นำความร้อนเหลือ ทิ้งมาใช้ประโยชน์ <sup>1</sup> ( $\eta_{heat\ recovery}$ ) %	ประสิทธิภาพ รวมของระบบ ทั้งหมด ( $\eta_{all}$ ) %
0	163.8	90.99	-	-	15.60	15.60	N/A	N/A
20	170.4	81.84	6.03	7.37	18.32	25.69	N/A	N/A
40	186.6	79.40	11.14	14.01	19.35	33.36	N/A	N/A
60	192.0	72.81	13.80	19.01	20.69	39.70	N/A	N/A
80	214.2	81.80	17.55	21.46	20.26	41.72	9.91	27.46

หมายเหตุ : <sup>1</sup> ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง ( $\eta_t$ ) เฉลี่ย เท่ากับ 59.83%

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าและการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบแห้งชีวมวล โดยผลการศึกษาสรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 5.1.1 สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 2 ชนิด หลังการเตรียมเชื้อเพลิง พบว่า ไม้ยูคาลิปตัสสับมีความหนาแน่น  $332 \text{ kg/m}^3$  และเหง้ามันสำปะหลังสับมีความหนาแน่น  $313 \text{ kg/m}^3$  ต่อมาได้ทำการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและแบบแยกธาตุของ ไม้ยูคาลิปตัสสับและเหง้ามันสำปะหลังสับพบว่า เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน ไม้ยูคาลิปตัสสับมีค่าองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนสูงกว่าเล็กน้อยคือ 48.93% และ 8.05% ตามลำดับ ส่วนเหง้ามันสำปะหลังสับมีค่า 46.12% และ 7.55% ธาตุทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวบ่งบอกถึงค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิง โดยไม้ยูคาลิปตัสสับมีค่าความร้อน  $15.23 \text{ MJ/kg}$  ส่วนเหง้ามันสำปะหลังสับมีค่า  $14.59 \text{ MJ/kg}$  จะเห็นได้ว่า เชื้อเพลิงทั้งสองชนิดมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

##### 5.1.2 ทดสอบการเดินระบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก

จากการทดสอบสถานะการเดินระบบโดยควบคุมกำลังการผลิตของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่ 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ พบว่า โรงไฟฟ้าชีวมวลมีอัตราการสิ้นเปลืองแก๊สชีวมวลอยู่ระหว่าง  $163.8\text{-}221.4 \text{ m}^3/\text{hr}$  โดยที่อัตราการไหล  $163.8 \text{ m}^3/\text{hr}$  ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เนื่องจากปริมาณแก๊สชีวมวลสามารถเดินระบบได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้า หลังจากนั้นนำแก๊สชีวมวลที่ภาระการทำงานต่าง ๆ มาศึกษาองค์ประกอบแก๊สชีวมวลพบว่า แก๊สเชื้อเพลิงแต่ละภาระการทำงาน มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน แม้จะมีอัตราการไหลของแก๊สที่แตกต่างกันโดยกลุ่มแก๊สที่จุดไฟติด (Combustible Gas) ประกอบด้วย  $\text{CO}$   $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  จะมีสัดส่วนปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 17.53%, 19.20% และ 2.61% ตามลำดับ มีค่าความร้อนเฉลี่ย  $5.89 \text{ MJ/Nm}^3$  และกลุ่มที่จุดไฟไม่ติด (Non-combustible Gas) ซึ่งประกอบไปด้วยแก๊ส  $\text{N}_2$  และ  $\text{CO}_2$  ในสัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ยเท่ากับ 45.53% และ 15.13% ตามลำดับ สถานะการเดินระบบเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าโดยไม่ต่อโหลดจะมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล  $70.6 \text{ kg/hr}$

แต่เมื่อระบบมีภาระการทำงานที่ 80 กิโลวัตต์ จะมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 107.1 kg/hr ซึ่งอัตราการใช้เชื้อเพลิงมีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะและประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล

### 5.1.3 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลการศึกษาเดินระบบที่ภาระการทำงานทั้ง 5 ระดับ พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล (Gasification Efficiency) มีค่าอยู่ระหว่าง 72.81-90.99% ในการเดินเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้าพบว่า กำลังการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency) มากขึ้น ซึ่งผลการศึกษาที่ภาระการทำงาน 20-80 กิโลวัตต์ มีประสิทธิภาพระหว่าง 7.37-21.46% และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency) มีค่าระหว่าง 6.03-17.55% ทั้งนี้อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจำเพาะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับกำลังการผลิตไฟฟ้าที่สูงขึ้น คือ ที่ภาระการทำงาน 20 กิโลวัตต์ จะมีค่า 3.90 kg/kWh ส่วนภาระการทำงาน 80 กิโลวัตต์ จะมีค่า 1.34 kg/kWh

### 5.1.4 ศึกษาสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

ผลจากการศึกษาการเดินระบบภาระงานที่ 0-80 กิโลวัตต์ สามารถแบ่งพลังงานออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรก พลังงานที่เข้าสู่เครื่องยนต์ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนของแก๊สชีวมวล โดยมีค่าระหว่าง 273.33-372.78 กิโลวัตต์ ส่วนที่สอง คือ พลังงานที่ออกจากเครื่องยนต์ประกอบด้วย พลังงานในการผลิตไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0-80 กิโลวัตต์ พลังงานความร้อนที่ออกมากับไอเสียของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 42.65-75.52 กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนที่เราสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นมีค่าระหว่าง 48.00-71.82 กิโลวัตต์ และพลังงานที่สูญเสียไปกับส่วนอื่น ๆ ของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 142.06-182.35 กิโลวัตต์ ซึ่งจากข้อมูลข้างต้น เราควรมีการพิจารณาการนำความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น และความร้อนที่สูญเสียไปกับส่วนอื่น ๆ มาใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

### 5.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมพลังงานความร้อน

ผลการศึกษาการเดินระบบภาระการทำงานที่ 0-80 กิโลวัตต์ ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน พบว่าจะมีประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 7.37-21.46% และมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลจำเพาะ โดยที่ภาระการทำงาน 20 กิโลวัตต์ จะมีค่า 8.51 m<sup>3</sup>/kWh ส่วนที่ 80 กิโลวัตต์ จะมีค่า 2.68 m<sup>3</sup>/kWh จะเห็นได้ว่าอัตราการใช้แก๊สชีวมวลจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ส่วนการพิจารณาการทำความร้อนโดยเอาความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ โดยพบว่า ศักยภาพพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ( $\eta_{\text{heating}}$ )

ที่ภาระการทำงาน 0-80 กิโลวัตต์ มีค่าระหว่าง 15.60-20.69% แต่ศักยภาพพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าที่ภาระการทำงาน 60 กิโลวัตต์ จะมีค่าสูงกว่าที่ 80 กิโลวัตต์เล็กน้อยเพียง 0.43% สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าศักยภาพพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 60 กิโลวัตต์ ผลการศึกษาประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนพบว่า ที่ภาระการทำงาน 0-80 กิโลวัตต์ จะมีค่าระหว่าง 14.06-41.72% ซึ่งภาระการทำงาน 80 กิโลวัตต์ จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ 60 กิโลวัตต์ อยู่ 2.02% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน ที่ภาระการทำงาน 80 กิโลวัตต์ มีค่าสูงสุด

#### 5.1.6 ศึกษาลักษณะการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์

ผลการศึกษาการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระบะ โดยใช้แหล่งความร้อนจากไอเสียเครื่องที่ภาระการทำงาน 80 กิโลวัตต์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลระหว่าง 125-135 องศาเซลเซียส และความสูงเชื้อเพลิงในการอบแห้ง 50 เซนติเมตร พบว่า ไม้ยูคาลิปตัสสับมีความชื้นก่อนอบแห้ง 35.6-46.7%wb ส่วนเห้งน้ำมันสำปะหลังสับมีค่า 50.2-55.1%wb เวลาที่ในการอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการคือ 15 %wb ไม้ยูคาลิปตัสสับใช้เวลา 2-3.5 ชั่วโมง เห้งน้ำมันสำปะหลังสับใช้เวลา 4.5-5 ชั่วโมง ทำให้ทราบถึงปริมาณความชื้นจะสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ในส่วนการใช้พลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพรวมการอบแห้งของไม้ยูคาลิปตัสสับจะมีค่า 4.11-4.33% MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> และ 57.18-59.98% ตามลำดับ สำหรับการอบแห้งเห้งน้ำมันสำปะหลังสับมีค่า 4.05-4.08 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> และ 60.86-61.31% จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมการอบแห้งค่อนข้างสูงน่าจะมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งสูง จึงทำให้น้ำภายในเชื้อเพลิงชีวมวลระเหยออกได้ง่าย และมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนรอบท่อลมร้อนจึงทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

#### 5.1.7 ประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมดหรือ เรียกว่าอีกอย่างว่า ประสิทธิภาพรวมของโรงไฟฟ้าชีวมวล ผลการศึกษาพบว่าในภาระการทำงานที่ 80 กิโลวัตต์ ในกรณีไม่พิจารณาความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์โรงไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพรวมเท่ากับ 17.55% และในกรณีพิจารณาความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์จะทำให้ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นเป็น 27.46%

## 5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

1) จากการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์มาอบแห้งเชื้อเพลิง ชีวมวลพบว่าสามารถใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพดี โดยเครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนประเภทนี้สามารถใช้ในการอบแห้งวัสดุประเภทอื่นได้อีก เช่น ใช้ในการอบแห้งถ่านอัดแท่งแต่ต้องมีการปรับปรุงเครื่องอบแห้งให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานก่อน

2) จากข้อมูลการศึกษาการนำไอเสียมาเป็นแหล่งความร้อนในการอบแห้งเชื้อเพลิง ชีวมวลพบว่า ขนาดของโรงไฟฟ้าชีวมวล 100 กิโลวัตต์ สามารถอบแห้งเชื้อเพลิงได้ประมาณ 2.7-3.6 ตันต่อวัน (450-500 กิโลกรัมต่อ 4 ชั่วโมง) โดยมีความชื้น 15%wb แต่สมมติว่าขนาดกำลังการผลิตของโรงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 1000 กิโลวัตต์ (1 MW) เราสามารถนำความร้อนจากไอเสียมาใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิง ได้อย่างน้อย 10 เท่า คือ 27-36 ตันต่อวันหรือมากกว่า

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) จากการศึกษาสมดุลพลังงานภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า นอกจากความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์พบว่า ความร้อนที่ออกมาพร้อมกับน้ำระบายความร้อนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สมควรทำการศึกษาเพิ่มเติมอีก

2) ในการศึกษาการใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ออบแห้งถึงแม้ไอเสียจะไม่มีผลต่อเชื้อเพลิงชีวมวลแต่สำหรับผู้ปฏิบัติงานจริงอาจเกิดเขม่าและควันที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของผู้ปฏิบัติงาน ควรมีการป้องกันและออกแบบระบายลมร้อนของเครื่องอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น



## รายการอ้างอิง

- กรรณิการ์ มณีบุญ. (2549). การจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งลำไยแบบใต้หวั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- กฤษฎดา กิมเส็ง. (2534). ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมจากเครื่องยนต์ใช้ก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ณรงค์ฤทธิ์ มูลเจริญ. (2548). การนำความร้อนทิ้งจากไอเสียจากการผลิตไฟฟ้าก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกร  
มาใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
พลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ณัฐธิชา มะโน. (2548). ศักยภาพการใช้แก๊สชีวภาพจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังในการผลิตไฟฟ้าและ  
ความร้อนร่วม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทิพย์สุภินทร์ หินซุย ปภัส ชนะโรค และ วีรชัย ออาจหาญ. (2551). การศึกษามลพิษและของเสียจาก  
โรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 9. (หน้า 188). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ทิพย์สุภินทร์ หินซุย. (2550). การศึกษาการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตพลังงาน  
โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน: กรณีศึกษากากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม  
ฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปรีชา ศิริชาญ. (2544). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พวงศักดิ์ จุลยุเสน และ วีรชัย ออาจหาญ. (2551). ระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอดโดยใช้ความร้อน  
เหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 9. (หน้า 176). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- วีรชัย ออาจหาญ และคณะ. (2551). โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร.  
รายงานการวิจัย. การกิจโครงการและประสานงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

- สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย. (2546). การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้  
แก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.  
สายสวาท กุลวัฒนาพร มาลี น้าใจหนึ่ง และ กนกพร เนียมศรี. (2549). การควบคุมแมลงศัตรูผลิตผล  
เกษตร.ข่าวสารเทคโนโลยีสำหรับชนบท สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.  
(97): 79-83.
- Alexander K. (2002). **Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal  
of Municipal Solid Wastes**. The degree of M.S. in Earth Resources, Engineering.  
Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (1991). **Standard test methods for gross  
calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter, ASTM D 2015-77**.  
Philadelphia, Pa, USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (1991). **Standard methods for chemical  
analysis of wood char coal, ASTM D1762-84**. Philadelphia, Pa, USA.
- Belgiorno V., Feo D. G., Rocca D.C. and Napoli R.M.A. (2003). Energy from gasification of solid  
wastes. **Waste Management**. (23): 1-15.
- Bhattacharya, S.C., Hla S. S., and Pham, H. L. (2001). A study on a multi-stage hybrid gasifier  
engine system. **Biomass and Bioenergy**. 21(6): 445-460.
- Boocock, D.B.G., Konar S.M., Makay A., Cheung P.T.C. and Lui J. (1992). Fuels and chemicals  
from sewage sludge: The production of alkanes and alkenes by the pyrolysis of triglycerides  
over activated alumina. **Fuel**. 71: 1291-1297.
- Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technology (CADDET). (1998).  
Direct use of engine exhaust in drying furnace. **CADDET Energy Efficiency**. Sittard,  
Netherlands.
- Jain, A.K., Sharma, S.K., and Singh, D. (2002). Development of a kinetic model for designing throat  
less gasifier. **Indian Chemical Engineer**. 44 (4): 232-240.
- Kamke, F.A., and Casey L.J. (1988). Gas pressure and temperature in the mat during flakeboard  
manufacture. **Forest Products Journal**. 38: 41-43.
- Lowery D.P. (1979). Vapor pressure generated in wood during drying. **Wood science**. 5: 73-80.

- Pang S., and A.N. Haslett. High-temperature Kiln Drying of Softwood Timber: The Role of Mathematical Modelling, I an Turner and A run . Mujumdar (editors). **Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology** . (pp. 179-219). NewYork: MARCEL DEKKER.
- Skar C. (1988). **Wood-water Relations**. Berlin: Spinger.
- Wade A. and Amos. (1998). **Report on Biomass Drying Technology**. Midwest research Institute for the U.S.: Department of Energy.
- Yodoyard P., Chullabodhi C., and Therdyothin A. (1997). How to estimate a correct buyback rate from diesel cycle and gas turbine cogeneration and the Appropriate Measures to project the environment in Thailand. **RERIC International Energy Journal**. 19(2).

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

## วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

### ก1. การหาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

#### ก1.1 ความหนาแน่นก่อนการอัด

การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะขนาด 50 x 50 x 50 cm<sup>3</sup> นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล ค่ามวลของเชื้อเพลิงต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน ดังสมการที่ (ก1)

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass (kg)}}{\text{Volume (m}^3\text{)}} \quad (\text{ก1})$$

#### ก1.2 ความชื้น

คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวล โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desicator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบ น้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณ ดังสมการที่ (ก2)

$$M(\text{wb}) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{W} \quad (\text{ก2})$$

เมื่อ

M (wb) คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet Basis)
$W_1$ คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
$W_2$ คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)
W คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

## ก2. การหาค่าประกอบแบบประมาณของชีวมวลและเถ้า (Proximate Analysis)

การหาค่าประกอบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (Ash) ปริมาณสารระเหย (Volatile Mater) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

### ก2.1 ความชื้น

คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักชีวมวลแห้ง โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (Desiccator) ที่ไว้ประมาณ 15 นาที แล้วนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝามีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณ ดังสมการที่ (ก3)

$$M(db) = 100 \times \frac{(W_1 - W_2)}{(W_2 - W_0)} \quad (ก3)$$

เมื่อ

M (db)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis)
$W_0$	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
$W_1$	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (กรัม)
$W_2$	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (กรัม)

### ก2.2 เถ้า (Ash)

- เเผาครุชเชิลพอร์ซเลน (Porcelain Crucible) พร้อมฝาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชเชิลพอร์ซเลนประมาณ 1 กรัม
- นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือรอจนน้ำหนักถ้ำคงที่
- นำครุชเชิลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณ ดังสมการที่ (ก4)

$$A = 100 \times \frac{(W_3 - W_4)}{W} \quad (\text{ก4})$$

เมื่อ

A	คือ	ร้อยละของเถ้า
$W_3$	คือ	น้ำหนักของครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (กรัม)
$W_4$	คือ	น้ำหนักของครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)

### ก2.3 ปริมาณสารระเหย

- เผาครูชีเบิลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเคสิเกเตอร์ แล้วทำการชั่งน้ำหนักของครูชีเบิลพร้อมฝานและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครูชีเบิลประมาณ 1 กรัม
- ปิดฝาคูชีเบิลพอร์ชเลนให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อน โดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- หย่อนครูชีเบิลพอร์ชเลนให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- หย่อนครูชีเบิลพอร์ชเลนให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 นาที
- นำครูชีเบิลพอร์ชเลนออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเคสิเกเตอร์ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณ ดังสมการที่ (ก5)

$$V = 100 \times \frac{(W_5 - W_6)}{W} \quad (ก5)$$

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
$W_5$	คือ	น้ำหนักของครูชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (กรัม)
$W_6$	คือ	น้ำหนักของครูชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (กรัม)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

### ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (ก6)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละของความชื้น} - \text{ร้อยละของแฉะ} - \text{ร้อยละของสารระเหย} \quad (ก6)$$



## ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific Value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างตัวอย่างแห้งบดละเอียดอัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (Ignition Wire) ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบ์ปิดฝา อัดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน  $30 \text{ kg/cm}^3$  ประมาณ 5 นาที แล้วประกอบเข้าในถัง (Jacket) เต็มน้ำ ประมาณ 1800 มิลลิลิตร กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่างตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการ บอมบ์ Benzoic Acid มาตรฐาน

ค่าทางความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิงเนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิงจำพวกไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจนแล้ว ผลของการสันดาปจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (ซึ่งอยู่ในรูปของไอน้ำ) ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิง โดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปทำการชั่งน้ำหนักให้ละเอียด แล้วนำมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันภายใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = mc_p \Delta T \quad (ก7)$$

เมื่อ

Q	คือ	ปริมาณความร้อน (MJ/Kg)
m	คือ	มวลของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (kg)
$c_p$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (4.186 KJ/kg)
$\Delta T$	คือ	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ( $^{\circ}\text{C}$ )

### ก3. การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (Ultimate Analysis)

#### ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างตัวอย่างบดให้ละเอียด ซึ่งปริมาณที่แน่นอนประมาณ 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่ อุณหภูมิประมาณ 925 องศาเซลเซียส ภายใต้ออกซิเจนบริสุทธิ์ ผ่านเข้าไปใน Reagent CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O N<sub>2</sub> ความคุมความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรให้คงที่

#### ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงชีวมวลหาได้จากการคำนวณดังสมการที่ (ก8)

$$\text{ปริมาณออกซิเจน (\%)} = 100 - (\% \text{คาร์บอน} - \% \text{ไฮโดรเจน} - \% \text{ไนโตรเจน} - \% \text{ซัลเฟอร์}) \quad (\text{ก8})$$

#### ก3.3 องค์ประกอบของธาตุโลหะหนักและคลอรีน

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ คือ เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer ((EDXRF รุ่น ED 2000) ที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ครอบคลุม ตั้งแต่ธาตุ Na จนถึงธาตุ U ในระดับ 0.01-100%) โดยนำตัวอย่างตัวอย่างที่บดให้ละเอียด ซึ่งปริมาณ ใส่ในถ้วยชั่งสาร แล้วนำไปอัดตัวอย่างโดยใช้เครื่องเตรียมตัวอย่าง EDXRF จากนั้นนำไปวิเคราะห์ โดยเครื่องมือดังกล่าว

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองและข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์

ตารางที่ ข1 ข้อมูลผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีววมวลที่ภาระงานต่าง ๆ

ภาระงานเครื่องยนต์ ผลิตไฟฟ้า (kW)	ครั้งที่	คุณสมบัติของแก๊สชีววมวล				
		สัดส่วนโดยปริมาตรเฉลี่ย (%)				
		CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0	1	17.33	20.04	1.96	48.55	14.95
	2	16.62	20.19	3.62	44.47	16.31
	เฉลี่ย	16.98	20.11	2.79	46.51	15.63
20	1	16.00	19.96	2.61	47.74	15.66
	2	17.13	18.97	2.33	48.13	14.56
	เฉลี่ย	16.57	19.47	2.47	47.94	15.11
40	1	16.67	19.00	2.07	49.42	14.52
	2	19.02	18.17	1.46	50.40	13.21
	เฉลี่ย	17.85	18.58	1.77	49.91	13.87
60	1	17.66	19.66	2.37	48.81	15.26
	2	17.53	18.49	3.07	46.94	15.69
	เฉลี่ย	17.60	19.07	2.72	47.87	15.47
80	1	18.57	18.93	3.13	46.55	15.34
	2	18.78	18.57	3.49	45.79	15.79
	เฉลี่ย	18.67	18.75	3.31	46.17	15.57

ตารางที่ ข2 ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลพลังงานภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

กำลังการผลิต ไฟฟ้า (kW)	พลังงานแก๊สชีววมวล		สูญเสียกับการผลิตไฟฟ้า				สูญเสียกับหม้อน้ำหล่อเย็น			สูญเสียกับไอเสีย		
	HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /h)	A	V	cos $\phi$	P	Flow (L/min.)	T <sub>out</sub> (°C)	T <sub>in</sub> (°C)	Flow (m <sup>3</sup> /min.)	T <sub>ex</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)
0	6.01	163.2	0	0	0	0	349.3	37	39	13.97	243	24
		164.5	0	0	0	0	349.3	37	39	13.47	241	24
		163.5	0	0	0	0	349.3	37	39	14.32	245	24
	เฉลี่ย	163.7	0	0	0	0	349.3	37	39	13.92	243	24
20	5.74	169.5	38	380	0.83	20	349.3	42	44	14.18	286	27
		170.5	39	380	0.8	20	349.3	42	44	14.66	288	27
		170.7	37	380	0.85	20	349.3	42	44	14.22	287	27
	เฉลี่ย	170.2	38	380	0.83	20	349.3	42	44	14.35	287	27
40	5.50	186.7	68	410	0.84	40	349.3	48	50	14.22	344	28
		187.2	67	410	0.86	40	349.3	48	50	14.19	345	28
		186.5	67	410	0.86	40	349.3	48	50	14.36	345	28
	เฉลี่ย	186.8	67	410	0.85	40	349.3	48	50	14.26	345	28

ตารางที่ ข2 ข้อมูลวิเคราะห์สมดุลพลังงานภายในเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (ต่อ)

กำลังการผลิต ไฟฟ้า (kW)	พลังงานแก๊สชีววมวล		สูญเสียกับการผลิตไฟฟ้า				สูญเสียกับหม้อน้ำหล่อเย็น			สูญเสียกับไอเสีย		
	HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /h)	A	V	cos $\phi$	P	Flow (L/min.)	T <sub>out</sub> (°C)	T <sub>in</sub> (°C)	Flow (m <sup>3</sup> /min.)	T <sub>ex</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)
60	5.92	192.2	100	410	0.85	60	349.3	54	56	14.93	395	33
		191.7	100	410	0.85	60	349.3	54	56	16.30	394	33
		191.5	105	410	0.81	60	349.3	54	56	16.54	395	33
	เฉลี่ย	191.8	102	410	0.84	60	349.3	54	56	15.92	395	33
80	6.27	213.7	140	410	0.81	80	349.3	59	62	17.36	432	33
		214.7	142	410	0.80	80	349.3	59	62	18.43	433	33
		214.2	141	410	0.80	80	349.3	59	62	17.24	432	33
	เฉลี่ย	214.2	141	410	0.80	80	349.3	59	62	17.68	432	33

ตารางที่ ข3 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสสับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของไม้ยูคาลิปตัสสับที่เวลาต่าง ๆ									
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
A1	62.67	97.34	55.32	64.80	3.40	63.75	1.72	63.66	1.58	63.62	1.52
A2	46.26	72.96	57.72	47.42	2.51	47.02	1.64	47.00	1.60	47.00	1.60
A3	53.86	90.81	68.60	57.89	7.48	56.91	5.66	56.65	5.18	56.48	4.86
A4	53.36	83.21	55.94	53.97	1.14	53.48	0.22	53.47	0.21	53.47	0.21
A5	50.21	79.23	57.80	51.54	2.65	51.05	1.67	51.04	1.65	51.04	1.65
เฉลี่ย	53.27	84.71	59.08	55.12	3.44	54.44	2.19	54.36	2.04	54.32	1.97
B1	102.17	152.57	49.33	105.91	3.66	103.30	1.11	103.29	1.10	103.29	1.10
B2	60.92	97.66	60.31	70.83	16.27	61.78	1.41	61.78	1.41	61.78	1.41
B3	51.99	82.45	58.59	60.99	17.31	52.41	0.81	52.28	0.56	52.04	0.10
B4	66.65	102.91	54.40	76.38	14.60	66.87	0.33	66.79	0.21	66.77	0.18
B5	53.88	86.97	61.41	59.16	9.80	54.53	1.21	54.49	1.13	54.47	1.10
เฉลี่ย	67.12	104.51	56.81	74.65	12.33	67.78	0.97	67.73	0.88	67.67	0.78

ตารางที่ ข3 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสสับความชื้นที่ 1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของไม้ยูคาลิปตัสสับที่เวลาต่าง ๆ									
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
C1	39.95	66.27	65.88	50.93	27.48	42.62	6.68	40.36	1.03	40.03	0.20
C2	48.78	76.58	56.99	71.50	46.58	52.47	7.56	50.03	2.56	49.79	2.07
C3	54.60	87.38	60.04	84.16	54.14	57.56	5.42	55.12	0.95	54.97	0.68
C4	54.04	86.75	60.53	76.36	41.30	54.62	1.07	54.30	0.48	54.10	0.11
C5	54.41	85.65	57.42	72.89	33.96	54.58	0.31	54.56	0.28	54.53	0.22
เฉลี่ย	50.36	80.53	60.17	71.17	40.69	52.37	4.21	50.87	1.06	50.68	0.66



ตารางที่ ข4 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสสับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของไม้ยูคาลิปตัสสับที่เวลาต่าง ๆ											
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4		ชั่วโมงที่ 5	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
A1	37.28	60.87	63.28	51.09	37.04	44.12	18.35	39.83	6.84	38.76	3.97	37.74	1.23
A2	26.16	50.01	91.17	36.33	38.88	29.60	13.15	27.99	7.00	27.50	5.12	27.09	3.56
A3	25.57	54.93	114.82	34.97	36.76	29.51	15.41	27.29	6.73	26.63	4.15	25.92	1.37
A4	34.04	66.81	96.27	45.62	34.02	37.41	9.90	34.74	2.06	34.31	0.79	34.27	0.68
A5	31.31	51.99	66.05	38.26	22.20	34.90	11.47	32.79	4.73	31.98	2.14	31.69	1.21
เฉลี่ย	30.87	56.92	86.32	41.25	33.78	35.11	13.65	32.53	5.47	31.84	3.23	31.34	1.61
B1	31.02	51.74	66.80	47.41	52.84	43.92	41.59	38.67	24.66	31.22	0.64	31.20	0.58
B2	35.89	65.39	82.20	60.76	69.30	46.85	30.54	41.97	16.94	37.09	3.34	37.07	3.29
B3	38.97	72.53	86.12	69.42	78.14	49.48	26.97	45.29	16.22	40.60	4.18	40.43	3.75
B4	31.43	60.09	91.19	57.87	84.12	37.05	17.88	35.48	12.89	33.81	7.57	33.80	7.54
B5	39.17	75.79	93.49	72.06	83.97	48.95	24.97	44.65	13.99	42.55	8.63	41.55	6.08
เฉลี่ย	35.30	65.11	83.96	61.50	73.67	45.25	28.39	41.21	16.94	37.05	4.87	36.81	4.25

ตารางที่ ข4 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างไม้อยูคาลิปดัดสับความชื้นที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของไม้อยูคาลิปดัดสับที่เวลาต่าง ๆ											
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4		ชั่วโมงที่ 5	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
C1	41.62	77.29	85.70	76.37	83.49	73.67	77.01	51.38	23.45	45.72	9.85	43.70	5.00
C2	48.21	90.97	88.70	88.64	83.86	70.90	47.06	57.49	19.25	49.95	3.61	48.81	1.24
C3	38.46	72.46	88.40	71.90	86.95	66.62	73.22	57.61	49.79	40.95	6.47	39.82	3.54
C4	46.36	85.64	84.73	85.39	84.19	71.08	53.32	60.18	29.81	49.21	6.15	47.17	1.75
C5	50.29	90.54	80.04	90.35	79.66	77.40	53.91	65.94	31.12	53.86	7.10	50.79	0.99
เฉลี่ย	44.99	83.38	85.51	82.53	83.63	71.93	60.90	58.52	30.68	47.94	6.64	46.06	2.50

ตารางที่ ข5 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างเหง้ำมันสำปะหลังสับความชื้นที่ 1

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของเหง้ำมันสำปะหลังสับที่เวลาต่าง ๆ													
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4		ชั่วโมงที่ 5		ชั่วโมงที่ 6	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
A1	43.22	88.56	104.91	50.39	16.59	46.39	7.33	44.22	2.31	43.54	0.74	43.51	0.67	43.50	0.65
A2	50.01	95.71	87.63	65.10	27.62	60.53	18.66	57.05	11.84	54.32	6.49	53.98	5.82	53.23	4.35
A3	51.86	106.24	104.86	75.98	46.51	68.90	32.86	62.71	20.92	56.77	9.47	55.64	7.29	53.12	2.43
A4	61.14	126.32	106.61	87.22	42.66	78.89	29.03	71.90	17.60	65.77	7.57	63.82	4.38	63.08	3.17
A5	53.08	107.51	102.54	69.83	31.56	64.43	21.38	60.17	13.36	57.02	7.42	55.76	5.05	54.66	2.98
เฉลี่ย	51.86	104.87	101.31	69.70	32.99	63.83	21.85	59.21	13.21	55.48	6.34	54.54	4.64	53.52	2.72
B1	59.20	116.74	97.20	94.84	60.20	76.75	29.65	70.51	19.10	65.95	11.40	62.81	6.10	61.98	4.70
B2	87.24	171.59	96.69	146.43	67.85	122.71	40.66	114.16	30.86	97.54	11.81	91.63	5.03	89.07	2.10
B3	57.15	108.19	89.31	75.74	32.53	68.22	19.37	62.61	9.55	59.08	3.38	58.34	2.08	58.11	1.68
B4	49.00	102.76	109.71	65.28	33.22	59.00	20.41	54.59	11.41	51.76	5.63	51.23	4.55	50.44	2.94
B5	46.92	100.56	114.32	77.20	64.54	67.73	44.35	61.70	31.50	56.58	20.59	51.46	9.68	47.38	0.98
เฉลี่ย	59.90	119.97	101.45	91.90	51.67	78.88	30.89	72.71	20.48	66.18	10.56	63.09	5.49	61.40	2.48

ตารางที่ ข5 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างเหง้ามันสำปะหลังสับที่ความชื้นที่ 1 (ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของเหง้ามันสำปะหลังสับที่เวลาต่าง ๆ													
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4		ชั่วโมงที่ 5		ชั่วโมงที่ 6	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
C1	52.57	106.57	102.72	98.65	87.65	80.97	54.02	65.02	23.68	60.62	15.31	56.33	7.15	54.91	4.45
C2	63.30	118.53	87.25	99.01	56.41	83.86	32.48	68.24	7.80	65.57	3.59	64.18	1.39	64.03	1.15
C3	78.13	161.08	106.17	146.81	87.90	130.15	66.58	110.21	41.06	100.27	28.34	90.20	15.45	81.95	4.89
C4	59.36	123.19	107.53	110.42	86.02	91.61	54.33	75.74	27.59	70.98	19.58	64.72	9.03	61.20	3.10
C5	73.78	151.89	105.87	146.66	98.78	116.11	57.37	98.71	33.79	91.65	24.22	86.53	17.28	76.57	3.78
เฉลี่ย	65.43	132.25	101.91	120.31	83.35	100.54	52.96	83.58	26.79	77.82	18.21	72.39	10.06	67.73	3.47

ตารางที่ ข6 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างเหง้ามันสำปะหลังสับความชื้นที่ 2

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของเหง้ามันสำปะหลังสับที่เวลาต่าง ๆ													
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4		ชั่วโมงที่ 5		ชั่วโมงที่ 6	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
A1	46.18	95.88	107.62	64.45	39.56	54.57	18.17	48.68	5.41	47.54	2.94	46.82	1.39	46.61	0.93
A2	43.25	94.57	118.66	73.62	70.22	61.89	43.10	51.75	19.65	47.84	10.61	45.67	5.60	43.86	1.41
A3	47.83	101.79	112.82	77.96	62.99	63.86	33.51	55.14	15.28	52.40	9.55	50.45	5.48	48.85	2.13
A4	52.13	111.69	114.25	82.06	57.41	65.87	26.36	57.52	10.34	55.60	6.66	53.44	2.51	52.65	1.00
A5	35.72	75.84	112.32	52.01	45.60	44.51	24.61	39.33	10.11	36.92	3.36	36.75	2.88	36.06	0.95
เฉลี่ย	45.02	95.95	113.13	70.02	55.16	58.14	29.15	50.48	12.16	48.06	6.63	46.63	3.57	45.61	1.28
B1	45.00	103.60	130.20	92.60	105.80	67.70	50.40	54.10	20.20	49.90	10.90	47.00	4.40	45.80	1.80
B2	55.40	106.80	92.80	99.70	80.00	91.50	65.10	75.70	36.70	67.60	22.00	61.20	10.40	56.80	2.50
B3	48.00	103.60	115.90	95.50	99.10	78.60	63.80	66.30	38.20	60.30	25.80	56.20	17.20	50.80	5.90
B4	47.00	96.40	105.30	78.90	68.00	62.70	33.50	53.20	13.20	49.60	5.60	48.50	3.30	47.70	1.60
B5	43.60	102.30	134.80	82.30	88.70	68.50	57.20	57.70	32.40	53.60	22.90	50.60	16.10	45.20	3.70
เฉลี่ย	47.80	102.60	115.80	89.80	88.30	73.80	54.00	61.40	28.10	56.20	17.40	52.70	10.30	49.30	3.10

ตารางที่ ข6 ข้อมูลน้ำหนักและความชื้นของตัวอย่างเหง้ามันสำปะหลังสับความชื้นที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักแห้ง (g)	น้ำหนักและความชื้นของเหง้ามันสำปะหลังสับที่เวลาต่าง ๆ													
		ชั่วโมงที่ 0		ชั่วโมงที่ 1		ชั่วโมงที่ 2		ชั่วโมงที่ 3		ชั่วโมงที่ 4		ชั่วโมงที่ 5		ชั่วโมงที่ 6	
		W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)	W (g)	M (%db)
C1	56.82	118.81	109.10	114.26	101.09	97.84	72.19	79.19	39.37	72.12	26.93	66.01	16.17	59.10	4.01
C2	51.99	115.26	121.70	114.40	120.04	97.08	86.73	83.40	60.42	73.85	42.05	57.39	10.39	53.02	1.98
C3	57.54	121.61	111.35	113.20	96.73	94.77	64.70	74.47	29.42	69.12	20.13	66.02	14.74	60.11	4.47
C4	51.59	108.63	110.56	99.11	92.11	86.13	66.95	74.65	44.70	66.27	28.46	62.08	20.33	53.92	4.52
C5	48.73	106.18	117.89	98.32	101.76	84.32	73.04	65.39	34.19	57.78	18.57	52.83	8.41	50.08	2.77
เฉลี่ย	53.33	114.10	114.12	107.86	102.35	92.03	72.72	75.42	41.62	67.83	27.23	60.87	14.01	55.25	3.55

ตารางที่ ข7 สมบัติทางความร้อนของน้ำ

T (°C)	p (kN/m <sup>2</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	v 10 <sup>-3</sup> (m <sup>3</sup> /kg)	c <sub>p</sub> (kJ/kg°K)	h <sub>fg</sub> (kJ/kg)
0 (Ice)	-	916.8	-	-	-
0.01	0.6	999.8	1.00	4.210	2501.3
4	0.9	1000.0	-	-	-
5	0.9	1000.0	1.00	4.204	2489.6
10	1.2	999.8	1.00	4.193	2477.7
15	1.7	999.2	1.00	4.186	2465.9
20	2.3	998.3	1.00	4.183	2454.1
25	3.2	997.1	1.00	4.181	2442.3
30	4.3	995.7	1.00	4.179	2430.5
35	5.6	994.1	1.01	4.178	2418.6
40	7.7	992.3	1.01	4.179	2406.7
45	9.6	990.2	1.01	4.181	2394.8
50	12.5	988.0	1.01	4.182	2382.7
55	15.7	986.0	1.01	4.183	2370.7
60	20.0	983.0	1.02	4.185	2358.5
65	25.0	980.0	1.02	4.188	2346.2
70	31.3	978.0	1.02	4.191	2333.8
75	38.6	975.0	1.03	4.194	2321.4
80	47.5	972.0	1.03	4.198	2308.8

ตารางที่ ข7 สมบัติทางความร้อนของน้ำ (ต่อ)

T (°C)	p (kN/m <sup>2</sup> )	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	v 10 <sup>-3</sup> (m <sup>3</sup> /kg)	c <sub>p</sub> (kJ/kg°K)	h <sub>fg</sub> (kJ/kg)
85	57.80	968	1.03	4.203	2296.0
90	70.00	965	1.04	4.208	2283.2
95	84.50	962	1.04	4.213	2270.2
100	101.33	958	1.04	4.219	2257.0
105	121.00	954	1.05	4.226	2243.7
110	143.00	951	1.05	4.233	2230.2
115	169.00	947	1.06	4.240	2216.5
120	199.00	943	1.06	4.248	2202.6
125	228.00	939	1.06	4.260	2188.5
130	270.00	935	1.07	4.270	2174.2
135	313.00	931	1.07	4.280	2159.6
140	361.00	926	1.08	4.290	2144.7
145	416.00	922	1.08	4.300	2129.6
150	477.00	918	1.09	4.320	2114.3
155	543.00	912	1.10	4.340	2098.6
160	618.00	907	1.10	4.350	2082.6
165	701.00	902	1.11	4.360	2066.2
170	792.00	897	1.11	4.380	2049.5
175	890.00	893	1.12	4.390	2032.4
180	1000.00	887	1.13	4.420	2015.0
185	1120.00	882	1.13	4.450	1997.1
190	1260.00	876	1.14	4.460	1978.8



ตารางที่ ข7 สมบัติทางความร้อนของน้ำ (ต่อ)

T (°C)	p (kN/m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	v 10 <sup>-3</sup> (m <sup>3</sup> /kg)	$c_p$ (kJ/kg°K)	$h_{fg}$ (kJ/kg)
195	1400	870	1.15	-	1960.0
200	1550	864	1.16	4.51	1940.7
220	-	840	-	4.63	1921.0
225	2550	834	1.20	4.65	1900.7
240	-	814	-	4.78	1766.5
250	3990	799	125.00	4.87	1716.2
260	-	784	-	4.98	1662.5
275	5950	756	1.32	5.20	1574.9
300	8600	714	1.40	5.65	1404.9
325	12130	654	1.53	6.86	1238.6
350	16540	575	1.74	10.10	893.4
360	18680	528	1.90	14.60	720.0

ตารางที่ ข8 คุณสมบัติของแก๊สฮีเลียม ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
144	0.33790	5.2	125.5x10 <sup>-7</sup>	37.11x10 <sup>-6</sup>	0.0928	0.5275x10 <sup>-4</sup>	0.700
200	0.24350	5.2	156.6	64.38	0.1177	0.9288	0.694
255	0.19060	5.2	181.7	95.50	0.1357	1.3675	0.700
366	0.13280	5.2	230.5	173.60	0.1691	2.4490	0.710
477	0.10204	5.2	275.0	296.30	0.1970	3.1760	0.720
589	0.08282	5.2	311.3	375.80	0.2250	5.2150	0.720
700	0.07032	5.2	347.5	494.20	0.2510	6.6610	0.720
800	0.06023	5.2	381.7	634.10	0.2570	8.7740	0.720

ตารางที่ ๙ คุณสมบัติของแก๊สออกซิเจน ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
150	2.6190	0.9178	11.490 x10 <sup>-6</sup>	4.387x10 <sup>-6</sup>	0.01367	0.05688x10 <sup>-4</sup>	0.773
200	1.9559	0.9131	14.850	7.593	0.01824	0.10214	0.745
250	1.5618	0.9157	17.870	11.450	0.22259	0.15794	0.725
300	1.3007	0.9203	20.630	15.860	0.02676	0.22353	0.709
350	1.1133	0.9291	23.160	20.800	0.03070	0.29680	0.702
400	0.9755	0.9420	25.540	26.180	0.03461	0.37680	0.695
450	0.8682	0.9567	27.770	31.990	0.03828	0.46090	0.694
500	0.7801	0.9722	29.910	38.340	0.04173	0.55020	0.697
550	0.7096	0.9881	31.970	45.050	0.04517	0.64100	0.700

ตารางที่ ๑๐ คุณสมบัติของแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
150	0.16371	12.602	5.0595 x10 <sup>-6</sup>	34.18x10 <sup>-6</sup>	0.0981	0.475x10 <sup>-4</sup>	0.718
200	0.12270	13.540	6.813	55.53	0.1282	0.772	0.719
250	0.09819	14.059	7.919	80.64	0.1561	1.130	0.713
300	0.08185	14.314	8.963	109.50	0.1820	1.554	0.706
350	0.07016	14.436	9.954	141.90	0.2060	2.031	0.697
400	0.06135	14.491	10.864	177.10	0.2280	2.568	0.690
450	0.05462	14.499	11.779	215.60	0.2510	3.164	0.682
500	0.04918	14.507	12.636	257.00	0.2720	3.817	0.675
550	0.04469	14.532	13.475	301.60	0.2920	4.516	0.688
600	0.04085	14.537	14.285	349.70	0.3150	5.306	0.664
700	0.03492	14.754	15.890	455.10	0.3510	6.903	0.659
800	0.03060	14.675	17.400	569.00	0.3840	8.563	0.664
900	0.02723	14.821	18.780	690.00	0.4120	10.217	0.676

ตารางที่ 11 คุณสมบัติของแก๊สแอมโมเนีย ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
273	0.7929	2.177	9.353 x10 <sup>-6</sup>	1.18 x10 <sup>-6</sup>	0.0220	0.1308x10 <sup>-4</sup>	0.90
323	0.6487	2.177	11.035	1.70	0.0270	0.1920	0.88
373	0.5590	2.236	12.886	2.30	0.0327	0.2619	0.87
423	0.4934	2.315	14.672	2.97	0.0391	0.3432	0.87
473	0.4405	2.395	16.490	3.74	0.0467	0.4421	0.84

ตารางที่ 12 คุณสมบัติของแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
200	1.7108	1.0429	12.947x10 <sup>-6</sup>	7.568x10 <sup>-6</sup>	0.01824	0.1022x10 <sup>-4</sup>	0.747
300	1.1421	1.0408	17.84	15.63	0.02620	0.22044	0.713
400	0.8538	1.0459	21.98	25.74	0.03335	0.37340	0.691
500	0.6824	1.0555	25.70	37.66	0.03984	0.55300	0.684
600	0.5687	1.0756	29.11	51.19	0.04580	0.74860	0.686
700	0.4934	1.0969	32.13	65.13	0.05123	0.94660	0.691
800	0.4277	1.1225	34.84	81.46	0.05609	1.16850	0.700
900	0.3796	1.1464	37.49	91.06	0.06070	1.39460	0.711
100	0.3412	1.1677	40.00	117.20	0.06475	1.62500	0.724
1100	0.3108	1.1857	42.28	136.00	0.06850	1.85910	0.736
1200	0.2851	1.2037	44.50	156.10	0.07184	2.09320	0.748

ตารางที่ ข13 คุณสมบัติของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
220	2.4733	0.783	11.10 x10 <sup>-6</sup>	4.490 x10 <sup>-6</sup>	0.010805	0.05688x10 <sup>-4</sup>	0.181
250	2.1675	0.804	14.850	5.813	0.012884	0.07401	0.793
300	1.7973	0.871	17.870	8.321	0.016572	0.10588	0.770
350	1.5362	0.900	20.630	11.190	0.020470	0.14808	0.755
400	1.3424	0.942	23.160	14.390	0.024610	0.19463	0.738
450	1.1918	0.980	25.540	17.900	0.028970	0.24813	0.721
500	1.0732	1.013	27.770	21.670	0.033520	0.30840	0.702
550	0.9739	1.047	29.910	25.740	0.038210	0.37500	0.685
600	0.8938	1.076	31.970	30.020	0.043110	0.44830	0.668

ตารางที่ ข14 คุณสมบัติของไอน้ำ ที่อุณหภูมิใด ๆ

T (K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (kJ/kg°C)	$\mu$ (kg/m.s)	V (m <sup>2</sup> /s)	k (W/m°C)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr
380	0.5863	2.060	12.71x10 <sup>-6</sup>	2.16x10 <sup>-6</sup>	0.0246	0.203x10 <sup>-4</sup>	1.060
400	0.5542	2.014	13.44	2.42	0.0261	0.233	1.040
450	0.4902	1.980	15.52	3.11	0.0299	0.307	1.010
500	0.4450	1.985	17.04	3.86	0.0339	0.387	0.996
550	0.4005	1.997	18.84	4.70	0.0379	0.475	0.991
600	0.3652	2.026	20.67	5.66	0.0422	0.573	0.986
650	0.3380	2.056	22.47	6.64	0.0464	0.666	0.995
700	0.3140	0.285	24.26	7.72	0.0505	0.772	1.000
750	0.2931	2.119	26.04	8.88	0.0549	0.883	1.005
800	0.2739	2.152	27.86	10.20	0.0592	0.001	1.010
850	0.2579	2.160	29.69	11.52	0.0637	0.130	1.019

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

### ก1. การประเมินประสิทธิภาพของระบบ (System Efficiency)

ใช้ข้อมูลการเดินระบบที่กำลังผลิตกระแสไฟฟ้า 80 กิโลวัตต์

#### ก1.1 Specific Fuel Consumption

$$\begin{aligned} \text{Specific Fuel Consumption (kg/kWh)} &= [m_{\text{Fuel}}/P_e] \\ &= (107.1 \text{ kg/hr})/(80 \text{ kW}) \\ &= 1.34 \text{ kg/kWh} \end{aligned}$$

#### ก1.2 ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง (Calorific Value of Producer Gas)

ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (ก1)

$$CV_g = \sum X_i H_i \quad (\text{ก1})$$

เมื่อ ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล อ้างอิงตามงานวิจัยของ (Jain et al., 2002)

$$\text{CO} = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$$

$$\text{H}_2 = 13.1 \text{ MJ/Nm}^3$$

$$\text{CH}_4 = 41.2 \text{ MJ/Nm}^3$$

จากการวัดสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊ส CO H<sub>2</sub> CH<sub>4</sub> มีค่าเท่ากับ 18.67%, 18.75%, 3.31%

$$\begin{aligned} CV_g &= [(0.1875)(13.1 \text{ MJ/Nm}^3)] + [(0.1867)(13.1 \text{ MJ/Nm}^3)] + [(0.0331)(41.2 \text{ MJ/Nm}^3)] \\ &= 6.27 \text{ MJ/Nm}^3 \end{aligned}$$

### ค1.3 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification Efficiency)

$$\begin{aligned} \text{Gasification Efficiency } (\eta_{\text{gas}}) &= [(V_g \times CV_g) / (m_{\text{Fuel}} \times HHV_{\text{Fuel}})] \times 100 \\ &= \frac{[(214.2 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}})(6.27 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3})]}{[(107.1 \frac{\text{kg}}{\text{hr}})(15.32 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}})]} \times 100 \\ &= 0.818 \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{Gasification Efficiency } (\eta_{\text{gas}}) = 81.8\%$$

### ค1.4 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Electrical Efficiency)

$$\begin{aligned} \text{Electrical Efficiency } (\eta_{\text{electrical}}) &= [(3.6 \times P_e) / (m_{\text{Fuel}} \times HHV_{\text{Fuel}})] \times 100 \\ &= \frac{[3.6 \times 80 \text{ kW}]}{[(107.1 \frac{\text{kg}}{\text{hr}})(15.32 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}})]} \times 100 \\ &= 0.1755 \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{Electrical Efficiency } (\eta_{\text{electrical}}) = 17.55\%$$

### ค1.5 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า (Engine-generator Efficiency)

$$\begin{aligned} \text{Engine-generator Efficiency } (\eta_{\text{generator}}) &= [(3.6 \times P_e) / (V_g \times CV_g)] \times 100 \\ &= \frac{[3.6 \times 80 \text{ kW}]}{[(214.2 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}})(6.27 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3})]} \times 100 \\ &= 0.2144 \times 100 \end{aligned}$$

$$\text{Engine-generator Efficiency } (\eta_{\text{generator}}) = 21.44\%$$



## ค2. พลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า

ใช้ข้อมูลที่กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าไฟฟ้า 80 กิโลวัตต์

### ค2.1 ค่าความจุความร้อนของไอเสีย ( $C_{pex}$ )

ค่าความจุความร้อนของไอเสียอ้างอิงตามงานวิจัยของ (ณรงค์ฤทธิ์ มุลเจริญ, 2548)

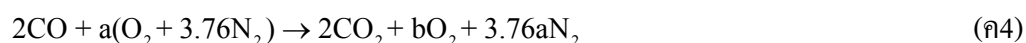
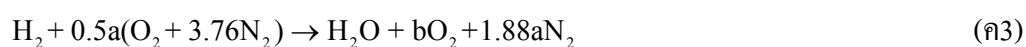
ขั้นตอนที่ 1 หาสัดส่วนทางเคมีของแก๊สชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ ค1

ตารางที่ ค1 สัดส่วนทางเคมีของแก๊สชีวมวล

ส่วนประกอบ Producer Gas	% โดยโมล	มวลโมเลกุล	น้ำหนัก (kg)	% โดยน้ำหนัก
N <sub>2</sub>	43.70	28	1,223.60	48.65
H <sub>2</sub>	18.75	2	37.50	1.49
CO	18.67	28	522.76	20.78
CH <sub>4</sub>	3.31	14	46.34	1.84
CO <sub>2</sub>	15.57	44	685.08	27.24
<b>รวม</b>	<b>100</b>		<b>2,515.28</b>	

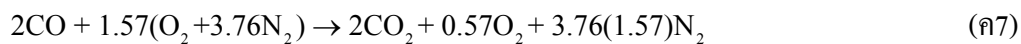
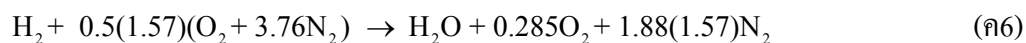
### ขั้นตอนที่ 2 คุณสมบัติการเผาไหม้

ในการเผาไหม้จะมี H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> และ CO ที่ทำปฏิกิริยา ดังสมการที่ (ค2) ถึง (ค4)



เมื่อปริมาณอากาศส่วนเกิน(Excess Air : a) โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 1.57 (57%) และปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน (Excess Oxygen : b) หาได้โดยการดุลสมการ ดังปฏิกิริยา ในสมการที่ (ค5) ถึง (ค7)





ขั้นตอนที่ 3 หาสัดส่วนของแก๊สต่าง ๆ ในไอเสีย

ตารางที่ ค2 สัดส่วนของแก๊สต่าง ๆ ในไอเสีย

จากปฏิกิริยา	เศษส่วนโมล	มวลโมเลกุล	น้ำหนัก (kg)	%โดย น้ำหนัก (%)	Kg/kg <sub>bm</sub>	Kg/kg <sub>ig</sub>	
CH <sub>4</sub>	1	16	16	1.84	0.018	0.195	
H <sub>2</sub>	1	2	2	1.49	0.015	0.745	
CO	2	28	56	41.52	0.182	0.325	
N <sub>2</sub> , ที่ไม่ทำปฏิกิริยา				48.65	0.487	0.036	
CO <sub>2</sub> , ที่ไม่ทำปฏิกิริยา				27.24	0.272	0.012	
CH <sub>4</sub> {	CO <sub>2</sub>	1	44	44	5.06	0.340	0.052
	H <sub>2</sub> O	2	18	36	4.14	0.180	0.134
	O <sub>2</sub>	1.14	32	36.48	4.20	0.780	0.081
	N <sub>2</sub>	11.81	28	39.81	4.60	1.200	0.685
H <sub>2</sub> {	H <sub>2</sub> O	1	18	18	13.41		
	O <sub>2</sub>	0.285	32	9.12	68.00		
	N <sub>2</sub>	2.95	28	82.6	61.54		
CO {	CO <sub>2</sub>	2	44	88	28.60		
	O <sub>2</sub>	0.57	32	18.24	5.93		
	N <sub>2</sub>	5.9	28	165.2	53.69		
<b>รวม (เฉพาะไอเสีย)</b>				<b>325.06</b>	<b>3.25</b>	<b>1</b>	

### ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความจุความร้อนของไอเสีย ( $C_{p_{ex}}$ )

จากข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของไอเสียที่ออกมาจากและสภาวะสิ่งแวดล้อม มีค่าเท่ากับ 432 องศาเซลเซียส และ 33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สามารถหาได้ ดังแสดงในตารางที่ ค3

ตารางที่ ค3 การหาค่าความจุความร้อน

แก๊ส, ที่อุณหภูมิ	สัดส่วน(R) (kg/kg <sub>fg</sub> )	$C_{p_{ex}}$ (kJ/kg-°C)	ผลคูณ $R \times C_{p_{ex}}$	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ปริมาตรจำเพาะ (m <sup>3</sup> /kg <sub>fg</sub> )
N <sub>2,33</sub>	0.150	1.04	0.156	1.125	0.133
CO <sub>2,33</sub>	0.084	0.87	0.073	1.766	0.048
CO <sub>2,432</sub>	0.105	1.14	0.120	0.726	0.145
H <sub>2</sub> O <sub>,432</sub>	0.055	2.09	0.115	0.312	0.176
O <sub>2,432</sub>	0.240	1.04	0.250	0.49	0.490
N <sub>2,432</sub>	0.369	1.1	0.406	0.49	0.753
รวม	1	$C_{p_{ex}}$ ,รวม= 1.12 kJ/kg-°C			1.745

### ก2.2 ค่าพลังงานความร้อนของไอเสีย

อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย เท่ากับ 1,060.56 m<sup>3</sup>/hr (โดยปริมาตร) ต้องการอัตราการไหลโดยมวล อุณหภูมิแก๊สไอเสีย 432 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิบรรยากาศ 33 องศาเซลเซียส

$$\dot{m}_{ex} = \frac{\dot{V}}{v} = 1,060.56 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1}{1.74 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} \times \frac{\text{hr}}{3,600 \text{sec}}$$

$$\dot{m}_{ex} = 0.169 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

ค่าความร้อนของไอเสีย สามารถหาได้จาก

$$Q_{\text{exhaust gas}} = \dot{m}_{ex} C_{p_{ex}} \Delta T$$

$$Q_{\text{exhaust gas}} = 0.169 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times 1.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times ^\circ\text{C}} \times (432-33)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{exhaust gas}} = 57.75 \text{ kW}$$

### ค2.3 พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทกับน้ำหล่อเย็น

อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1000 rpm เท่ากับ 349.3 L/min แต่ต้องเปลี่ยนเป็นอัตราการไหลโดยมวลก่อน

$$\dot{m}_c = \frac{\dot{V}}{v} = 349.3 \frac{\text{L}}{\text{min}} \times \frac{\text{m}^3}{1000\text{L}} \times 983.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{min}}{60\text{sec}}$$

$$\dot{m}_c = 5.72 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

ค่าความร้อนที่ถ่ายเทกับน้ำหล่อเย็น

$$Q_{\text{coolant}} = \dot{m}_c C_{p_w} (T_{C_{\text{out}}} - T_{C_{\text{in}}})$$

$$Q_{\text{coolant}} = 5.72 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \times 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times ^\circ\text{C}} \times (62-59)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{coolant}} = 71.81 \text{ kW}$$

### ค3. ประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน

ใช้ข้อมูลที่กำกับการผลิตกระแสไฟฟ้าไฟฟ้า 80 กิโลวัตต์

#### ค3.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า (Specific Fuel Consumption)

$$\text{sfc}_{\text{generator}} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{\text{generator}}}$$

$$\text{sfc}_{\text{generator}} = \frac{214.1 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{80\text{kW}}$$

$$\text{sfc}_{\text{generator}} = 2.68 \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}}$$

#### ค3.2 ประสิทธิภาพการทำความร้อน (Heating Efficiency)

$$\eta_{\text{heating}} = \frac{Q_{\text{exhaust}}}{Q_{\text{fuel}}} \times 100$$

$$\eta_{\text{heating}} = \frac{75.57 \text{ kW}}{372.78 \text{ kW}} \times 100$$

$$\eta_{\text{heating}} = 20.26\%$$

### ค3.3 ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน (CHP Efficiency)

$$\eta_{\text{CHP}} = \eta_{\text{heating}} + \eta_{\text{generator}}$$

$$\eta_{\text{CHP}} = 21.46 + 20.26$$

$$\eta_{\text{CHP}} = 41.72\%$$

### ค3.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน

$$\text{sfc}_{\text{CHP}} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{\text{generator}} + Q_{\text{exhaust}}}$$

$$\text{sfc}_{\text{CHP}} = \frac{214.2 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}}{80 \text{ kW} + 75.52 \text{ kW}}$$

$$\text{sfc}_{\text{CHP}} = 1.38 \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}}$$

### ค3.5 ประสิทธิภาพรวมของระบบทั้งหมด (Overall Efficiency)

$$\text{Overall Efficiency } (\eta_{\text{all}}) = \eta_{\text{electrical}} + \eta_{\text{heat recovery}}$$

โดยที่

$$\text{Heat recovery Efficiency } (\eta_{\text{heat recovery}}) = \left[ \left[ \frac{3.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} \times Q_{\text{exhaust}}}{m_{\text{bio}} \times \text{HHV}_{\text{bio}}} \right] \times \eta_t \right] \times 100$$

$$\text{Heat recovery Efficiency } (\eta_{\text{heat recovery}}) = \left[ \left[ \frac{3.6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} \times 75.57 \text{ kW}}{107.1 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 15.32 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} \right] \times 0.9 \right] \times 100$$

$$\text{Overall Efficiency } (\eta_{\text{all}}) = 17.55\% + 9.91\%$$

$$\text{Overall Efficiency } (\eta_{\text{all}}) = 27.46\%$$

## ค4. การอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสีย

ใช้ข้อมูลการอบแห้งเห้งน้ำมันสำปะหลังที่ความชื้นเริ่มต้น 50.2%wb จนถึงความชื้น 15%wb ปริมาณน้ำที่ถูกระเหย 345 kg โดยใช้เวลาอบแห้ง 4.5 ชั่วโมง โดยใช้ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า 3 HP และใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์

#### ค4.1 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

$$\text{SEC} = \frac{4.76(\sum E_{\text{blower}}) + \sum Q_h}{W_{\text{in}} - W_{\text{f}}}$$

$$\text{SEC} = \frac{[(4.76 \times 2.24 \text{ kW}) + 75.52 \text{ kW}] \times 4.5 \text{ hr} \times \frac{3600 \text{ sec}}{\text{hr}}}{345 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$\text{SEC} = 4.05 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}$$

#### ค4.2 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง

$$\eta_t = \frac{m_w h_{\text{fg}}}{Q_{\text{exhaust}}} \times 100$$

$$\eta_t = \frac{345 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}} \times 2174.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{68.15 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}} \times 4.5 \text{ hr} \times 3600 \frac{\text{sec}}{\text{hr}}} \times 100$$

$$\eta_t = 61.31\%$$

ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- สุภัทร หนูเข้ม เวียง อากรชี่ และวีรชัย อางหาญ. (2551). การศึกษาลักษณะการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรที่ยั่งยืน. หน้า 182-183.
- สุภัทร หนูเข้ม เวียง อากรชี่ และวีรชัย อางหาญ. (2552). การศึกษาการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10. นวัตกรรมการผลิตทางการเกษตร อาหาร และพลังงานทดแทน เพื่อมนุษยชาติ. หน้า 396-401.





การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551  
31 มกราคม 2551 - 1 กุมภาพันธ์ 2551



การศึกษาลักษณะการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี  
Study of the Drying Characteristics of Biomass Fuel using Rotary Drum Dryer

สุภัทรา นูญรัมย์<sup>1</sup> เวียง อากาณิช<sup>2</sup> และ วีรชัย อาริหารณ<sup>3\*</sup>

Supat Nuyam<sup>1</sup> Weang Arkornehee<sup>2</sup> and Weerachai Arjharh<sup>3\*</sup>

บทคัดย่อ

การทดสอบการหาลักษณะการอบแห้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบการอบแห้ง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล การศึกษาครั้งนี้ ใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี ความจุห้องอบแห้ง 0.5 m<sup>3</sup> โดยทดสอบกับเชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์ เหว้งมันสำปะหลัง และ ทางปาล์ม โดยทำการมีขั้นตอนการศึกษาคือ 1) การเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ออกเป็น 2 ขนาด คือ แบบผ่าครึ่งและไม่ผ่าครึ่ง 2) ทำการทดสอบโดยใช้ลมร้อน 2 ช่วง คือ 100° C และ 130° C 3) ทำการวิเคราะห์หาอัตราการอบแห้ง ที่สภาวะการอบแห้งต่างๆ ผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่า อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับ การผ่าครึ่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยเชื้อเพลิงที่ผ่าครึ่งจะใช้เวลาการอบแห้งที่เร็วกว่าในอุณหภูมิอบที่เท่ากัน ทั้งนี้เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถอบแห้งด้วยความร้อนที่สูงได้โดยไม่มีผลต่อสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง พลังงานในการอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ 100° C และ 130° C การอบที่อุณหภูมิสูงจะใช้พลังงานน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ที่ความชื้นสุดท้าย 15 % (wb.)

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงชีวมวล การอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล เครื่องอบแบบโรตารี อัตราการอบแห้ง เวลาการอบแห้ง

ABSTRACT

The objective of testing drying characteristics is to study the drying behavior of biomass fuels which leads to the way of designing drying system. Rotary drum dryer was used in this study with capacity of 0.5 m<sup>3</sup>. Three different kind of biomass fuels including Giant Luecaena (wood), Cassava Rhizome and Palm Branch were used as materials. The study procedures were 1) dividing each kind of materials into 2 sizes in diameter: normal size and half size, 2) drying of materials with hot air temperature of 100°C and 130°C and 3) analyzing of drying rate as above conditions. It was preliminary found that drying rate depends on size of materials. The half size of materials, the faster the drying time will become. For biomass properties, it was also found that the biomass properties did not change with the level of hot air temperature. The drying time will decrease with increase in drying temperature. Beside, the specific energy of drying for higher temperature was lower than the one of lower temperature with the same satisfied moisture content of 15%wb.

**KEYWORDS:** biomass fuel, biomass drying, rotary drum dryer, drying rate, drying time

<sup>1</sup>Master Student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

<sup>2</sup>Engineer, Research Institute of Agricultural Engineering, Department of Agricultural, Ministry of Agricultural and Cooperatives, Pathumthani, Thailand, 12120

<sup>3</sup>Assistant Professor, School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

\* Corresponding author. Tel./Fax: 0-4422-4834; E-mail address: arjharh@sut.ac.th



ก. เครื่องอบแห้งแบบโรตารี



ข. ลักษณะภายในเครื่องอบแห้ง

ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร)



ค. ไม้กระถินยักษ์ก่อนอบแห้ง



ข. ไม้กระถินยักษ์ก่อนอบแห้ง



ค. เหง้ามันสำปะหลังก่อนอบแห้ง



ง. เหง้ามันสำปะหลังก่อนอบแห้ง



จ. ทางปาล์มก่อนอบแห้ง



ฉ. ทางปาล์มก่อนอบแห้ง

ภาพที่ 2 เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ

### บทนำ

ประเทศไทยมีเชื้อเพลิงชีวมวล หรือเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนมาก ทั้งที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตเกษตร และ ไร่ นา สวนเกษตร ซึ่งจากข้อมูลการสำรวจปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลคงเหลือ ในปี 2549 ของมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม พบว่า มีเชื้อเพลิงชีวมวลที่ยังไม่ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้า อีกกว่า 34 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานเทียบเท่า น้ำมันดิบ 7,200 ล้าน (ktoe) ทั้งนี้เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่คงเหลือจะกระจุกกระจายไปในแปลงเกษตร ใช้ต้นทุนสูงในการรวบรวม เช่น ใบอ้อย ฟางข้าว เงามันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิด มีขนาดและความชื้น ที่ยังไม่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ทางปาล์ม ทะลายปาล์ม รากไม้ยางพารา เป็นต้น (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549) ดังนั้นการที่จะนำเชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าวมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องมีการนำมาแปรรูปให้เหมาะสมก่อนนำมาใช้งาน เช่น การทำความสะอาด การลดขนาด การลดความชื้น เป็นต้น

ในการศึกษารุ่นนี้จะทำการศึกษาค้นต้นการลดความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล โดยปกติวิธีการลดความชื้นวัสดุทางการเกษตรในประเทศไทยจะใช้วิธีการตากแดด ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและประหยัด แต่มีข้อเสียคือ ใช้พื้นที่ในการตากมากและมีปัญหาในฤดูฝน ทำให้อุตสาหกรรมการแปรรูปทางการเกษตรที่มีการผลิตอย่างต่อเนื่อง นำเครื่องอบแห้งเข้ามาใช้ในการลดความชื้นวัตถุดิบ ซึ่งใช้พื้นที่น้อยและใช้เวลาการลดความชื้นสั้นลง โดยใช้ความร้อนในการอบแห้งจากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ อย่างไรก็ตามการลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตร มีความแตกต่างกับการลดความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวลมาก ทั้งในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ ลักษณะการอบแห้ง ประกอบกับพบว่ายังไม่มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อ ศึกษาลักษณะการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ โดยเบื้องต้นจะใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารีเป็นเครื่องทดสอบ ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ ขณะอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลจะเคลื่อนที่ตลอดเวลาตามการหมุนของห้องอบแห้ง ทำให้ได้รับลมร้อนอย่างทั่วถึง นอกจากนี้ยังมีจุดเด่นอีกอย่างคือ การหมุนของห้องอบแห้งจะทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการเสียดสีกัน เป็นการทำความสะอาดเชื้อเพลิงชีวมวลไปในตัว

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาลักษณะการอบแห้งของวัสดุทางการเกษตรอื่นๆ เช่น Oriksa (2007) ได้ศึกษาลักษณะการอบแห้งของผลก๊วย ซึ่งพบว่าลักษณะผิวของผลก๊วยที่แตกต่างกัน อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆจะแตกต่างกัน สามารถนำแนวทางการศึกษาดังกล่าวมาใช้ในการศึกษาลักษณะการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลได้ นอกจากนี้ การพัฒนาสมการการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จะอ้างอิงตาม American Society of Agricultural Engineering (ASAE, 1999) ซึ่งธนกร และคณะ (2547) ได้ใช้สมการดังกล่าว ทำการศึกษาเกี่ยวกับความชื้นสมดุลและและทำนายพฤติกรรมการอบแห้งของใบหม่อน ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนมีการลดลงแบบ Exponential สามารถใช้สมการการอบแห้งของ Page ทำนายผลได้



## อุปกรณ์และวิธีการ

## วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องอบแห้งแบบโรตารี (Rotary Drum) ของสถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร โดยรายละเอียดและภาพรวมดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และภาพที่ 1 ตามลำดับ
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ทดสอบ คือ ไม้กระถินยักษ์ เหน้่ามันสำปะหลัง และทางปาล์ม โดยมีคุณสมบัติ และภาพรวมดังแสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 2 ตามลำดับ
3. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ Thermocouple Type K
4. เครื่องชั่ง
5. ตู้อบแห้ง

ตารางที่ 1 ข้อมูลเครื่องอบแห้งที่ใช้ทดลอง

รายการ	รายละเอียด
ข้อมูลตัวเครื่อง	เครื่องอบแห้งกาแปแบบ Rotary Drum (สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร) ความจุถังอบ 0.5 m <sup>3</sup>
การทำงาน	
- ความเร็วรอบถังอบ (RPM)	2.5
- ปริมาณลม (m <sup>3</sup> /min)	15
- การเวียนลมร้อน	เวียนลมร้อน 100%
- เชื้อเพลิง	แก๊ส LPG

ตารางที่ 2 ชนิด ลักษณะทั่วไป และ สมบัติของเชื้อเพลิงที่ใช้

เชื้อเพลิงชีวมวล	ลักษณะทั่วไป	ลักษณะและสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการอบแห้ง		
		ขนาด	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	ความชื้น %wb (%db)
ไม้กระถินยักษ์	ยาว 2 m ขนาด $\phi$ 1-2"	ยาว 50-70 mm ขนาด $\phi$ 25-60 mm	332	42-49 (80-100)
ทางปาล์ม	กว้าง 0.2 m x ยาว 1.5 m หนา 2"	ยาว 60-90 mm พื้นที่หน้าตัด 8-37 cm <sup>2</sup>	153	68-71 (90-130)
เหน้่ามันสำปะหลัง	เป็นท่อนสั้นๆ ขนาด $\phi$ 1"	ยาว 60-90 mm ขนาด $\phi$ 25-60 mm	193	48-56 (210-240)

### ขั้นตอนและวิธีการ

#### 1. การทดลองหาค่าความชื้นในช่วงเวลาต่างๆ

เตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลให้มีขนาดความยาวประมาณ 5-7 เซนติเมตร ใส่ในหีองอบของเครื่องอบแห้งจนเต็มซึ่งน้ำหนักเริ่มต้น เตรียมตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลใส่ลงในถุงตาข่ายจำนวน 6 ถุง โดยแบ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดปกติ (Normal size) และ ครึ่ง (Half size) ขนาดละ 3 ถุง ซึ่งน้ำหนักเริ่มต้นแต่ละถุง แล้วนำไปใส่ในหีองอบ เติมน้ำร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 100 °C โดยหมุนเวียนลมร้อน 100% จดบันทึกน้ำหนักในถุงตาข่ายทุก ๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงหยุดการทดลอง สุดท้ายนำเชื้อเพลิงชีวมวลตัวอย่างไปอบหาน้ำหนักแห้ง โดยใช้ตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้ง ทำซ้ำโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนเป็น 130 °C โดยทำวิธีการเดียวกันนี้กับเชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิด คือ ไม้กระถินยักษ์ เหง้ามันสำปะหลัง และทางปาล์ม

#### 2. การหาอัตราส่วนความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เวลาใด ๆ โดยใช้สมการการอบแห้ง Newton's Equation และ Page's Equation (ASAE, 1999) ตามสมการที่ (1) และ สมการที่ (2)

$$\text{Newton's Equation} \quad MR = \left( \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \right) = \exp(-kt) \quad (1)$$

$$\text{Page's Equation} \quad MR = \left( \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \right) = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

เมื่อ	MR	คือ อัตราส่วนความชื้น	M	คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (%db)
	$M_e$	คือ ความชื้นสมดุล (%db)	$M_i$	คือ ความชื้นสมดุล (%db)
	t	คือ เวลา (hr)	k, n	คือ ค่าคงที่

#### 3. การหาค่าปริมาณพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

ทำการวิเคราะห์หาพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลตั้งแต่ความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้นเป้าหมาย ทั้งนี้ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ 15 %wb โดยทำการคำนวณพลังงานที่ใช้ในเครื่องอบแห้งซึ่งในที่นี้ใช้แก๊ส LPG มีค่าความร้อน (HHV) 55,000 kJ/kg ใช้สมการ (3) แล้วทำการคำนวณหาน้ำหนักของน้ำที่หายไปตั้งแต่ความชื้นเริ่มต้นจนถึงความชื้น 15 %wb นำมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะในการอบแห้งตามสมการที่ (4)

$$\text{Energy} = \frac{HHV \times M}{t \times 3600} \quad (3)$$

เมื่อ	Energy	คือ พลังงานที่ให้เข้าไประบบ (kW)	HHV	คือ ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)
	$M_{LPG}$	คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิง (kg)	t	คือ เวลา (hr)

$$\text{พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง} = \frac{\text{Energy} \times t \times 3600}{W_{\text{Loss}}} \quad (4)$$

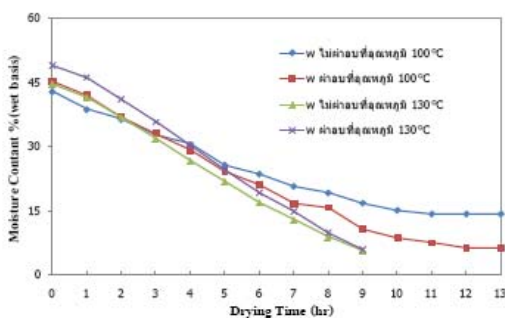
เมื่อ Energy คือ พลังงานที่ให้เข้าไประบบ (kW) t คือ เวลา (hr)

$W_{\text{Loss}}$  คือ น้ำหนักน้ำที่หายไปตั้งแต่ความชื้นเริ่มต้นจนถึง 15 %(wb)

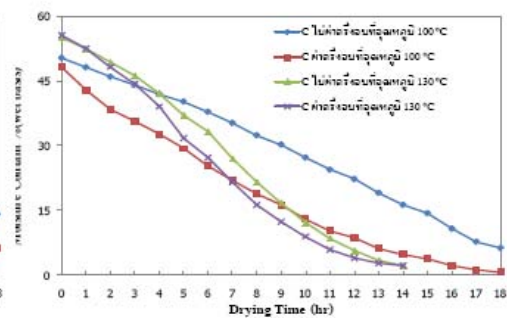
**ผลการทดลองและวิเคราะห์**

**1. เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง**

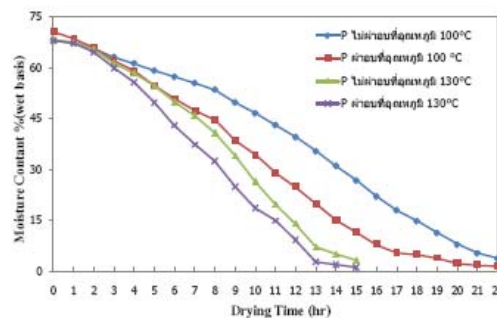
ภาพที่ 4 5 และ 6 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลกับเวลาที่อุณหภูมิ ชนิด และ ขนาดของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน จะเห็นว่าความชื้นเริ่มต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลมีความแตกต่างกันจากน้อยไปหามากคือ ไม้กระถินยักษ์ (W) เหง้ามันสำปะหลัง (C) และทางปาล์ม (P) ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความชื้นเริ่มต้นแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ยังพบว่าการอบด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า (130°C) จะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า (100 °C) สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลก็มีผลต่อระยะเวลาอบแห้ง กล่าวคือขนาดที่ลดลง โดยการผ่าครึ่งเชื้อเพลิงชีวมวล ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงอย่างเห็นได้ชัด ประมาณ 4 ชั่วโมงกรณีอบด้วยอุณหภูมิต่ำ (100 °C) แต่จะมีผลน้อยลงเมื่อทำการอบด้วยอุณหภูมิสูง (130°C) ซึ่งจะลดเวลาการอบแห้งได้เพียง 1 ชั่วโมงเท่านั้น



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของไม้กระถินยักษ์



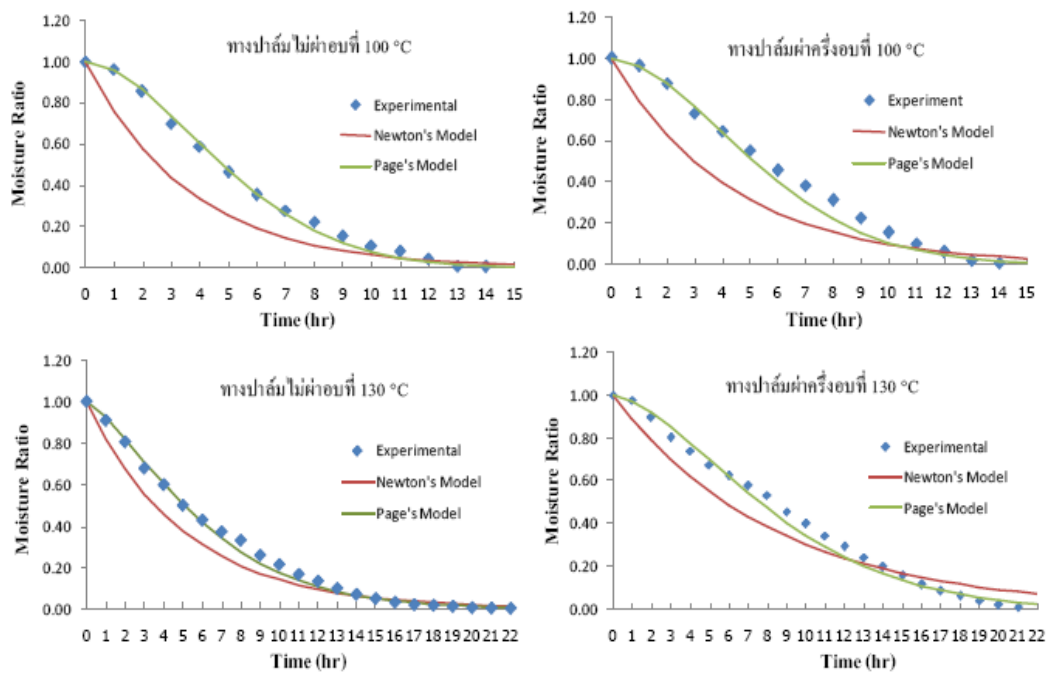
ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเหง้ามันสำปะหลัง



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของทางปาล์ม

2. สมการการอบแห้ง

จากข้อมูลการทดลอง สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการการอบแห้งได้ โดยการนำผลการทดลองมา plot หาเส้นแนวโน้ม ดังตัวอย่างแสดงไว้ในภาพที่ 7 ซึ่งเป็นตัวอย่างการทำนายผลการอบแห้งของทางปาล์ม ผลการวิเคราะห์พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ สมการการอบแห้งของ Page มากกว่า สมการของ Newton ทั้งนี้พบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  มีค่าใกล้ 1 มาก ดังแสดงในตารางที่ 2 สามารถนำสมการของ Page มาทำนายผลการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวล ในสภาวะการอบแห้งต่างๆได้ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับอัตราส่วนความชื้น (Moisture Content) ของทางปาล์มจากการทดลอง และผลจากทำนายโดยสมการ

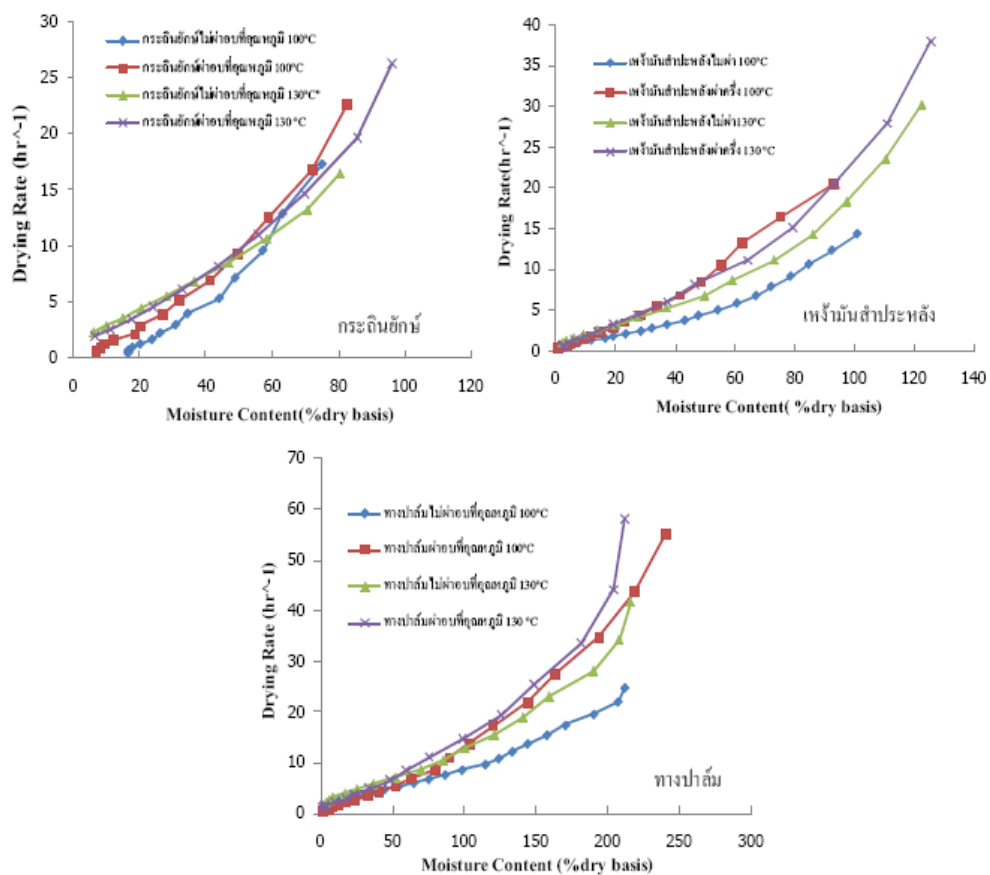
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ในการวิเคราะห์ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ

ชนิดเชื้อเพลิงชีวมวล	ลักษณะ	ไม่คั่วครึ่ง					คั่วครึ่ง					
		สมการ	Newton's Equation		Page's Equation			Newton's Equation		Page's Equation		
			k	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>	k	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>
ไม้กระถินยักษ์	100	0.296	0.980	0.175	1.217	0.964	0.221	0.980	0.145	1.182	0.997	
	130	0.298	0.911	0.132	1.428	0.994	0.293	0.912	0.105	1.64	0.945	
เห้งมันสำปะหลัง	100	0.151	0.817	0.071	1.25	0.965	0.221	0.923	0.169	1.075	0.972	
	130	0.251	0.859	0.083	1.447	0.982	0.308	0.873	0.107	1.432	0.988	
ทางปาล์ม	100	0.119	0.901	0.029	1.564	0.982	0.196	0.925	0.079	1.345	0.987	
	130	0.231	0.801	0.038	1.772	0.990	0.276	0.801	0.043	1.772	0.990	

3. อัตราการอบแห้ง

จากสมการการอบแห้งของ Page สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเชื้อเพลิงชีว

มวลขณะทำการอบแห้งหรือเรียกว่าอัตราการอบแห้งของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ได้ดังแสดงไว้ในภาพที่ 8 ซึ่งจากภาพพบว่า อัตราการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งสามชนิด ลดลงอย่างต่อเนื่อง มีลักษณะการอบแห้งแบบ Falling Rate โดยอัตราการอบแห้งเมื่อความชื้นเข้าใกล้ความชื้นสมดุล ทั้งนี้อัตราการอบแห้งจะสูงขึ้นเมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การลดขนาดเชื้อเพลิง โดยวิธีการผ่าครึ่งสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้อย่างชัดเจน สามารถสรุปได้ว่าการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดเล็กด้วยอุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการอบแห้งที่เร็วกว่า



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นกับอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) ของเชื้อเพลิงชีวมวล



#### 4. พลังงานที่ใช้

จากการวิเคราะห์หาพลังงานจำเพาะ ในการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวล พบว่าการอบด้วยอุณหภูมิสูง (130°C) จะใช้เชื้อเพลิงหรือพลังงานความร้อนในการอบที่สูงกว่าการอบด้วยอุณหภูมิต่ำ (100 °C) แต่อย่างไรก็ดี การอบด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่ต่ำกว่ามากดังที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์หาพลังงานจำเพาะ ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า พลังงานจำเพาะของการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง (130°C) จะน้อยกว่า ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 ในการทดลองในครั้งนี้ เชื้อเพลิงต่างชนิดกันจะใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพ เช่น ผิวของเชื้อเพลิงชีวมวล ความหนาแน่น ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่แตกต่างกันจะใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งที่แตกต่างกัน ซึ่งทางคณะผู้วิจัยจะดำเนินการศึกษาเป็นลำดับต่อไป

ตารางที่ 4 พลังงานจำเพาะในการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวล

	อุณหภูมิ อบแห้ง (°C)	ความชื้น เริ่มต้น (%wb)	ความชื้น เริ่มต้น (%db)	น้ำหนัก แห้ง เริ่มต้น (kg)	น้ำหนักน้ำที่ หายไปจนเหลือ ความชื้น 15%wb (kg <sub>mo</sub> )	พลังงานที่ใช้ (kW)	เวลาที่อบจน เหลือความชื้น 15 %wb (hr)	พลังงาน จำเพาะ (MJ/kg <sub>mo</sub> )
ไม้กระถิน ยักษ์	100	42.9	75.0	96.31	55.28	17.74	10	11.55
	130	44.5	80.2	98.21	61.48	23.1	6.5	8.79
เหง้ามัน สาปะหลัง	100	50.3	101.2	59.41	49.67	19.79	14.5	20.80
	130	55.1	122.6	61.15	64.21	21.40	9.5	11.40
ทางปาล์ม	100	68.0	212.2	42.96	83.60	17.78	18	13.78
	130	68.3	215.8	44.81	88.81	22.17	12	10.78

#### สรุปผล

- ปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลคือ คือ ความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ และ ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวล เมื่อความชื้นเริ่มต้นมีค่าสูง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสูงไปด้วย ทั้งนี้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการอบแห้งได้ คือ การลดขนาดและการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง
- การอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่า แม้ว่าจะใช้เชื้อเพลิงหรือปริมาณความร้อนที่มากกว่า แต่จะใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยกว่า เนื่องมาจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า เป็นการประหยัดทั้งพลังงานและเวลา

#### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย กลุ่มงานวิจัยหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม ที่สนับสนุนเครื่องอบแห้ง Rotary Drum เพื่อใช้ในการทดสอบ

#### เอกสารอ้างอิง

- ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล.(2549), “ชีวมวล” , บริษัท ทีวี ฟรันท் แมเนจเม้นท์ จำกัด., กรุงเทพฯ

2. ชนากร บรูณเพชร ,สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ,ณัฐพล ภูมิสะอาด.(2547), “ความชื้นและสมการการอบแห้งของใบหม่อน”,การประชุมวิชาการครั้งที่5 ประจำปี 2547 .,คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ASAE STANDARD. (1999), Moisture relationship of Plant-base Agricultural Product,ASAED245.5 Oct95,pp 512-528
4. Orikasa,T.et al., (2007) “Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying” , Journal of Food Engineering (2007)



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยครั้งที่ 10 ประจำปี 2552  
1 - 3 เมษายน 2552 ณ สุรธรรมมาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## การศึกษาการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในการอบแห้ง เชื้อเพลิงชีวมวล

### A Study on Waste Heat Utilization from Generator Engine for Biomass Drying

สุภัทร หนูแยม<sup>1</sup> เวียง อากรชี่<sup>2</sup> และ วีรชัย อางหาญ<sup>3</sup>  
Supat Nuyam<sup>1</sup> Weang Arkornchee<sup>2</sup> and Weerachai Arjham<sup>3</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่ใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน มาใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยมีขั้นตอนการศึกษาคือ 1) ศึกษาปริมาณความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์โดยเน้นการทดสอบหาความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียเครื่องยนต์ ในภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้าที่ 0,20,40,60 และ 80 kW 2) ศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบกระบอก โดยความสูงของวัสดุคือ 50 cm และทำการอบแห้งที่ 125-135 °C อัตราการไหลลมร้อน 3,007 m<sup>3</sup>/hr โดยใช้วัสดุ 2 ชนิด คือ ไม้โตเร็วสับ และเหง้ามันสำปะหลังสับ จากผลการทดสอบพบว่าที่ภาวะการทำงาน 80 kW จะมีพลังงานความร้อนออกมากับไอเสีย 68.15 kW ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จากผลการทดสอบการอบแห้งพบว่า อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะการอบแห้งไม้โตเร็วสับ และเหง้ามันสำปะหลังอยู่ระหว่าง 3.7-3.97 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> และค่าประสิทธิภาพรวมการอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 66.3% ซึ่งจะเห็นได้ว่ากการนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ในการอบแห้ง จะทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าจาก 21.46% เพิ่มขึ้นเป็น 39.74%

**คำสำคัญ:** ความร้อนเหลือทิ้ง/เชื้อเพลิงชีวมวล /ไอเสียเครื่องยนต์

#### ABSTRACT

The main aim of this research was to study the waste heat recovery of an engine-generator set from a small-scale biomass gasification power plant. The heat was used as a heat source for biomass drying. The study procedures of 1) the study of the waste heat quantity generated from an engine-generator which was only focused on the heat from combustion exhaust gas at different load condition of 0,20,40,60 and 80 kW. 2) the study of the utilization of waste heat recovery for biomass drying in which the bin dryer type was used. The experiments were set with conditions of a 50 cm depth of biomass in the bins, the drying temperature of 125-135 °C and the hot air flow rate of 3,007 m<sup>3</sup>/hr. Two types of biomass were selected, namely fast-growing tree chip and cassava rhizome chip. The experimental results indicated that the heat amount of 68.15 kW was generated accompanying with exhaust gas. This considerable amount of heat was used further for biomass drying. The drying tests showed that the specific power consumption of the selected fast-growing tree and cassava rhizome chip was between 3.7-3.97 MJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> and the average total efficiency of drying was about 66.3%. In addition, recovering waste heat for drying can increase the engine efficiency from 21.46% up to 39.74%

**Keywords:** waste heat recovery /biomass / exhaust gas

<sup>1</sup>Master Student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

<sup>2</sup>Engineer, Research Institute of Agricultural Engineering, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Pathumthani, Thailand, 12120.

<sup>3</sup>Assistant Professor, School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000.

สำหรับการคิดพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งนั้น เนื่องจากค่า  $a$  มีความแตกต่างกันอยู่กับประสิทธิภาพเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ใช้เป็นไฟฟ้้าที่ผลิตได้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพ 21 % (กรณีการมีบุญและคณะ, 2549) หรือกล่าวได้ว่าอัตราส่วนของพลังงานความร้อนต่อพลังงานไฟฟ้ามีค่าประมาณ 4.76

ส่วนการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพรวมคือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง ดังสมการที่ (11)

$$\eta_t = \frac{m_w h_{fg}}{Q_{exhaust}} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ  $\eta_t$  คือ ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง, %

$m_w$  คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย, kg

$h_{fg}$  คือ ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ, kJ/kg

$Q_{exhaust}$  คือ ค่าความร้อนของไอเสียที่นำมาใช้ได้, kW

**ผลการทดลองและวิจารณ์**

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สชีวมวล เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าพลังงานที่ภาระการทำงานต่างๆ ของเครื่องยนต์ พบว่าพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า ( $Q_{in}$ ) พบว่าพลังงานจะอยู่ระหว่าง 273.33- 372.78 kW โดยค่าพลังงานความร้อนสูงสุดจะอยู่ที่ภาระการทำงานที่ 80 kW พลังงานที่ถ่ายเทไปกับน้ำหล่อเย็นจะมีค่าประมาณ 48.76 kW ในช่วงภาระการทำงาน 0-60 kW และมีค่า 73.14 kW ที่ภาระการทำงาน 80 kW ส่วนพลังงานความร้อนที่ออกมากับไอเสียมีค่า 38.43-68.15 kW โดยที่ภาระการทำงานที่ 80 kW มีพลังงานที่ออกมากับไอเสียมากที่สุด ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

**ตารางที่1** การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยนต์แก๊สชีวมวล

INPUT			OUTPUT			
Gas flow (m <sup>3</sup> /hr)	HHV (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Q <sub>fuel</sub> (kW)	Q <sub>generator</sub> (kW)	Q <sub>exhaust gas</sub> (kW)	Q <sub>coolant</sub> (kW)	Q <sub>loss</sub> (kW)
163.8	6.01	273.33	0	38.43	48.76	186.14
170.4	5.74	271.31	20	44.18	48.76	158.37
186.6	5.50	285.43	40	49.37	48.76	147.3
192.0	5.92	315.64	60	58.63	48.76	148.25
214.2	6.27	372.78	80	68.15	73.14	151.49

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนถูกแสดงรายละเอียดไว้ใน ตารางที่2 เมื่อพิจารณาถึง  $\eta_{generator}$  เพียงอย่างเดียวพบว่า สภาวะการทำงานที่ 80 kW เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีอัตราการสิ้นเปลืองแก๊สชีวมวลต่ำที่สุด โดยมี  $\eta_{generator}$  และ  $sfc_{generator}$  เท่ากับ 21.46 % และ 2.68 m<sup>3</sup>/kWh

ผลการทดสอบพบว่า การผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนทำให้  $\eta_{CHP}$  ซึ่งเป็นประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้นจากทุกสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ เช่น สภาวะการทำงานที่ 80 kW มีค่า  $\eta_{heating}$  เท่ากับ 18.28 % หรือมีค่าพลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 68.15 kW ดังนั้นทำให้ค่า  $\eta_{CHP}$  สูงขึ้นเท่ากับ 39.74% และมี  $sfc_{CHP}$  เท่ากับ 1.08 m<sup>3</sup>/kWh

**การอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสีย**

จากการทดสอบได้เก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเชื้อเพลิงที่ระดับความสูงต่างๆ ดังแสดงไว้ในภาพที่3 และภาพที่4 จากภาพทั้งสองจะเห็นได้ว่าในเมื่ออบแห้งถึงเวลาหนึ่งความชื้นของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชั้นก็จะมีค่าใกล้เคียงกันจนเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นน้อยมาก แต่ในการอบแห้งเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าชีวมวลมีความต้องการความชื้นที่ 17.6%db (15%wb) ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการอบแห้งก็คือตั้งแต่เริ่มอบแห้งจนถึงความชื้นที่ต้องการจากการทดสอบพบว่าการอบแห้งไม้โตเร็วสับจะใช้เวลาอบแห้งประมาณ 2-3.5 ชั่วโมง และการอบแห้งเห้งามันสำหรับหลังสับใช้เวลาประมาณ 4.5-5 ชั่วโมง

### บทนำ

จากการศึกษาด้านแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก สำหรับชุมชนพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบอยู่ในช่วงระหว่าง 12-16% เมื่อระบบทำงานที่ 70% ของกำลังการผลิต ซึ่งมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ทิพย์สุภินทร์ หินขุย และคณะ(2551)ได้ศึกษาพบว่าในส่วนของไอเสียที่ออกมาจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้ามีอุณหภูมิค่อนข้างสูงถึง 550-600 องศาเซลเซียส และมีความเป็นไปได้ที่จะนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิง โดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความชื้นประมาณ 45-60 % จากงานวิจัยที่มีการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ เช่น ณรงค์ฤทธิ์ มูลเจริญ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2548) มีการนำเอาความร้อนทิ้งจากไอเสีย จากกระบวนการเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพในฟาร์มสุกรมาใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเก็บคืนความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ผลการศึกษาพบว่า กรณีที่ไม่มีการเก็บคืนความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ ระบบผลิตไฟฟ้ากึ่งชีวภาพจะมีประสิทธิภาพเพียง 16.9% แต่ในกรณีที่มีการเก็บคืนความร้อน ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้นเป็น 24.8% และจากการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าโครงการจะให้ผลตอบแทนจากการลงทุน 29.34% มีระยะเวลาคืนทุน 3.47ปี นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ พยุงศักดิ์ จุลยเสน และวีรชัย อัจฉาญ(2551) ที่มีการศึกษาการเดินทางเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพที่ 60 kW เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้า เพราะมีค่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าที่สูงสุดเท่ากับ 14% และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 1.22  $\text{m}^3/\text{kWh}$  ผลการทดสอบพบว่า การผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 37.7% และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของระบบลดเหลือ 0.45  $\text{m}^3/\text{kWh}$  วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน เพื่อนำพลังงานความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ และศึกษาการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

### อุปกรณ์และวิธีการ

#### เชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ในการอบแห้งใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในการทดสอบ 2 ชนิด คือ ไม้โตเร็วสับ (ไม้ยูคาลิปตัส) และ เหง้ามันสำปะหลังสับ ดังแสดงภาพที่ 1 ใน ขนาดของ

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้อบแห้งนั้นจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าตะแกรงรูลขนาด 10 มิลลิเมตร



a) ไม้โตเร็วสับ



b) เหง้ามันสำปะหลังสับ

ภาพที่ 1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการอบแห้ง

### การสูญเสียพลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

ทำการเก็บข้อมูลการเดินระบบที่ภาวะการผลิตไฟฟ้า 0, 20, 40, 60 และ 80 กิโลวัตต์ที่ความเร็วรอบคงที่ 1,000 รอบต่อนาที โดยเกิดการสมดุลพลังงานของเครื่องยนต์โดยที่พลังงานเข้าระบบคือ พลังงานความร้อนของแก๊สชีวมวลวัดโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography เพื่อหาองค์ประกอบแก๊สชีวมวล และเก็บข้อมูลอัตราการไหลของแก๊สเพื่อคำนวณตามสมการที่ (1)

$$Q_{fuel} = HHV_i \cdot \dot{m}_i \quad (1)$$

จะมีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ออกจากระบบคือ พลังงานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าสามารถวัดได้จาก Power Meter ตามสมการที่ (2)

$$Q_{generator} = \sqrt{3}VI \cos \phi \quad (2)$$

พลังงานที่ถ่ายเทกับน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์โดยใช้ Water Flow Meter และวัดอุณหภูมิเข้าและออกจากหม้อน้ำตามสมการที่ (3)

$$Q_{coolant} = \dot{m}_C C_{Pw} (T_{Cout} - T_{Cin}) \quad (3)$$

พลังงานความร้อนที่ออกมากับไอเสียตามทฤษฎี โดยการคำนวณหาองค์ประกอบต่างๆในแก๊สเพื่อหาค่าความจุความร้อนของแก๊สไอเสีย อุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไอเสีย แล้วคำนวณตามสมการที่ (4)

$$Q_{exhaust} = \dot{m}_{ex} C_{p_{ex}} (T_{exout} - T_{exin}) \quad (4)$$

และพลังงานความร้อนส่วนที่สูญเสีย  $Q_{loss}$

โดยที่  $HHV_i$  คือ ค่าความร้อนแก๊สชีวมวล  $\dot{m}_i$ ,  $\dot{m}_C$  และ  $\dot{m}_{ex}$  คือ อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล น้ำหล่อเย็นซึ่งจากการวัดค่าอัตราการไหลมีค่า 349.3 L/min ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000 rpm และแก๊สไอเสียตามลำดับ  $V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสาย  $I$  คือ ไฟฟ้าในแต่ละสาย  $\cos \phi$  คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์ทางไฟฟ้า  $C_{Pw}$ ,  $C_{P_{ex}}$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.18  $\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$  และความจุความร้อนของแก๊สไอเสียที่อุณหภูมิไอเสียนั้นๆ  $T_{Cin}$ ,  $T_{Cout}$ ,  $T_{exin}$  และ  $T_{exout}$

คือ อุณหภูมิของน้ำด้านเข้าเครื่องยนต์ น้ำด้านออกจากเครื่องยนต์ อุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิของแก๊สไอเสียตามลำดับ

ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (Generator Efficiency) ได้จากสมการที่ (5)

$$\eta_{generator} = \frac{Q_{generator}}{Q_{fuel}} \quad (5)$$

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในการผลิตไฟฟ้า (Specific Fuel Consumption:  $sfc_{generator}$ )

$$sfc_{generator} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{generator}} \quad (6)$$

จากสมดุลพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานเหลือทิ้งจากระบบมี 2 ส่วนคือ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็น และความร้อนที่ออกไปกับไอเสีย โดยพลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อระบบ คือความร้อนที่ออกมากับไอเสีย ซึ่งสามารถนำมาหาประสิทธิภาพการทำความร้อน (Heating Efficiency) ตามสมการที่ (7)

$$\eta_{heating} = \frac{Q_{exhaust}}{Q_{fuel}} \quad (7)$$

ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน (CHP Efficiency) ตามสมการที่ (8)

$$\eta_{CHP} = \eta_{heating} + \eta_{generator} \quad (8)$$

และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของระบบผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อน (Specific Fuel Consumption:  $sfc_{CHP}$ ) ตามสมการที่ (9)

$$sfc_{CHP} = \frac{\dot{m}_g}{Q_{generator} + Q_{exhaust}} \quad (9)$$

การอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสีย

จากการศึกษาขั้นต้นเราเลือกเครื่องอบแห้งชนิดกระบะ มาใช้ในการทดสอบการอบแห้งเนื่องจากต้นทุนในการสร้างเครื่องไม่สูงและไม่มีการใช้ชิ้นส่วนและน่าจะเหมาะสมกับโรงไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยเครื่องอบแห้งในการทดสอบนี้เป็นเครื่องอบแบบกระบะ (อบแห้งลำไย) ของกลุ่มงานวิจัยหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม โดยมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง (2310mm x 2310mm x 600mm) หรือประมาณ 3.2 ลูกบาศก์เมตรแต่ในการทดสอบนี้ใช้ความสูงเพียง 0.5 m หรือความจุประมาณ 2.67 ลูกบาศก์เมตร ปริมาณลมร้อน 3,007 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยแหล่ง

ความร้อนจะมาจากไอเสียของเครื่องยนต์โดยตรงที่สภาวะการทำงานสูงสุดที่ 80 kW โดยไอเสียจะถูกนำมาผสมกับอากาศจากภายนอกภายในถังผสมโดยตรงโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ประมาณ 125°C – 135°C ทำการเก็บตัวอย่างแบ่งเป็นชั้นๆ ที่ความสูง 0 cm (ชั้นล่าง), 25 cm (ชั้นกลาง) และ 50cm (ชั้นบน) รวม 3 ชั้นๆ ละ 5 ตัวอย่างแล้วทำการอบแห้งโดยเก็บตัวอย่างทั้ง 15 ตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมงจนน้ำหนักของตัวอย่างเริ่มไม่เกิดเปลี่ยนแปลงแล้วนำตัวอย่างไปห่าน้ำหนักแห้ง โดยเข้าตู้อบ (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้ง แล้วนำข้อมูลมาหาค่าความชื้นแต่ละชั่วโมง โดยใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละชั้น เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความชื้นในการอบแห้งเชื้อเพลิงดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การทดสอบอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ การหาพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง โดยพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบคือ พลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ขับเคลื่อนและพลังงานความร้อนที่ได้จากแก๊สไอเสียตลอดเวลาในการอบแห้งจนถึงความชื้น 15 %wb และปริมาณน้ำที่ถูกระเหยไปจนถึงความชื้น 15 %wb ดังสมการที่ (10)

$$SEC = \frac{a(\sum E_{blower}) + \sum Q_h}{W_{in} - W_f} \quad (10)$$

เมื่อ  $SEC$  คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ,  $\frac{MJ}{kg_{water}}$

$\sum E_{blower}$  คือ พลังงานที่ใช้สำหรับการขับเคลื่อน,  $MJ$

$\sum Q_h$  คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง,  $MJ$

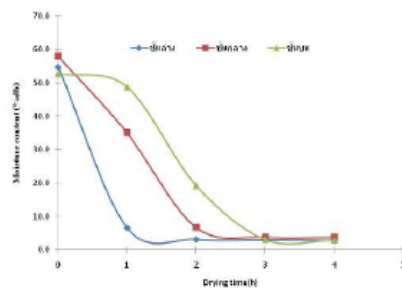
$W_{in}$  คือ น้ำหนักของวัตถุดิบก่อนอบ,  $kg$

$W_f$  คือ น้ำหนักของวัตถุดิบหลังอบ,  $kg$

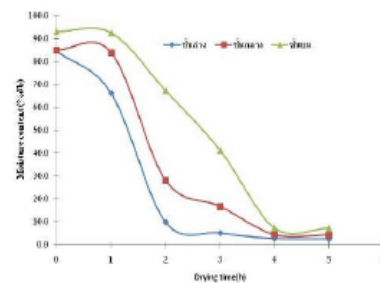
$a$  คือ ค่าประสิทธิภาพเปลี่ยนพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 2 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องยอนต์ผลิตไฟฟ้า

$Q_{electrical}$ (kW)	Volume flow rate of producer gas (m <sup>3</sup> /hr)	Biomass combined heat and power plant				
		$\eta_{electrical}$ (%)	$sfc_{electrica}$ (m <sup>3</sup> /kWh)	$\eta_{heating}$ (%)	$\eta_{CHF}$ (%)	$sfc_{CHF}$ (m <sup>3</sup> /kWh)
0	163.8	0.00	0.00	14.06	14.06	0.00
20	170.4	7.37	8.51	16.28	23.65	2.65
40	186.6	14.01	4.67	17.30	31.31	2.09
60	192.0	19.01	3.20	18.57	37.58	1.62
80	214.2	21.46	2.68	18.28	39.74	1.45

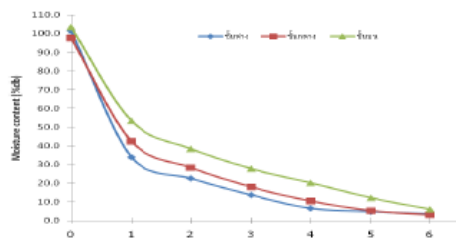


a) ไม้โตเร็วสับ ความชื้นที่ 1

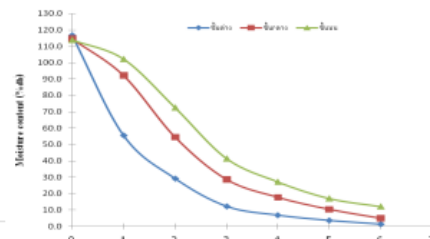


b) ไม้โตเร็วสับ ความชื้นที่ 2

ภาพที่3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นไม้โตเร็วสับขณะอบแห้ง ชั้นล่าง กลาง และบน



a) เหง้ามันสำปะหลังสับ ความชื้นที่ 1



b) เหง้ามันสำปะหลังสับ ความชื้นที่ 2

ภาพที่4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นเหง้ามันสำปะหลังสับขณะอบแห้ง ชั้นล่าง กลาง และบน

ตารางที่3 ผลทดสอบการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสีย

ข้อมูล	ไม้กระถินยักษ์สับ		เหง้ามันสำปะหลังสับ	
	ความชื้นที่ 1	ความชื้นที่ 2	ความชื้นที่ 1	ความชื้นที่ 2
น้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น, (kg)	590.00	720.00	832.00	840.00
ความชื้นเริ่มต้น, %db(%wb)	55.20(35.6)	84.80(46.7)	100.80(50.2)	115.10(55.1)
น้ำหนักที่ความชื้นที่ต้องการ (kg)	447.00	457.500	487.00	459.500
น้ำหนักน้ำที่หายไป (kg)	143.00	262.50	345.00	380.50
เวลาที่ใช้ออบ (hr)	2.00	3.50	4.50	5.00
พลังงานความร้อนจากไอเสียเฉลี่ย, (kWh)	68.15	68.15	68.15	68.15
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ(SEC), MJ / kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	3.97	3.78	3.70	3.73
ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง ( $\eta_T$ ), %	63.36	66.46	67.94	67.44

จากการทดสอบหาอัตราการผลิตพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการอบไม้โตเร็วสับ และแห้งน้ำมันส่าปะหลังมีค่าอยู่ระหว่าง ระหว่าง 3.7-3.97  $MJ/kg_{H_2O}$  และค่าประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง ( $\eta_r$ ) มีค่าประมาณ 63.36-67.94% หรือเฉลี่ย เท่ากับ 66.3% ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเนื่องจากลมร้อนที่ใช้อยู่ในห้องเชื้อเพลิงชีวมวลคือความร้อนของไอเสียผสมกับอากาศในถังผสมโดยตรง ซึ่งไม่ต้องผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) และการอบแห้งนี้เป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้มีประสิทธิภาพรวมการอบแห้งค่อนข้างสูงไปด้วย

#### สรุป

จากการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้ามาใช้ประโยชน์ พบว่าการผลิตไฟฟ้าร่วมกับพลังงานความร้อนทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น และสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลได้

#### คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และกลุ่มงานวิจัยหลังการเก็บเกี่ยว กองเกษตรวิศวกรรม ที่สนับสนุนเครื่องอบแห้งแบบกระบะ เพื่อใช้ในการทดสอบ

#### เอกสารอ้างอิง

ภรรณีการ์ มณีบุญและคณะ.(2549), การจัดการพลังงานของเครื่องอบแห้งส่าใยแบบได้วัน .เอกสารการประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน (ครั้งที่5).. โรงแรมไผ่ดัดปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่

ณรงค์ฤทธิ มุลเจริญ และ ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์.(2548), การนำความร้อนทิ้งจากไอเสียจากการผลิตไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกรมาใช้ในระบบทำความเย็นแบบดูดซึม. การประชุมวิชาการการถ่ายเทความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 4 จังหวัดเชียงราย

ทิพย์สุภินทร์ หินชุยและคณะ.(2551), การศึกษามลพิษและของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กระดับชุมชน.เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551., คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปรีชา สิริชาญ.(2544). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ .คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

พยุงค์ดี จุลยุเสน และวีรชัย อาจหาญ.(2551), ระบบกกลูกสุกรในโรงเรือนคลอดโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ .เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551., คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

Jain, A.K., Sharma, S.K. and Singh, D. (2002). Development of a kinetic model for designing throat less gasifier. Indian Chemical Engr 44 (4): 232-240.



## ประวัติผู้เขียน

นายสุภัทร หนูแยม เกิดเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ. 2526 ที่เขตบางบอน จังหวัด กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของ นายสุพจน์ หนูแยม และนางสุวรรณี พรหมประทุม เริ่มศึกษาชั้น ประถมที่ 1-6 โรงเรียน บ้านนายพล เขตบางบอน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ชั้นมัธยมศึกษาที่ 1-6 โรงเรียนศึกษานารีวิทยา เขตบางบอน จังหวัดกรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2549

ในปี พ.ศ. 2549 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนผู้มีศักยภาพของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี และทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นผู้ร่วมวิจัยในเรื่องการจัดการพลังงานใน โครงการ “โครงการบูรณาการด้านพลังงานกับแผนยุทธศาสตร์จังหวัด” และ “โครงการพัฒนา บุคลากรด้านการตรวจวิเคราะห์การอนุรักษ์พลังงานอาคารในส่วนราชการ (ติดตามผลงาน) ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ” และเป็นผู้ร่วมวิจัยในโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจากสำนักงาน คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2 โครงการ คือ “การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับ ชุมชน” และ “การศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน (ระยะที่ 2)” นอกจากนี้ยัง ได้รับใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมระดับภาคีวิศวกร สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

ผลงานวิจัยในระหว่างที่ทำการศึกษา ได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมวิชาการสมาคม วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี พ.ศ. 2551 เรื่อง “การศึกษาลักษณะการอบแห้ง ของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี” และงานประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรม เกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 ประจำปี พ.ศ. 2552 เรื่อง “การศึกษาการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล”