

การศึกษาผลของความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีต่อผลผลิตไฟฟ้าของ
โรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ



นายเมธวัฒน์ สงพัฒน์แก้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

THE STUDY ON EFFECT OF WOODCHIP FUELS PROPERTIES' VARIATION ON
ELECTRICITY PRODUCTION OF STEAM POWER GENERATION

Mr. Mathawat Songphatkaew



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาผลของความแปรปรวนของคุณสมบัติของ
เชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีต่อผลผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงาน
ไอน้ำ

โดย

นายเมธวัฒน์ สงพัฒน์แก้ว

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. คณิต วัฒนวิเชียร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

เมธวัฒน์ สงพัฒน์แก้ว : การศึกษาผลของความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีต่อผลผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ. (THE STUDY ON EFFECT OF WOODCHIP FUELS PROPERTIES' VARIATION ON ELECTRICITY PRODUCTION OF STEAM POWER GENERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. คณิต วัฒนวิเชียร, 108 หน้า.

ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีการจัดเก็บพลังงานแสงอาทิตย์จากแสงแดดในรูปแบบของสารเคมีในพืชผ่านกระบวนการที่เรียกว่าการสังเคราะห์แสง เชื้อเพลิงชีวมวลรวมถึงของเหลือทิ้งทางเกษตร เศษซากพืช ไม้ และของเสียอินทรีย์ ฯลฯ ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลจะไม่เพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศในขณะที่มันดูดซับปริมาณที่เท่ากันของคาร์บอนในขณะที่เติบโต เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานทดแทน พบว่าเศษไม้เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรสามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศในช่วงหนึ่งปีมีผลกระทบต่อการศึกษา การจัดการ และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ในช่วงหนึ่งปี และเพื่อประเมินผลจากความแปรปรวนที่ได้จากความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่มีต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้า

ส่วนแรกเป็นการศึกษาความแปรปรวนคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้โดยใช้การตากแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์ แบบ passive mode เพื่อลดปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ ผลการทดลองพบว่าการตากกองไม้ภายใน Solar Greenhouse drying ความลึกกองเศษไม้ 2 5 10 15 และ 20 เซนติเมตรตามลำดับในช่วงหนึ่งเดือนสามารถทำให้ปริมาณความชื้นของไม้ลดลงได้ประมาณ 2 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ต่อสัปดาห์

ส่วนที่สองจะทำการทดสอบและการวิเคราะห์การเผาไหม้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน หาส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ใช้ในการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง Adiabatic flame temperature ระหว่าง 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์อากาศเกินพบว่าถ้าปริมาณอากาศเกินเพิ่มขึ้นอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้จะลดลงในช่วง 1550-1400 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นและขนาดเศษไม้มีผลกระทบต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ ผลพบว่าหากปริมาณความชื้นลดลง 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ซึ่งผลจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดจากการเผาไหม้ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของเศษไม้ที่ 3.3 4.4 และ 5.5 เซนติเมตรจะทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้สารระเหยเพิ่มขึ้นเป็น 26 63 และ 107 องศาเซลเซียสตามลำดับ.

ส่วนสุดท้ายจะใช้แบบจำลองของวัฏจักรแรงคินในการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการผลิตไอน้ำของบอยเลอร์เพื่อขับเทอร์ไบน์ 33.23 ตันต่อชั่วโมงที่ กำลังการผลิตไฟฟ้า 7.5 MW การควบแน่นของน้ำในคอนเดนเซอร์ 38 องศาเซลเซียส และไอน้ำร้อนยวดยิ่งออกจากบอยเลอร์ที่ 50 บาร์และ 450 องศาเซลเซียส ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างป้อนน้ำ และอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่เป็นอุณหภูมิอิ่มตัวการควบแน่นของน้ำในคอนเดนเซอร์ จาก Solar Greenhouse Drying นั้นพบว่าปริมาณความชื้นของเศษไม้ลดลงประมาณ 2 ถึง 6% ต่อสัปดาห์ จากนั้นนำผลการลดลงของความชื้นในแต่ละช่วงสัปดาห์คือ 59% 54% 49% 46% และ 10.4% ถ้านำไปใช้เผาไหม้ให้ความร้อนกับบอยเลอร์ที่ทำงานภายใต้ประสิทธิภาพ 90% จะต้องใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ ยางพาราประมาณ 18.591 ตัน/ชม. 15.946 ตัน/ชม. 13.960 ตัน/ชม. 12.988 ตัน/ชม. และ 7.114 ตัน/ชม. ตามลำดับ.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5370329721 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: BIOMASS COMBUSTION / RANKINE CYCLE MODEL / BOILER EFFICICNEY

MATHAWAT SONGPHATKAEW: THE STUDY ON EFFECT OF WOODCHIP FUELS PROPERTIES' VARIATION ON ELECTRICITY PRODUCTION OF STEAM POWER GENERATION. ADVISOR: ASSOC. PROF. KANIT WATTANAVICHIEEN, Ph.D., 108 pp.

Biomass are organic materials, which has stored solar energy from sunlight in the form of chemical in the plants through the process called photosynthesis. Biomass fuels include Agricultural Wastes, Crop Residues, Wood and Organic wastes etc. Unlike fossil fuels. Biomass does not add carbon dioxide to the atmosphere as it absorbs the same amount of carbon while growing. It is eco-friendly and is renewable source of energy. Wood chip, which have remained after industry activities and agricultural, can be used to produce electricity. However, we found that the regularly climate change in a year has the effect on storage, handling and variation of wood chips fuel properties.

The objectives of the study were: To study the variability of the properties of wood fuel in a year, And evaluate and manage the impact of wood chip fuels variation on electricity production of steam power generation.

First of all, this study was to variation of the properties of wood chip fuel by used Solar Greenhouse drying (passive mode) in the order to reduce the moisture content of wood chip. the result show that the variation of moisture content of each deep 2, 5, 10, 15, and 20 centimeters of wood pile within a month are reduced 2 to 6 percentages of moisture content per week.

Second, the combustion experiment and analysis will be used a gasification system to obtain volatile gas compositions form syngas sample using a Gas Chromatograph (GC). The gas composition will be used to calculate adiabatic flame temperature for the range of 10 and 30 percent excess air. It was found that the increase of excess air volume make the reduction in maximum temperature of combustion in the range of 1400 to 1550 degree Celsius. The moisture content and chip sizes have effects to the composition of the product gas. The result was found that if the moisture content reduced 2 to 6 percentages, which effects to the increase in maximum temperature of combustion that depend on chip size. As chip size increase from 3.3 to 4.4 and to 5.5 centimeters, the maximum temperature of wood chip combustion will be 26, 63, and 107 degree Celsius higher, respectively.

Finally, the Rankine cycle model has been used to evaluate amount of fuel used for the rate of steam supply 33.23 tons per hour, when the plant's electrical supply output is 7.5 MW. the condensate left the condenser as saturated at 38 degree Celsius and the superheated steam leaving the boiler was at 50 bar and 450 degree Celsius. Neglecting the change in state of the feed-water when passing through the feed pump, and the environment temperature as the saturation temperature of the condensate in condenser. Solar Greenhouse Drying method and found that the moisture content of wood chips dropped about 2-6% per week, then put a drop of moisture each week is 59% 54% 49% 46% and 10.4% if. applied to burns to heat the boiler to run under the 90% will be used 18.591, 15.946, 13.960,12.988, and 7.114 tons/hour, respectively.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย

ขอขอบคุณทางบริษัท PRIZE OF WOOD COMPANY ที่ให้ข้อมูลทางเทคนิคสำหรับการ กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ

ขอขอบคุณ คุณปัญญาพล นวลละออง คุณประสพโชค โพธิกุล คุณยุทธนา ชาญรงค์ชัย คุณธีรวุฒิ รักเหยา และคุณทราน เจริญ เวียด ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานโดยตลอด รวมถึงเพื่อนนิสิตปริญญาโท รุ่นพี่ที่สำเร็จการศึกษาแล้วที่ห้องปฏิบัติการเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ให้การช่วยเหลืองานด้านอื่นๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการและห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกท่านที่ให้ผู้วิจัยยืมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับปฏิบัติงานในระหว่างการศึกษารวมถึงขอขอบคุณบุคคลท่านอื่น ที่มีส่วนเกี่ยวข้องซึ่งอาจไม่ได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณพ่อสมคิด คุณแม่มยุรีและครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ที่ให้กำลังใจ ความรัก ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในทุกๆด้านเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	3
2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล.....	3
2.1.1 พลังงานชีวมวล.....	3
2.1.2 การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล	4
2.2 คุณสมบัติของชีวมวลสำหรับการวิเคราะห์การเผาไหม้.....	5
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties).....	5
2.2.2 สมบัติอุณหภาพ (Thermal Properties).....	9
2.2.3 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties).....	11
2.2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate).....	13
2.2.5 สมบัติทางแร่ธาตุ (Mineral Properties)	13
บทที่ 3 การเผาไหม้ไม้.....	14
3.1 พื้นฐานของการเผาไหม้ไม้	14
3.2 กระบวนการเผาไหม้ไม้	16
3.2.1 การระเหยความชื้น (Moisture evaporation)	17

3.2.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization).....	18
3.2.3 การเผาไหม้ของอนุภาคสารระเหย (Combustion of volatile matter).....	18
3.2.4 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion)	19
บทที่ 4 ทบทวนวรรณกรรม.....	21
4.1 การรวบรวมผลการศึกษามาจากแบบจำลองการเผาไหม้และอภิปรายผล.....	21
4.1.1 ผลกระทบของความชื้นในเชื้อเพลิง	21
4.1.2 ผลกระทบของการปล่อยสารระเหยในเชื้อเพลิง	22
4.1.3 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ	23
4.1.4 ผลกระทบต่ออุณหภูมิก๊าซร้อนจากแบบจำลอง FLIC.....	24
4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเชื้อเพลิงไม้ไปใช้เป็นพลังงาน.....	25
บทที่ 5 โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำและการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	28
5.1 โรงไฟฟ้าที่ใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง.....	28
5.1.1 ระบบน้ำ (Water treatment system).....	29
5.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้า (Electrical system)	29
5.1.3 ระบบผลิตไอน้ำ (Boiler).....	29
5.2 สมดุลความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าชีวมวล.....	29
5.3 ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์: กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์.....	31
5.4 สมบัติของไอน้ำ	34
5.5 แบบจำลองวัฏจักรแรงดันเบื้องต้น (Rankine Cycle Model).....	37
บทที่ 6 ความแปรปรวนของเชื้อเพลิงไม้.....	39
6.1 ทฤษฎีการแก้ปัญหาระบบความชื้นไม้.....	39
6.2 วิธีการเก็บรักษาเชื้อเพลิงเศษไม้สับโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์.....	40
6.3 สภาพภูมิอากาศของจังหวัดนราธิวาส	41
6.4 วิธีการทดลองสำหรับการศึกษาความแปรปรวนของเศษไม้.....	42
6.5 ผลการทดลองความแปรปรวนของไม้	43
6.6 สรุปผลการทดลองความแปรปรวนของไม้.....	49
บทที่ 7 การทดสอบและวิเคราะห์ผลจากกระบวนการเผาไหม้ไม้.....	52

7.1	รายละเอียดการดำเนินงานทดสอบ.....	52
7.2	รายละเอียดการปฏิบัติงาน	53
7.3	ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ในระหว่างการทดลอง.....	53
7.4	แผนผังของอุปกรณ์และจุดวัดอุณหภูมิและความดัน	55
7.5	ผลการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง	56
7.6	ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของ Syngas.....	56
7.7	ผลการคำนวณ Adiabatic Flame Temperature	59
7.8	ผลความแตกต่างของปริมาณชิ้นไม้ต่อ Adiabatic Flame Temperature.....	60
บทที่ 8	แบบจำลองของวัฏจักรแรงคิน	66
8.1	วิธีการวิเคราะห์แบบจำลองวัฏจักรแรงคิน	66
8.2	ผลการคำนวณแบบจำลองวัฏจักรแรงคิน.....	67
8.3	ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเศษไม้ที่มีต่อการใช้เชื้อเพลิงไม้ในโรงไฟฟ้า	69
8.4	สรุปผลการทดลอง.....	72
บทที่ 9	สรุป.....	73
9.1	สรุป.....	73
9.2	ข้อเสนอแนะ.....	74
	รายการอ้างอิง	76
	ภาคผนวก.....	78
	ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เฉลี่ยในแต่ละเดือน	79
	ภาคผนวก ข การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของกองเศษไม้.....	93
	ภาคผนวก ค ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้	95
	ภาคผนวก ง การคำนวณ Adiabatic Flame Temperature	96
	ภาคผนวก จ ผลการคำนวณมือของแบบจำลองวัฏจักรแรงคินอย่างง่าย	102
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	108

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2- 1 ความร้อนจำเพาะของไม้ตามอุณหภูมิและสัดส่วนปริมาณความชื้น [1]	10
ตารางที่ 2- 2 การวิเคราะห์หีสันสูงของไม้ [1].....	11
ตารางที่ 2- 3 การกระจายของไฟโรไลซิสสำหรับไม้แห้งภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้ [1].....	12
ตารางที่ 4- 1 ค่าพารามิเตอร์ของอัตราการปล่อยสารระเหย (rate parameters)ซึ่งได้จากคณะ นักวิจัยต่างๆ [11]	23
ตารางที่ 6- 1 สมการโพลีโนเมียลกำลังสองของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ความลึกต่างกัน	50
ตารางที่ 6- 2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse drying	50
ตารางที่ 7- 1 ผลการวิเคราะห์ Syngas จุดที่มีการ Sample Gas.....	57
ตารางที่ 7- 2 การเปรียบเทียบผลการทดลองของ Producer Gas.....	59
ตารางที่ 7- 3 การเปลี่ยนแปลงของ Adiabatic flame Temperature	60
ตารางที่ 7- 4 ผลของ Gas Analyses จากการทดลองของ Jayah et.at,2003[25]	61
ตารางที่ 7- 5 ผลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นต่ออุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature	62
ตารางที่ 8- 1 ผลการคำนวณปริมาณความร้อนและงานของอุปกรณ์.....	68
ตารางที่ 8- 2 ผลการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ยางพารา.....	69
ตารางที่ 8- 3 ผลการคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ความชื้นต่างกัน	70
ตารางที่ 8- 4 ผลของความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของบอยเลอร์กับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผา ไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์	71
ตารางที่ ก- 1 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดชุมพร	84
ตารางที่ ก- 2 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดสุราษฎร์ธานี.....	85
ตารางที่ ก- 3 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนครศรีธรรมราช	86

ตารางที่ ก- 4 ผลการเก็บตัวอย่างอนุภาคนิวเคลียส 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดพัทลุง	87
ตารางที่ ก- 5 ผลการเก็บตัวอย่างอนุภาคนิวเคลียส 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานอำเภอหาดใหญ่.....	88
ตารางที่ ก- 6 ผลการเก็บตัวอย่างอนุภาคนิวเคลียส 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานจังหวัดปัตตานี.....	89
ตารางที่ ก- 7 ผลการเก็บตัวอย่างอนุภาคนิวเคลียส 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดยะลา	90
ตารางที่ ก- 8 ผลการเก็บตัวอย่างอนุภาคนิวเคลียส 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส.....	91
ตารางที่ ค- 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ Ultimate Analysis.....	95
ตารางที่ ง- 1 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง GAS.....	99
ตารางที่ ง- 2 การคำนวณค่าความร้อน(heating value)จากส่วนประกอบของ syngas.....	100
ตารางที่ จ- 1 ข้อมูลส่วนประกอบของระบบผลิตกระแสไฟฟ้า.....	102

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2- 1 เครื่องย่อยไม้แบบ Disc Chipper	6
ภาพที่ 2- 2 เครื่องวัดความชื้นของไม้	7
ภาพที่ 2- 3 แสดงการวัดขนาดของเศษไม้ [3]	8
ภาพที่ 3- 1 ขั้นตอนการเผาไหม้อนุภาคคาร์บอนของไม้ [7]	15
ภาพที่ 3- 2 ขั้นตอนการเผาไหม้ของไม้ [8].....	16
ภาพที่ 4- 1 ผลกระทบของระดับความชื้นในเชื้อเพลิง [11].....	22
ภาพที่ 4- 2 แสดงผลของการปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงชีวมวล เมื่อมีขนาดอนุภาคในช่วง 6-90 มม. ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ [6].....	23
ภาพที่ 4- 3 ผลกระทบจากการปรับอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิและผลจากความชื้นของเชื้อเพลิงต่างๆกัน.....	24
ภาพที่ 4- 4 แสดงอุณหภูมิของการแผ่รังสีที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวเบด (หรืออุณหภูมิก๊าซร้อน)ที่คำนวณด้วยแบบจำลอง FLIC [11]	25
ภาพที่ 5- 1 ระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้กังหันไอน้ำเป็นต้นกำลังและใช้เชื้อเพลิงชีวมวล	28
ภาพที่ 5- 2 แผนผังสมดุลความร้อนของโรงไฟฟ้าชีวมวล	30
ภาพที่ 5- 3 สมดุลพลังงานของบอยเลอร์	31
ภาพที่ 5- 4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำ [18]	35
ภาพที่ 5- 5 แสดง T-s Diagram ของจุดวิกฤติ.....	36
ภาพที่ 5- 6 แสดง P-v Diagram ของจุดวิกฤติ	36
ภาพที่ 5- 7 แสดง T-s diagram ของวัฏจักรแรงคินในอุดมคติ [20]	37
ภาพที่ 6- 1 สูตรโครงสร้างของสายโซ่เซลลูโลส [21].....	39
ภาพที่ 6- 2 Greenhouse drying แบบ passive mode [23].....	40
ภาพที่ 6- 3 Greenhouse drying แบบ active mode [22].....	41
ภาพที่ 6- 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส.....	42

หน้า

ภาพที่ 6- 5 กองไม้ที่ผ่านการย่อยด้วยเครื่อง Chipper.....	42
ภาพที่ 6- 6 Solar Greenhouse drying ทำด้วยแผ่นผ้าโปร่งแสง.....	43
ภาพที่ 6- 7 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ที่ความลึกกองไม้ 2 เซนติเมตร.....	44
ภาพที่ 6- 8 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ที่ความลึกกองไม้ 5 เซนติเมตร.....	44
ภาพที่ 6- 9 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ที่ความลึกกองไม้ 10 เซนติเมตร.....	45
ภาพที่ 6- 10 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ที่ความลึกกองไม้ 15 เซนติเมตร.....	45
ภาพที่ 6- 11 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ที่ความลึกกองไม้ 20 เซนติเมตร.....	46
ภาพที่ 6- 12 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ เวลา 8.00น.....	47
ภาพที่ 6- 13 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ เวลา 10.00น.....	47
ภาพที่ 6- 14 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ เวลา 12.00น.....	48
ภาพที่ 6- 15 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ เวลา 14.00น.....	48
ภาพที่ 6- 16 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ เวลา 16.00น.....	49
ภาพที่ 7- 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ระหว่างทำการทดลอง.....	54
ภาพที่ 7- 2 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความดันของ Gasification System.....	55
ภาพที่ 7- 3 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ Syngas ด้วยเครื่อง GC.....	56
ภาพที่ 7- 4 ผลการเปลี่ยนแปลงของ Syngas Composition จากเครื่อง GC.....	58
ภาพที่ 7- 5 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณ ความชื้นของเศษไม้ยาวพาราขนาด 3.3 เซนติเมตร.....	63

หน้า

ภาพที่ 7- 6 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณ ความชื้นของเศษไม้ยางพาราขนาด 4.4 เซนติเมตร.....	64
ภาพที่ 7- 7 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณ ความชื้นของเศษไม้ยางพาราขนาด 5.5 เซนติเมตร.....	64
ภาพที่ 8- 1 การแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซร้อนกับน้ำในท่อภายในบอยเลอร์	67
ภาพที่ 8- 2 T-s ไดอะแกรมของวัฏจักรแรงคิน.....	67
ภาพที่ 8- 3 P-v ไดอะแกรมของวัฏจักรแรงคิน	68
ภาพที่ 8- 4 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของบอยเลอร์กับปริมาณเชื้อเพลิงเศษไม้ที่ใช้เผาไหม้ให้ ความร้อนแก่บอยเลอร์.....	71
ภาพที่ ก- 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดชุมพร	79
ภาพที่ ก- 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดสุราษฎร์ธานี.....	80
ภาพที่ ก- 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนครศรีธรรมราช.....	80
ภาพที่ ก- 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดพัทลุง	81
ภาพที่ ก- 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานอำเภอหาดใหญ่จังหวัดสงขลา	81
ภาพที่ ก- 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานจังหวัดปัตตานี.....	82
ภาพที่ ก- 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดยะลา.....	82
ภาพที่ ก- 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส.....	83
ภาพที่ จ- 1 T-s ไดอะแกรมของวัฏจักรแรงคินอย่างง่าย	104

คำอธิบายสัญลักษณ์

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
ϵ_s	ค่า Emissivity (0.8)	
σ_b	ค่าคงที่ของ Boltzmann (5.67×10^{-8})	W/m ² K ⁴
ρ_{gas}	ความหนาแน่นของสารระเหย	kg/m ³
ψ	สัดส่วนที่ว่างของเชื้อเพลิงเศษไม้ในบริเวณโดยรอบ	
η_{th}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรแรงคิน	%
η_{Boiler}	ประสิทธิภาพของบอยเลอร์ (Boiler Efficiency)	%
ΔE	การเปลี่ยนแปลงพลังงานของของไหลทำงาน	KJ/kg
ΔKE	การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของของไหลทำงาน	J หรือ N-m
ΔPE	การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของของไหลทำงาน	J หรือ N-m
ΔU	การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของของไหลทำงาน	KJ/kg
ADF	Adiabatic Flame Temperature	°K หรือ °C
A_v	ตัวประกอบ pre-exponential ของการปล่อยสารระเหย	S ⁻¹
C	มวลของก๊าซที่เป็นสารตั้งต้น	m ³
$C_{m,g}$	ความเข้มข้นของความชื้นในก๊าซที่ไหลผ่าน	kg/m ³
$C_{m,s}$	ความเข้มข้นของความชื้นที่พื้นผิวของแข็ง	kg/m ³
C_{mix}	empirical constant มีค่าเท่ากับ 0.65	
C_v	ค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่และจะขึ้นกับอุณหภูมิ	KJ/kg°K
D_g	การแพร่ของอากาศ	m ² /s
d_p	ขนาดเชื้อเพลิง	m
E_v	พลังงานกระตุ้นของการปล่อยสารระเหย	J/mol

g	ตัวแปลงหน่วย ถ้าเป็นหน่วย SI $g=9.81 \text{ m/s}^2$ และถ้าเป็นหน่วยอังกฤษ $g=32 \text{ ft/s}^2$	m/s^2 หรือ ft/s^2
h	เอนทาลปี	kJ/kg
h_c	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา	$\text{W/m}^2\text{K}$
H_{evp}	ความร้อนระเหยของความชื้นจากเศษไม้	kJ/kg
HHV	ความร้อนขั้นสูงของเชื้อเพลิงชีวมวล	kJ/kg หรือ cal/g
h_m	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างพื้นผิวของแข็งและก๊าซ	m/s
h_{steam}	เอนทาลปีของไอน้ำ	kJ/kg
h_{water}	เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน	kJ/kg
k_d	อัตราการแพร่ (Diffusion rate)	kg/atm m^2
k_r	อัตราจลน์ของการเผาไหม้ (Combustion kinetic rate)	kg/atm m^2
LH heat	Latent heat of vaporization of water (2260 kJ/kg)	kJ/kg
LHV	ความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวล	kJ/kg หรือ cal/g
MC	ปริมาณความชื้น Moisture Content	%
m_{fuel}	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	kg/hr
m_{water}	อัตราการใช้น้ำในการผลิตไอน้ำ	kg/hr
P	ความดัน (Pressure)	bar หรือ MPa
Q	พลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบ (+) หรือออกมาจากระบบ (-)	kJ/kg
q	ความร้อนเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (path properties)	
Q_{cr}	ปริมาณความร้อนถ่ายโอนไปยังเศษไม้โดยการพาและแผ่รังสี	W
q_{in}	ความร้อนปริมาณให้แก่อุปกรณ์	
q_{out}	ความร้อนปริมาณออกจากกระบบ	

R_{char}	อัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์	%
RH	ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ Relative Humidity	%
S	ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนผสมพอดีในการสันดาปของเชื้อเพลิง	
s	เอนโทรปี entropy	$\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{K}$
Sp	พื้นที่ผิวของเศษไม้	m^2
T	อุณหภูมิ (Temperature)	$^{\circ}\text{K}$ หรือ $^{\circ}\text{C}$
T_{env}	อุณหภูมิของเตาเผา	$^{\circ}\text{K}$ หรือ $^{\circ}\text{C}$
T_g	อุณหภูมิก๊าซ	$^{\circ}\text{K}$ หรือ $^{\circ}\text{C}$
T_s	อุณหภูมิของแท่งไม้แข็ง	$^{\circ}\text{K}$ หรือ $^{\circ}\text{C}$
V	ปริมาณสารระเหยที่เหลือในเศษไม้	m^3/s
v	ปริมาตร (Volume)	m^3
V_{∞}	ปริมาณสารระเหยทั้งหมด (Ultimate yield)	m^3/s
V_g	ความเร็วของอากาศ	m/s
W	งาน (เข้าเป็นลบ -) หรือ (ออกเป็นบวก +)	
W_{net}	งานสุทธิที่ได้จากระบบ	
Z	ระยะความสูงเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง	m

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากสถานการณ์ราคาน้ำมันที่ไม่แน่นอนรวมทั้งการปลดปล่อยของเสียสู่บรรยากาศที่มีปริมาณมากจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้มีการแสวงหาพลังงานรูปแบบใหม่เข้ามาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานจากชีวมวลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากชีวมวลนั้นเป็นสิ่งที่ชีวิตหรือเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากสิ่งมีชีวิตที่สามารถผลิตขึ้นทดแทนได้ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีทั้งพืชและเศษเหลือทิ้งจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก จึงเป็นโอกาสอันดีที่จะนำเศษเหลือทิ้งดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์และลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลจากประเทศผู้ผลิตน้ำมัน

ในกระบวนการทางการเกษตรไปถึงการแปรรูปผลผลิตของอุตสาหกรรมทำให้เกิดของเหลือทิ้งซึ่งเป็นอินทรีย์สาร หรือเรียกว่า "ชีวมวล" โดยในกระบวนการแปรรูปไม้ยางพาราและไม้เบญจพรรณ ของอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราและอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ เกิดของเหลือทิ้งที่เป็นเศษไม้ กิ่งไม้ และขี้เลื่อย ที่ได้หลังจากการตัดโค่นและแปรรูปไม้ของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นของเหลือทิ้งที่มีศักยภาพ สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานภายในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ และยังมีจำนวนเศษไม้เหลือทิ้งมากเพียงพอที่จะส่งขายเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าขนาดเล็กได้ แต่เนื่องจากการนำเอาเชื้อเพลิงเศษไม้มาใช้ให้ความร้อนในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ พบว่าฤดูกาลในช่วงหนึ่งปีและวิธีการเก็บรักษาเชื้อเพลิงเศษไม้ มีผลต่อความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ ซึ่งเมื่อนำเชื้อเพลิงเหล่านี้ไปเผาไหม้ให้ความร้อนในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของการผลิตกระแสไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาและพัฒนาแบบจำลองสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำจากเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาผลความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ ที่มีต่อสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ในช่วงหนึ่งปี

1.2.2 เพื่อประเมินผลจากความแปรปรวนที่ได้จากการศึกษาในข้อสองที่มีต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าด้วยแบบจำลองวัฏจักรแรงดันเบื้องต้น

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงเศษไม้

1.3.2 ศึกษาแรงชนิดและคุณสมบัติเชิงความร้อนและประเมินการแปรปรวนด้านคุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ในกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกของภาคใต้

1.3.3 ศึกษาและพิจารณาผลด้านคุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ในกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกของภาคใต้ที่มีต่อสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.3.4 ประเมินผลจากความแปรปรวนของคุณสมบัติเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ โดยใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ (แบบจำลองวัฏจักรแรงดันเบื้องต้น) ที่มีต่อสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้า

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษากระบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงเศษไม้

1.4.2 ศึกษาและเก็บข้อมูลคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีซึ่งได้แก่ สมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเศษไม้ในกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกของภาคใต้

1.4.3 วิเคราะห์ผลความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ในของกลุ่มตัวอย่างที่คัดเลือกของภาคใต้

1.4.4 ประเมินผลจากความแปรปรวนที่ได้จากการศึกษาในข้อสาม โดยใช้แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ (แบบจำลองวัฏจักรแรงดันเบื้องต้น) ที่มีต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถประเมินศักยภาพของการนำวัสดุเหลือทิ้งอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ ที่นำมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าได้

1.5.2 สามารถวิเคราะห์ผลความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีต่อสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าได้

บทที่ 2

เชื้อเพลิงชีวมวล

เนื่องจากการนำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลจำพวกเศษไม้มาใช้ให้ความร้อนในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ พบว่าฤดูกาลในช่วงหนึ่งปีและวิธีการเก็บรักษาเชื้อเพลิงเศษไม้มีผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ ซึ่งเมื่อนำเชื้อเพลิงเหล่านี้ไปเผาไหม้ให้ความร้อนในระบบผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำแล้วนั้น จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของการผลิตกระแสไฟฟ้า ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับ เชื้อเพลิงชีวมวล การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล และคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไม้สำหรับวิเคราะห์การเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ เพื่อให้เห็นถึงการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานสำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อน และนำคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไปใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้ได้ [1]

2.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

ปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรม และประเทศกำลังพัฒนา การนำมาใช้มีหลากหลายวิธีตั้งแต่วิธีพื้นฐานผ่านการเผาไหม้จนถึงการยกระดับการใช้ด้วยการแปลงสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชใบเขียวและสามารถเกิดการหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำมาใช้ผลิตเพื่อเป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและใช้แล้วหมดไปได้

2.1.1 พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวลหมายถึง พลังงานที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ รวมไปถึงของเสียอินทรีย์ต่างๆ เช่น เศษไม้ มูลสัตว์ ขยะชุมชน เปลือกของเมล็ดพืช โดยทั่วไปชีวมวลจัดเป็นพลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน เพราะสามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้ ซึ่งต่างจากน้ำมันปิโตรเลียมที่ใช้แล้วหมดไป

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งยังมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆอีกเล็กน้อยในรูปของคาร์โบไฮเดรตและเซลลูโลส

โดยทั่วไปชีวมวลจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (Woody) แบบไม่ใช่ไม้ (Non Woody) และของเสียจากสัตว์ [2] ซึ่งได้มาจากแหล่งต่างๆดังนี้

- ผลผลิตจากป่า ไร่ นา สวน ต้นไม้ และวัชพืชต่างๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนเมล็ด เปลือก ผล และจากพวกสาหร่าย พืชน้ำจืด เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย เหง้ามัน ชิงช้าวัวพืด กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม แกลบ ชานอ้อย

- เศษและวัสดุของเสียจากกระบวนการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม เช่น ขี้เลื่อย กากอาหาร มูลสัตว์
- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน น้ำเสียชุมชน ฯลฯ

แหล่งพลังงานชีวมวลที่ชัดเจนที่สุดสำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ ไม้ฟืน ซึ่งมีความสะดวกในการใช้และมีใช้กันมากอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในชนบท ในเขตเมืองก็มีการใช้ไม้ฟืนในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก แหล่งที่มาของไม้ฟืนเหล่านี้หาได้ตามป่า พื้นที่ป่ากร้าง กิ่งไม้ตามข้างทางและต้นไม้ตามหัวไร่ปลายนา หรือสวนยางพาราของชาวบ้านที่หมดอายุการให้น้ำยางแล้ว ซึ่งจะเป็นส่วนของ ลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ อัจรวมถึงโคนและรากด้วย หรือบางครั้งอาจจะได้มาจากเศษไม้เหลือทิ้งของอุตสาหกรรมแปรรูปไม้และโรงงานทำเฟอร์นิเจอร์จากไม้ยางพารา เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาเฉพาะเชื้อเพลิงชีวมวลจำพวกชีวมวลแบบไม้ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เศษไม้ที่หาได้ง่ายในประเทศไทย มาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานชีวมวล สำหรับการเผาไหม้ตรงเพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เท่านั้น

2.1.2 การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

วัสดุทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงที่ประเทศเราสามารถผลิตได้เอง และไม่มีวันหมด วัสดุทางการเกษตรหลายอย่างมีการเผาทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ และทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ทั้งที่แท้จริงแล้ววัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเกือบทุกอย่างสามารถนำมาเผาไหม้ในบอยเลอร์เพื่อใช้ผลิตไอน้ำได้ ตัวอย่างเช่น การนำเศษไม้ยางพาราหรือกะลาปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ขนาดต่ำกว่า 10 MW (VSPP: Very Small Power Producer) ซึ่งใช้หม้อไอน้ำภายใต้ความดันน้ำ 50 บาร์ทั่วไปแล้ววัสดุทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงที่ประชาชนให้การยอมรับจะไม่ต่อต้าน เพราะประชาชนในพื้นที่มีความคุ้นเคย หรือเป็นผู้ผลิตวัสดุทางการเกษตรนั่นเอง จึงเกิดปัญหาน้อยในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ต่างจากบอยเลอร์ที่ใช้เชื้อเพลิงถ่านหินที่ประชาชนมักจะต่อต้านเพราะเกรงกลัวปัญหาและผลกระทบเรื่องมลพิษ

พลังงานชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เศษเหลือทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ และจากชีวมวลที่ผ่านการแปรสภาพมาแล้ว เศษวัสดุเหล่านี้ที่ผลิตได้ภายในประเทศจะแปรผันขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป บางชนิดไม่เหมาะสำหรับการนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่นกากมันสำปะหลัง เพราะมีความชื้นสูงอาจสูงถึง 80-90% และบางชนิดนำมาใช้เผาไหม้โดยตรงได้แต่ต้องนำมาย่อยหรือสับก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เศษไม้ยูคาลิปตัส เศษไม้เบญจพรรณ เป็นต้น

ข้อจำกัดในการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรงในบอยเลอร์ คือ

1. ความหนาแน่นต่ำ ต้องใช้ในปริมาณมาก และการขนย้ายไม่สะดวก ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการขนส่งจากแหล่งวัตถุดิบที่อยู่ไกลจากสถานที่ผลิต

2. เชื้อเพลิงชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง เป็นอุปสรรคในการเก็บรักษาและส่งผลต่อการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อน
3. การนำวัสดุทางการเกษตรออกไปจากพื้นที่การเกษตรจำนวนมากทำให้สารอาหารในดินลดลง ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรในพื้นที่นั้นในอนาคต
4. เศษวัสดุการเกษตรเหล่านี้จะมีเฉพาะในฤดูกาลที่มีการผลิตในช่วงเวลาอื่นของปีจะไม่มิดังนั้น อาจต้องมีหลายชนิดเพื่อหมุนเวียนไปใช้ให้เหมาะสมกับปริมาณและฤดูกาลที่มีการผลิต
5. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้มีค่าความร้อนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินจึงต้องใช้ปริมาณที่มากกว่าโดยขึ้นกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชนิดนั้น
6. ชีวมวลบางชนิดมีจุดหลอมเหลวต่ำถ้าอุณหภูมิเผาไหม้สูงเกินไปจะทำให้ชีวมวลหลอมละลายติดในห้องเผาไหม้มีผลให้บอยเลอร์อุดตันและมีประสิทธิภาพลดลง
7. ชีวมวลส่วนใหญ่มีความชื้นสูงการออกแบบห้องเผาไหม้ของบอยเลอร์ต้องเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นและถ้าความชื้นสูงมากอาจติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่มเติมทำให้เงินลงทุนเพิ่มขึ้น

2.2 คุณสมบัติของชีวมวลสำหรับการวิเคราะห์การเผาไหม้

การวิเคราะห์การเผาไหม้ในเตาเผา บอยเลอร์ และกระบวนการอุตสาหกรรมนั้นต้องใช้ความรู้เรื่องคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ดังนั้นหัวข้อนี้จะอธิบายคุณสมบัติของเชื้อเพลิงสำหรับการวิเคราะห์การเผาไหม้ของไม้ซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical) ทางความร้อน (Thermal) ทางเคมี (Chemical) และแร่ธาตุ (Mineral) บางครั้งคุณสมบัติเปลี่ยนไปตาม ชนิด พื้นที่ และสภาวะการเจริญเติบโตของต้นไม้ ระบบการที่ใช้ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอาจจะเป็น Fix bed Suspension burning หรือ Fluidized bed ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปข้อมูลคุณสมบัติของเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้และรายละเอียดของการนำไปใช้ [1]

2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงจะมีรูปร่างแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิด ส่วนชีวมวลจะมีลักษณะเป็นของแข็งซึ่งอาจถือได้ว่าอยู่ในประเภทเดียวกับถ่านหิน ซึ่งชีวมวลจะมีความชื้นและสิ่งเจือปนเช่น ผงฝุ่นและสปอร์เชื้อรา ถือได้ว่าเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของชีวมวลนั้นๆ ซึ่งจะนำเสนอเฉพาะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นไม้ เชื้อเพลิงชีวมวลไม้จะถูกทำให้เป็นชิ้นขนาดเล็กก่อนการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากขนาดของไม้มีขนาดไม่สม่ำเสมอทำให้เป็นปัญหาเรื่องการป้อนสู่เตาเผา (handling) และการเผาไหม้ (Combustion) โดยใช้เครื่องย่อยไม้ (Chipping machines โดยทั่วไปมี 2 ชนิดคือแบบ Disc chipper และ Drum chipper) ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2- 1 เครื่องย่อยไม้แบบ Disc Chipper

เครื่องจะย่อยกิ่งไม้ ท่อนไม้ ปีกไม้ให้มีขนาดสม่ำเสมอใกล้เคียงกันเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับบอยเลอร์หลังจากผ่านกระบวนการย่อยด้วย Disc Chipper แล้วจะได้ไม้ที่เรียกว่า Wood Chip ดังแสดงในภาพที่ 2-3 แต่เศษไม้สดที่ได้จากกระบวนการย่อยยังคงมีปริมาณความชื้นสูงอยู่ยังต้องนำไปลดความชื้นอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

ซึ่งคุณภาพของเชื้อเพลิงเศษไม้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [3] ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของเชื้อเพลิงเศษไม้ การแจกแจงขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) ชนิดต้นไม้ (Tree Species) ความหนาแน่นบล็อค (Bulk Density) ระดับของผงฝุ่นและสปอร์เชื้อราในเชื้อเพลิงเศษไม้ (Level of dust and fungal spores in the wood chip fuel) และปริมาณขี้เถ้า (Ash content) ที่เหลือจากการเผาไหม้ ดังแสดงต่อไปนี้

1. ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของเชื้อเพลิงเศษไม้[3]

ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของเชื้อเพลิงเศษไม้อธิบายได้เช่นเดียวกับปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำในน้ำหนักทั้งหมดของเชื้อเพลิง ไม้สดหลังจากการตัดโค่นต้นไม้จะมีความชื้นประมาณ 40-60 % โดยน้ำหนัก เศษไม้เนื้ออ่อนมีความชื้นอย่างน้อย 55% ส่วนเศษไม้เนื้อแข็งมีความชื้นประมาณ 50% สามารถตรวจได้ด้วยเครื่องมือวัดความชื้น ดังแสดงในภาพที่ 2-2 แต่อย่างไรก็ตามการตัดต้นไม้ถ้าตัดในฤดูร้อนนั้นก็จะสามารถลดความชื้นได้ประมาณ 10-15 % ซึ่งความชื้นของเศษไม้ที่น้อยลงนี้นอกจากจะส่งผลให้ค่าความร้อนของเศษไม้สูงขึ้นแล้วยังจะส่งผลให้สามารถลดความเสี่ยงของการเกิดสนิม (Corrosion) ในบอยเลอร์ได้



ภาพที่ 2- 2 เครื่องวัดความชื้นของไม้

ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ นั้นจะส่งผลต่อขนาดของบอยเลอร์ที่จะนำเชื้อเพลิงเศษไม้ไปเผาไหม้ซึ่งสามารถแบ่งตามขนาดของบอยเลอร์ได้ดังนี้

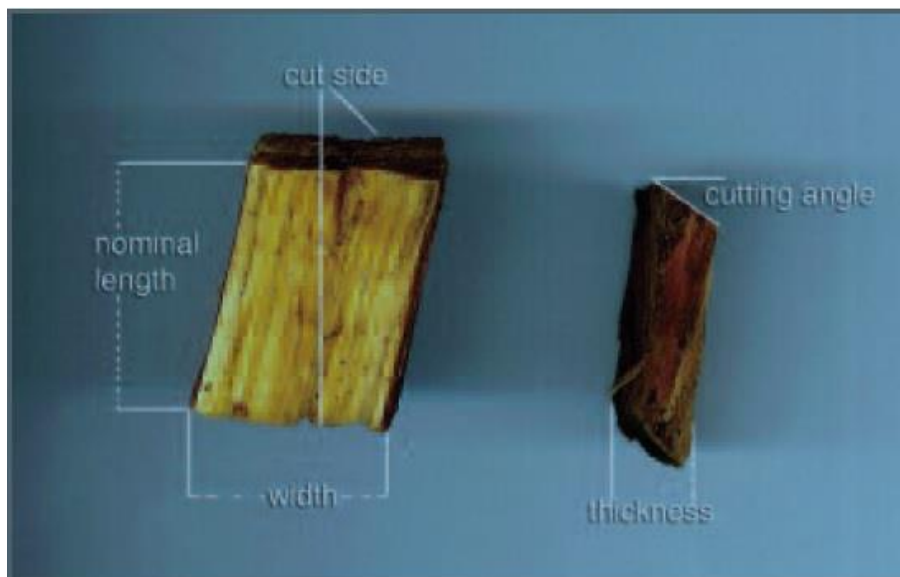
- บอยเลอร์น้ำขนาดเล็ก (<250 กิโลวัตต์) ต้องการเชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีคุณภาพสูงกับปริมาณความชื้นของไม้ต่ำ (<30%) และระดับของสปอร์เชื้อราต่ำ
- บอยเลอร์ขนาดกลาง (250 กิโลวัตต์ <math>< X < 1 \text{ MW}</math>) สามารถใช้กับปริมาณความชื้นที่มากขึ้น (30-40%) และสามารถใช้กับเศษไม้ที่หยาบกว่าหม้อไอน้ำขนาดเล็กแต่ควรจำกัดระดับของสปอร์เชื้อราให้ต่ำเช่นเดียวกัน
- บอยเลอร์ขนาดใหญ่ (> 1 MW) จะทนต่อปริมาณความชื้นได้ดีกว่าทั้งสองแบบอยู่ในช่วง (30-55%) ระดับสปอร์เชื้อราสามารถสูงขึ้นได้ บางครั้งก่อนการนำไปเผาไหม้นั้นมักจะเก็บในไซโล (Silo) ซึ่งช่วยลดความเข้มข้นของระดับสปอร์เชื้อราในระหว่างพื้นที่จัดเก็บได้อีกทางด้วย

สำหรับเชื้อเพลิงยิ่งแห้งเท่าไรก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของบอยเลอร์ดีขึ้น ดังนั้นก่อนการนำไม้ไปเผาไหม้ จึงควรจะมีการทำให้ปริมาณความชื้นในไม้ระเหยออกไป โดยการทำให้แห้งด้วยแสงดวงอาทิตย์ หรือการนำฟลูแก๊สกลับมาใช้ในการระเหยปริมาณความชื้นในเศษไม้ด้วยความร้อนจากฟลูแก๊สแต่ในกระบวนการนี้จะลงทุนสูงอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับบอยเลอร์ขนาดเล็ก

การจัดเก็บเชื้อเพลิงเศษไม้โดยทั่วไปแล้วควรจะต้องให้ปริมาณความชื้นต่ำกว่า 30% และพบว่าเศษไม้สดหลังจากการตัดโค่นจะมีการสูญเสียปริมาณความชื้นของการเก็บรักษาประมาณ 2-3 % ต่อสัปดาห์ มากน้อยก็ขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บ (storage) เชื้อเพลิงเศษไม้ก่อนการนำไปใช้

2. การแจกแจงขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution) [3]

การแจกแจงขนาดของเศษไม้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องสับไม้ การตั้งระดับของใบมีดและการบำรุงรักษาความคมของใบมีดให้มีความคมอยู่เสมอ ดังนั้นเศษไม้ที่ได้จากเครื่องสับไม้จะสามารถตรวจวัดได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2- 3 แสดงการวัดขนาดของเศษไม้ [3]

ความต้องการของการแจกแจงขนาดอนุภาคของเชื้อเพลิงเศษไม้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของบอยเลอร์ที่จะนำเชื้อเพลิงเศษไม้ไปเผาไหม้ซึ่งสามารถแบ่งตามขนาดของบอยเลอร์ได้ดังนี้

- บอยเลอร์ขนาดเล็ก (<250 กิโลวัตต์) สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่มีขนาดความหนา 8-15 มิลลิเมตรและควรมีความยาวไม่เกิน 10 เซนติเมตร ถ้ามีจำนวนของเชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่เกินไปจนอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของบอยเลอร์
- บอยเลอร์ขนาดกลาง (250 กิโลวัตต์ <math>< X < 1 \text{ MW}</math>) ขนาดความหนาของเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ได้ 8-25 มิลลิเมตร ความยาวและความต้องการต่อจำนวนเชื้อเพลิงที่มีขนาดเกินจะคล้ายกับหม้อไอน้ำขนาดเล็ก
- บอยเลอร์ขนาดใหญ่ (> 1 MW) ปกติแล้วต้องการเชื้อเพลิงที่มีขนาดความหนา 25-35 มิลลิเมตร เพราะว่าบอยเลอร์ชนิดนี้จะป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้ถังบรรจุเชื้อเพลิง (hopper) ขนาดใหญ่ และต้องการเชื้อเพลิงจำนวนมากเพื่อป้องกันบอยเลอร์หยุดการทำงานเพราะขาดเชื้อเพลิง

3. ชนิดต้นไม้ (Tree Species) [3]

ชนิดต้นไม้มีผลกระทบต่อคุณภาพของเชื้อเพลิง เนื่องจากค่าความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) ของเศษไม้เนื้อแข็งจะมากกว่าเศษไม้เนื้ออ่อน ซึ่งหมายความว่าเปรียบเทียบที่ dry basis จำนวนของพลังงานของค่าความร้อนที่เท่ากันปริมาณของเศษไม้เนื้อแข็งที่ป้อนเข้าสู่บอยเลอร์จะใช้ในปริมาณน้อยกว่าเศษไม้เนื้ออ่อน

4. ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) [3]

ความหนาแน่นบัลค์ของเศษไม้เปียกคือน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของไม้ (kg/m^3) โดยทั่วไปแล้วเศษไม้เนื้ออ่อนน้ำหนักต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรของเศษไม้ที่ความชื้น 45 % จะหนัก 270-300 kg/m^3 และที่ปริมาตรเดียวกันของเศษไม้เนื้อแข็งจะหนัก 320-370 kg/m^3

ความหนาแน่นบัลค์ของเศษไม้แห้งเป็นน้ำหนักของเศษไม้ที่แห้งมากในหนึ่งลูกบาศก์เมตรสำหรับเศษไม้เนื้ออ่อนความหนาแน่นบัลค์ของเศษไม้แห้งมีน้ำหนัก 150-165 kg/m^3 สำหรับเศษไม้เนื้อแข็งมีน้ำหนัก 180-205 kg/m^3

5. ระดับของผงฝุ่นและสปอร์เชื้อราในเชื้อเพลิงเศษไม้ (Level of dust and fungal spores in the wood chip fuel) [3]

เศษไม้จะประกอบด้วยผงฝุ่น (dust) เสมอถ้ามีการเก็บรักษาที่จะเกิดแบคทีเรียและสปอร์เชื้อรา ผงฝุ่นนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการย่อยไม้ซึ่งสามารถป้องกันได้น้อยมาก เนื่องจากแบคทีเรียและสปอร์เชื้อราจะเจริญเติบโตในไม้ที่มีความชื้นจากนั้นมันจะเปลี่ยนความชื้นเป็น ความร้อนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้อุณหภูมิในเศษไม้ที่มีปริมาณความชื้นสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิเริ่มต้น 10-20°C ไปเป็น 90°C จนกองเศษไม้ที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นในการเก็บรักษาเศษไม้ควรจะมีกระบวนการลดความชื้น โดยการตากแสงอาทิตย์ การอบลมร้อนเพื่อรักษาคุณภาพของไม้ และป้องกันการเจริญเติบโตของสปอร์เชื้อราและแบคทีเรียก่อนที่จำนวนของสปอร์เชื้อรามากเกินไปจนทำให้เศษไม้เสื่อมคุณภาพ

6. ปริมาณขี้เถ้า (Ash content) ที่เหลือจากการเผาไหม้ [3]

ปริมาณขี้เถ้าของไม้บริสุทธิ์ไม่มีเปลือกจะมีปริมาณขี้เถ้าต่ำกว่า 0.5 % ถ้าไม่มีเปลือกถูกเผาไหม้จะมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ปริมาณขี้เถ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 1 % ถ้านำเศษไม้ (Wood chip) ที่มีเปลือกเผาไหม้เปอร์เซ็นต์ปริมาณขี้เถ้าอาจจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าไม่ได้รับการปนเปื้อน (contaminated) ด้วยดิน ทราาย หรือ กรวด นั้นความจุเถ้าก็จะเพิ่มไปเป็น 5-10 % สำหรับเรื่องนี้เหตุผลเดียวคือควรทำให้ไม้สะอาดปราศจาก ดิน ทราาย หรือกรวดก่อนนำไปใช้

2.2.2 สมบัติอุณหภาพ (Thermal Properties)

สมบัติอุณหภาพที่สำคัญของการวิเคราะห์การเผาไหม้ของไม้ประกอบด้วย ความร้อนจำเพาะของไม้และถ่านชาร์ การนำความร้อนของไม้และถ่านชาร์ และสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของถ่านชาร์ [1]

ความร้อนจำเพาะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นแต่ไม่ขึ้นกับความหนาแน่น (Density) หรือชนิด (Species) ความร้อนจำเพาะของไม้แห้ง (The specific heat of dry wood) คำนวณได้โดย

$$C(\text{dry}) = 0.1031 + 0.003867T \quad (\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}) \quad (2-1)$$

ความร้อนจำเพาะของไม้เปียก

$$C(\text{wet}) = [C(\text{dry}) + 4.19M] / (1 + M) + A \quad (\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}) \quad (2-2)$$

เมื่อ $A = (0.2355T - 1.32M - 6.191)M$

$T =$ อุณหภูมิในหน่วย $^\circ\text{K}$

$M =$ สัดส่วนปริมาณความชื้น (Fractional moisture content) ที่ Dry basis

กรณีเหนือจุดเส้นใยอิมิตัว $A=0$ และพบว่าความร้อนจำเพาะสามารถแปรผันได้ไม่เกิน 100% ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความชื้นดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2- 1 ความร้อนจำเพาะของไม้ตามอุณหภูมิและสัดส่วนปริมาณความชื้น [1]

Temperature $^\circ\text{K}$	Specific heat (KJ/kg $^\circ\text{K}$)			
	C(dry)	C(5%)	C(12%)	C(20%)
280	1.2	1.3	1.5	1.7
300	1.3	1.4	1.7	1.9
320	1.3	1.5	1.8	2.0
340	1.4	1.6	1.9	2.2
360	1.5	1.7	2.0	2.3

ความร้อนจำเพาะของเศษไม้และถ่านชาร์หรือเรียกว่าแกรไฟต์ (graphite) แปรผันจาก 0.715 kJ/kg $^\circ\text{K}$ ที่ 300 $^\circ\text{K}$ ไปถึง 2.04 kJ/kg $^\circ\text{K}$ ที่ 2,000 $^\circ\text{K}$ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$C(\text{char}) = 1.39 + 0.0036T \quad (\text{kJ/kg } ^\circ\text{K}) \quad (2-3)$$

การนำความร้อนของเศษไม้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (Density) ปริมาณความชื้น (Moisture content) และอุณหภูมิ สำหรับไม้หลากหลายสายพันธุ์ที่อุณหภูมิห้องการนำความร้อนเฉลี่ยตั้งฉากกับเกรน (grain) คำนวณได้โดย

$$K=S(0.1941+0.4064M)+0.01864 \text{ (W/m}^{\circ}\text{K)} \quad (2-4)$$

เมื่อ S คือ ความถ่วงจำเพาะที่ขึ้นกับปริมาณความชื้นและน้ำหนักสุทธิหลังจาก Oven dry

ตัวอย่าง S=0.47 และ M=0.10, K=0.129 W/m[°]K การนำความร้อนของไม้ที่เพิ่มขึ้นด้วยอุณหภูมิที่อัตราประมาณ 0.2% ที่อุณหภูมิห้องดังนั้นการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้น 10% สำหรับทุกๆ อุณหภูมิ 50°K

การนำความร้อนของถ่านชาร์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นซึ่งมีค่าประมาณ 0.052 W/m[°]K ณ อุณหภูมิห้องหรือหาได้จากสมการดังนี้

$$K=0.67S-0.071 \text{ (W/m}^{\circ}\text{K)} \quad (2-5)$$

สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของถ่านชาร์มีค่า 0.80-1.0 และไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ [4]

2.2.3 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญสำหรับวิเคราะห์การเผาไหม้ได้แก่ การวิเคราะห์ขั้นสูง (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์ขั้นต้น (Proximate Analysis) การวิเคราะห์ไพโรไลซิสของผลิตภัณฑ์ (Analysis of pyrolysis product) อธิบายดังต่อไปนี้ [1]

1. การวิเคราะห์ขั้นสูง (Ultimate Analysis)

เป็นการพิสูจน์หาเปอร์เซ็นต์ของธาตุ คาร์บอน C ไฮโดรเจน H ออกซิเจน O และไนโตรเจน N ตารางที่ 2-2 แสดงผลการวิเคราะห์ขั้นสูง (Ultimate Analysis) ของไม้ (Dry, Ash-Free weight percent) [1]

ตารางที่ 2- 2 การวิเคราะห์ขั้นสูงของไม้ [1]

Element	Average of 11 Hardwoods ^a	Average of 9 Softwood ^a	Oak Bark ^b	Pine Bark ^b
C	50.2	52.7	52.6	54.9
H	6.2	6.3	5.7	5.8
O	43.5	40.8	41.5	39.0
N	0.1	0.2	0.1	0.2
S	-	0.0	0.1	0.1
^a Tillman et al (1981) and ^b Anon (1972b)				

ธาตุ C ในไม้เนื้ออ่อน (softwood) มีอยู่ในช่วง 50-53% ในไม้เนื้อแข็ง (hardwood) 45-50% เนื่องจากมี lignin เป็นส่วนประกอบ ธาตุ H มีอยู่ประมาณ 6% ธาตุ O มีอยู่ในช่วง 40-44% S<0.1% และ N อยู่ในช่วง 0.1-0.2%

2. การวิเคราะห์ขั้นต้น (Proximate Analysis)

การทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่ต่างกันเพื่อหาความสัมพันธ์ของสารประกอบคือ ความชื้น (Moisture) ปริมาณขี้เถ้า (Ash Content) สารระเหย (Volatile Matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ตามมาตรฐาน ASTM standard test method D7582-10 และซัลเฟอร์ (Sulfur) ตามมาตรฐาน ASTM standard test method D5016-08[1] ตัวอย่างไม้ wood sample ใส่เข้าไปในเตา Oven dry ให้ความร้อนในอากาศจนถึง 103 °C ทำให้น้ำหนักคงที่จนได้ Dry wood จากนั้นให้ความร้อนต่อจนถึง 950°C จนกลายเป็น ถ่านชาร์ char และให้ความร้อนในอากาศต่อที่ 600°C จนกลายเป็น ash การได้ volatile สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยเพิ่ม heating rate Volatile ที่ได้จาก dry ash-free wood มีค่าอยู่ในช่วง 70-74% ขึ้นกับชนิดของไม้ด้วย ตามมาตรฐานของ ASTM นั้น volatile yield ที่ได้จากเปลือกไม้ bark ส่วนมากมีค่าใกล้เคียงกันที่ 70 เปอร์เซ็นต์

ภายใต้การเผาไหม้ของไม้แห้งจะได้ Volatile yield ที่ประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนอ่อน (light hydrocarbons) ทาร์ (tar) คาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) คาร์บอนไดรอกไซด์ CO₂ ไฮโดรเจน H และความชื้น moisture yield ดังตารางที่ 2-3 ส่วน yields ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราความร้อนของไพโรไลซิส ยังพบว่าทาร์ tar มีองค์ประกอบเฉลี่ยคือ C₆H_{6.2}O_{0.2} และไฮโดรคาร์บอนอ่อน light hydrocarbons คือแรกเริ่มมีเทน (primarily methane) ที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2- 3 การกระจายของไพโรไลซิสสำหรับไม้แห้งภายใต้เงื่อนไขการเผาไหม้ [1]

Product	Mass fraction
H ₂ O	0.25
CO	0.183
CO ₂	0.115
H ₂	0.005
Light hydrocarbons	0.047
Tar	0.20
Char	0.20

ค่าความร้อน (Heating value) ของเศษไม้ที่ต่างชนิดกันในเงื่อนไขของ moisture-free ที่ประกอบอยู่น้อยกว่า 15% นั้น higher heating value, HHV ของเศษไม้เนื้ออ่อนประมาณ 20-22 MJ/kg และของเศษไม้เนื้อแข็งประมาณ 19.20 MJ/kg ขณะที่ส่วนใหญ่เศษไม้เนื้ออ่อนจะมีสาร extractives และลิกนินมากกว่าเศษไม้เนื้อแข็ง จึงทำให้เศษไม้เนื้ออ่อนมีค่าความร้อนมากกว่าเศษไม้เนื้อแข็งเล็กน้อย

2.2.4 อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate)

ในการวิเคราะห์การเผาไหม้มีการสร้างแบบจำลองเพื่อหาอัตราการเผาไหม้ของแต่ละกระบวนการตั้งแต่ การทำแห้ง drying ไพโรไลซิส pyrolysis และการเผาไหม้ถ่านชาร์ Char burn อย่างไรก็ตามสำหรับการวิเคราะห์อัตราการเผาไหม้ใช้ single global rate ในรูปแบบของ Arrhenius [1] มักให้ค่าที่สมเหตุสมผลและเพียงพอแล้วซึ่งรูปแบบของสมการจะแสดงไว้ในสมการที่ 3-6 ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยามักจะขึ้นกับปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่แตกต่างกัน

2.2.5 สมบัติทางแร่ธาตุ (Mineral Properties)

ปริมาณแร่ธาตุของเศษไม้บริสุทธิ์สำหรับต้นไม้ในเขตอบอุ่นมีประมาณ 0.1-0.6% และเปลือกไม้ 3-5% ซึ่งสสารแร่ (mineral matter) ในไม้โดยทั่วไปประกอบด้วย เกลือจากแคลเซียม ธาตุโพแทสเซียม และธาตุแมงกานีส ซึ่งขี้เถ้า (Ash) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาไหม้ และ gasification นั้นเกิดจากแร่ธาตุเหล่านี้ [1] นั่นเอง กล่าวคือในระหว่างกระบวนการเผาไหม้ระหว่าง การเผาไหม้ ออกซิไดซ์ไอออนแร่ mineral ions oxidize และปล่อยสารระเหย Volatilize พื้นผิวของ ถ่านชาร์จะร้อนกว่าก๊าซอนุภาค ขี้เถ้ามีแนวโน้มที่จะขึ้นจากพื้นผิวถ่านชาร์ Char เหมือนกับปฏิกิริยา การเผาไหม้ถ่านชาร์จากอนุภาคนั้นขี้เถ้าก็จะถูกปล่อยออก ความรู้เกี่ยวกับเรื่องแร่พฤติกรรมที่เป็น สิ่งจำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ของขี้เถ้าสะสม รวมถึงขี้เถ้าเป็นผลต่อการกัดเซาะและการกัดกร่อน ภายในระบบการเผาไหม้

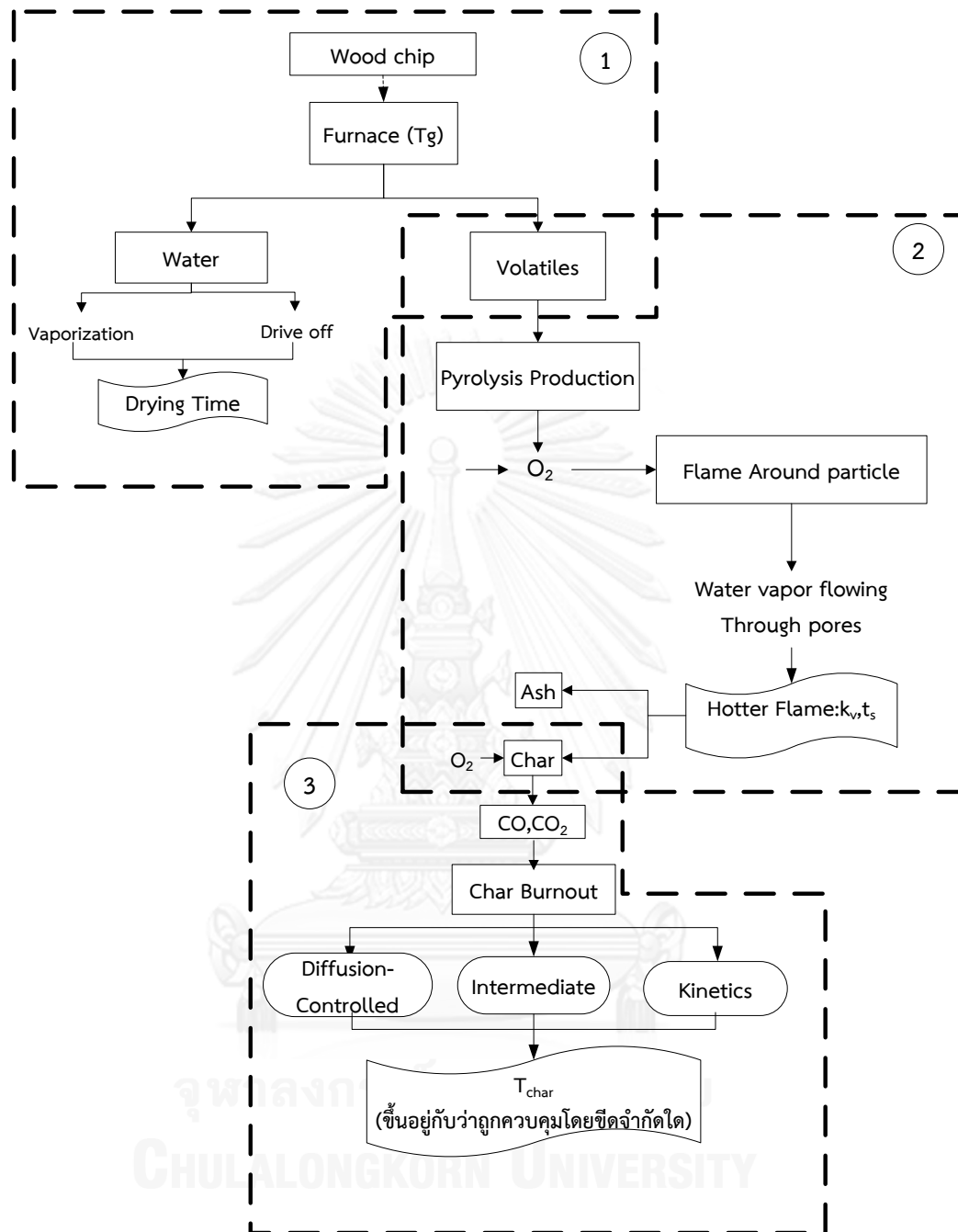
บทที่ 3 การเผาไหม้ไม้

การศึกษาขั้นต้นของการพัฒนาแบบจำลองการเผาไหม้ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบหาสมรรถนะของบอยเลอร์จากข้อมูลทุติยภูมิที่ได้จากแบบจำลองพื้นฐานการเผาไหม้ (FLIC) ของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษไม้ซึ่งมีการพัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณ อุณหภูมิ และส่วนประกอบทางเคมีของการไหลของก๊าซที่ออกจากเชื้อเพลิงเศษไม้ ที่เป็นสิ่งสำคัญที่จะตรวจสอบการปล่อยก๊าซไอเสียจากบอยเลอร์ชีวมวล อันประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมีที่ซับซ้อน [5] ขึ้นอยู่กับ ความชื้น เชื้อเพลิง ขนาดเชื้อเพลิง การแห้ง และการเผาไหม้ของถ่านชาร์

ในบทนี้จะอธิบายกระบวนการเผาไหม้ไม้และสมการที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองพื้นฐานการเผาไหม้ (FLIC) จะถูกนำมาใช้เพื่อทำนายอุณหภูมิก๊าซร้อน และการไหลของรังสีความร้อน (radiation heat flux) ของเบด (bed fuel) ที่เผาไหม้ในเตาซึ่งผลจากการเผาไหม้ที่ได้จากแบบจำลอง FLIC ดังกล่าวจะเลือกนำมาใช้เฉพาะผลที่ผ่านการเปรียบเทียบ (validated) กับข้อมูลที่ใช้เซนเซอร์อุณหภูมิวัด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 780 ถึง 930 °C [6] จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ในเตาจะถ่ายเทไปให้ยังผนังบอยเลอร์ ด้วยการพา (convection) และการแผ่ (radiation) ซึ่งจะทำให้ท่อในบอยเลอร์ได้รับความร้อนถึงจุดหนึ่งซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ได้จากการออกแบบบอยเลอร์ ซึ่งผลของการทำนายอุณหภูมิจากแบบจำลอง FLIC จะแสดงไว้ในภาพที่ 4-5 ซึ่งเป็นอุณหภูมิของการแผ่รังสีที่ตำแหน่งต่างๆบนผิวเบด (หรืออุณหภูมิก๊าซร้อน) ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง FLIC

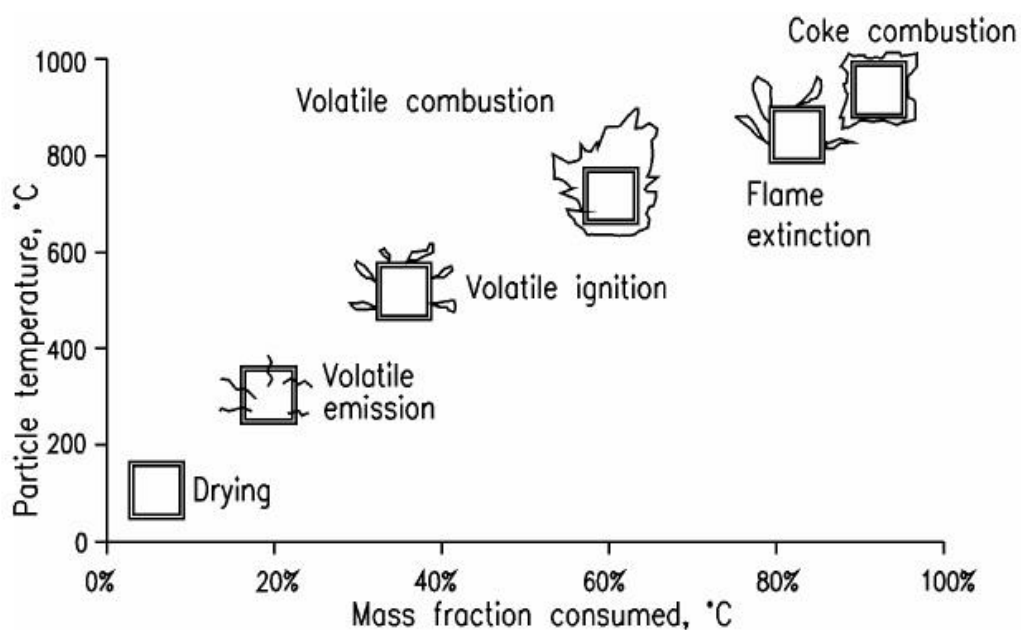
3.1 พื้นฐานของการเผาไหม้ไม้

เมื่อป้อนเศษไม้เข้าไปในบอยเลอร์อุณหภูมิของเชื้อเพลิงเศษไม้สัมผัสกับกระแสก๊าซร้อนก็จะกระบวนการเผาไหม้ตามลำดับได้แก่ การทำแห้ง การปล่อยสารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์โดยความสำคัญของแต่ละขั้นตอนบ่งชี้โดยการวิเคราะห์ขั้นต้น (Proximate Analysis) ของเชื้อเพลิงเมื่อเปรียบเทียบที่องค์ประกอบของสารระเหย และปริมาณถ่านชาร์ของเชื้อเพลิงโดยรายละเอียดของทั้งสามกระบวนการเผาไหม้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังภาพที่ 3-1 อธิบายขั้นตอนการเผาไหม้อุณหภูมิคาร์บอนของเชื้อเพลิงเศษไม้ จะเกิดกระบวนการทำให้แห้ง การปล่อยสารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์อย่างเป็นลำดับขั้นตอนโดยที่ระยะเวลาในการเผาไหม้ถ่านชาร์จะนานกว่า กระบวนการทำให้แห้ง และการปล่อยสารระเหย แต่สำหรับเชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทั้งสามกระบวนการจะเกิดขึ้นพร้อมกัน



ภาพที่ 3- 1 ขั้นตอนการเผาไหม้สถานะคาร์บอนของไม้ [7]

ซึ่งลักษณะของกระบวนการเผาไหม้จะเกิดขึ้นใน 6 ขั้นตอนติดต่อกันตามช่วงของอุณหภูมิต่างๆคือ Drying; Volatile emission; Volatile ignition; Volatile flame burning; Volatile flame extinction; และ Coke combustion ดังภาพที่ 3-2 แสดงอุณหภูมิของแต่ละช่วงการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเศษไม้



ภาพที่ 3- 2 ขั้นตอนการเผาไหม้ของไม้ [8]

3.2 กระบวนการเผาไหม้ไม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน โดยในกระบวนการเผาไหม้นั้นจะเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นความร้อน โดยสารตั้งต้นจะแปรรูปไปเป็นผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเถ้า เมื่อเชื้อเพลิงแข็งเกิดการเผาไหม้ จะมีกระบวนการสูญเสียมวลแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงที่สำคัญ ได้แก่

- **ช่วงที่ 1** การทำแห้ง (drying) เริ่มจากอนุภาคจะได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส
- **ช่วงที่ 2** การปล่อยสารระเหย (devolatilization) เกิดการไพโรไลซิสของอนุภาคเชื้อเพลิงแข็ง ได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ และถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์
- **ช่วงที่ 3** การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) เกิดขึ้นหลังจาก ไพโรไลซิสสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหยเกิดการเผาไหม้พร้อมๆ กันกับกระบวนการเผาไหม้ของถ่านชาร์

ผลที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงของการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับขนาด และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่ามีความชื้น สารระเหยอินทรีย์ ถ่านคงตัว และเศษเถ้า อยู่มาากน้อยเพียงใด สำหรับเชื้อเพลิงขนาดเล็ก กระบวนการทั้งสามจะเกิดขึ้นตามลำดับ แต่ในเชื้อเพลิงที่ขนาดใหญ่ จะเกิดทั้งสามกระบวนการขึ้นพร้อมๆกัน[4] ในแบบจำลอง reacting bed model FLIC code ของเชื้อเพลิงแข็งที่องค์ประกอบประกอบด้วย ความชื้น (moisture content) สารระเหย (volatile matter) คาร์บอนคงตัว (fix carbon) และขี้เถ้า (ash) กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งจะแบ่งเป็นส่วนย่อยๆได้แก่ การระเหยความชื้นออกจากเชื้อเพลิง การปล่อยสารระเหย และการก่อตัวของถ่าน

ชาร์ การเผาของสารระเหยไฮโดรคาร์บอนในแก๊สระเหยที่ลอย และการเผาไหม้ของอนุภาคเล็กๆของ ถ่านชาร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละกระบวนการในการเผาไหม้ของเตาเผาแบบตะกรับ แสดงได้ดังนี้[5]

3.2.1 การระเหยความชื้น (Moisture evaporation)

เมื่อเศษไม้ถูกป้อนเข้าเตา (furnace) จะได้รับความร้อนความชื้นก็สามารถขับออกจากเนื้อ เศษไม้ได้โดยการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างเศษไม้เปียกกับอากาศแห้ง ที่ไหลขึ้นมาจากข้างใต้ของ ตะกรับ (grate) อัตราการปล่อยความชื้นของเชื้อเพลิงแห้ง, R_{evp} , Kg/s [6]

$$R_{evp} = S_p h_m (C_{m,s} - C_{m,g}), \quad T_s < 100^\circ \text{C}, \quad (3.1)$$

หรือ

$$R_{evp} = Q_{cr} / H_{evp}, \quad T_s = 100^\circ \text{C} \quad (3.2)$$

เมื่อ S_p พื้นที่ผิวของเศษไม้ (m^2),
 h_m ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลระหว่างพื้นผิวของแข็งและก๊าซ (m/s),
 $C_{m,s}$ ความเข้มข้นของความชื้นที่พื้นผิวของแข็ง (kg/m^3),
 $C_{m,g}$ ความเข้มข้นของความชื้นในก๊าซที่ไหลผ่าน (kg/m^3),
 T_s อุณหภูมิของแท่งไม้แห้ง (K),
 H_{evp} ความร้อนระเหยของความชื้นจากเศษไม้ (kJ/kg) และ
 Q_{cr} ปริมาณความร้อนถ่ายโอนไปยังเศษไม้โดยการพาและแผ่รังสีความร้อน (W)

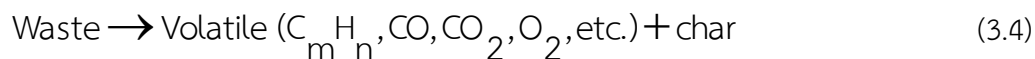
แสดงได้ดังนี้

$$Q_{cr} = S_p h_c (T_g - T_s) + \epsilon_s \sigma_b S_p (T_{env}^4 - T_s^4) \quad (3.3)$$

เมื่อ h_c คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา ($\text{W/m}^2 \text{K}$),
 T_g อุณหภูมิก๊าซของเตาเผา (K),
 T_{env} อุณหภูมิของเตาเผา (K),
 ϵ_s ค่า emissivity,
 σ_b ค่าคงที่ของ Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)

3.2.2 การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

สารระเหยในเชื้อเพลิงประกอบด้วยส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_mH_n), CO, CO₂, H₂, O₂ และอื่น แสดงได้ดังนี้



แบบจำลองปฏิกิริยาขั้นที่หนึ่ง (The one-step global model) [4] ใช้ในการอธิบายอัตรา การปล่อยสารระเหย dv/dt , s⁻¹

$$\frac{dv}{dt} = k_v (V_\infty - v) \quad (3.5)$$

โดยที่

$$k_v = A_v \exp(-E_v / RT) \quad (3.6)$$

เมื่อ A_v เป็นตัวประกอบ pre-exponential ของอัตราการปล่อยสารระเหย (s⁻¹),
 E_v พลังงานกระตุ้นของการปล่อยสารระเหย (J/mol),
 V_∞ ปริมาณสารระเหยทั้งหมด (ultimate yield) และ
 v ปริมาณสารระเหยที่เหลือในเศษไม้

3.2.3 การเผาไหม้ของอนุภาคสารระเหย (Combustion of volatile matter)

ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เศษไม้จะประกอบด้วยอนุภาคหลัก คือ CO, CO₂, H₂ และสาร ระเหยไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ในช่วงของการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวล เพื่อเพิ่ม อุณหภูมิภายในชีวมวลให้สูงขึ้น จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น ซึ่งมีการปล่อยไอสารระเหยและ เกิดเป็นถ่าน ส่วนสารระเหยโมเลกุลใหญ่ในชีวมวลที่ไม่ระเหยจะควบแน่นเกิดเป็นปฏิกิริยาไพโรไลซิส ขั้นที่สองโดยในขั้นนี้จะเกิดการเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิน (tars) ซึ่งส่วนประกอบของ น้ำมันดินที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลมีความซับซ้อนเพราะมีไฮโดรคาร์บอนมากกว่า 100 ชนิด [9] ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์โดยทั่วไปจะพิจารณาส่วนประกอบของปล่อยแก๊สระเหยจากชีวมวล โดยสมมุติว่ามีส่วนประกอบเป็น 22.81% C₂H₄, 38.2% CO₂ และ 38.99% H₂O โดยปริมาตร และ แบบจำลองการเผาไหม้เพื่อทำนายการปล่อยสารระเหย จะพิจารณานำ FG-Biomass-Functional- Group-Pyrolysis [10] มาใช้ในการพยากรณ์ปริมาณสารในกระบวนการ devolatilisation นี้

รูปแบบปฏิกิริยาสองขั้น (two-step global reaction) ที่นำมาใช้สำหรับการเผาไหม้ของ C₂H₄ และ CO ในกระบวนการนี้คือ





สารระเหยซึ่งจัดเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกจากกระบวนการระเหยส่วนแรกจะผสมกับอากาศบริเวณรอบๆ ก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งการเผาไหม้ของสารระเหยจำพวกก๊าซไฮโดรคาร์บอนนั้นมักจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแล้วแต่ยังขึ้นกับอัตราการผสมของแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศในเตา (Mixing rate) ซึ่งจะแปรผันตามสัดส่วนปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับบริเวณโดยรอบ (bed) อีกด้วย โดยกรณีของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่อัตราการผสมของสารระเหยจำพวกแก๊สเชื้อเพลิงกับอากาศในเตา R_{mix} , ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{ s}$) แสดงได้ดังนี้ [6]

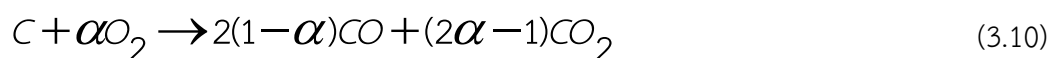
$$R_{\text{mix}} = C_{\text{mix}} \rho_{\text{gas}} \left\{ 150 \times \frac{D_g (1-\psi)^{2/3}}{d_p^2 \psi} + 1.75 \times \frac{V_g (1-\psi)^{1/3}}{d_p \psi} \right\} \times \min \left\{ \frac{C_{\text{fuel}}}{S_{\text{fuel}}}, \frac{C_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2}} \right\} \quad (3.9)$$

เมื่อ C_{mix} เป็นค่าคงที่ของสมการที่ 3.7 (empirical constant = 0.65),
 ρ_{gas} ความหนาแน่นของสารระเหย (kg/m^3),
 D_g การแพร่ของอากาศ (m^2/s),
 V_g ความเร็วอากาศ (m/s),
 d_p ขนาดเชื้อเพลิง (m),
 ψ สัดส่วนที่ว่างของเชื้อเพลิงเศษไม้ในบริเวณโดยรอบ (local void fraction of the fuel bed),
 C มวลของก๊าซที่เป็นสารตั้งต้นและ
 S ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วนผสมพอดีในการสันดาปของเชื้อเพลิง (stoichiometric coefficient) [6]

โดยในแบบจำลองนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยจะถูกสมมติให้ถูกควบคุมด้วยกระบวนการผสมนี้ [10]

3.2.4 การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion)

ผลิตภัณฑ์หลักของการเผาไหม้ถ่านชาร์เป็น CO และ CO_2



ที่สัดส่วนของ CO/CO_2 สามารถเขียนได้โดย

$$\text{CO} / \text{CO}_2 = 2500 \exp(-6420/T) \quad (3.11)$$

สำหรับช่วงอุณหภูมิจาก 730 ถึง 1170 K ซึ่งอัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์ทั้งหมดจะพิจารณาได้ดังนี้

$$R_{char} = \frac{P_{O_2}}{\frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_d}} \quad (3.12)$$

ที่ k_r และ k_d ($\text{kg}/\text{atm m}^2$) เป็นอัตราจลนของการเผาไหม้ (combustion kinetic rate) และอัตราการแพร่ (diffusion rate) ตามลำดับ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ทบทวนวรรณกรรม

4.1 การรวบรวมผลการศึกษากจากแบบจำลองการเผาไหม้และอภิปรายผล

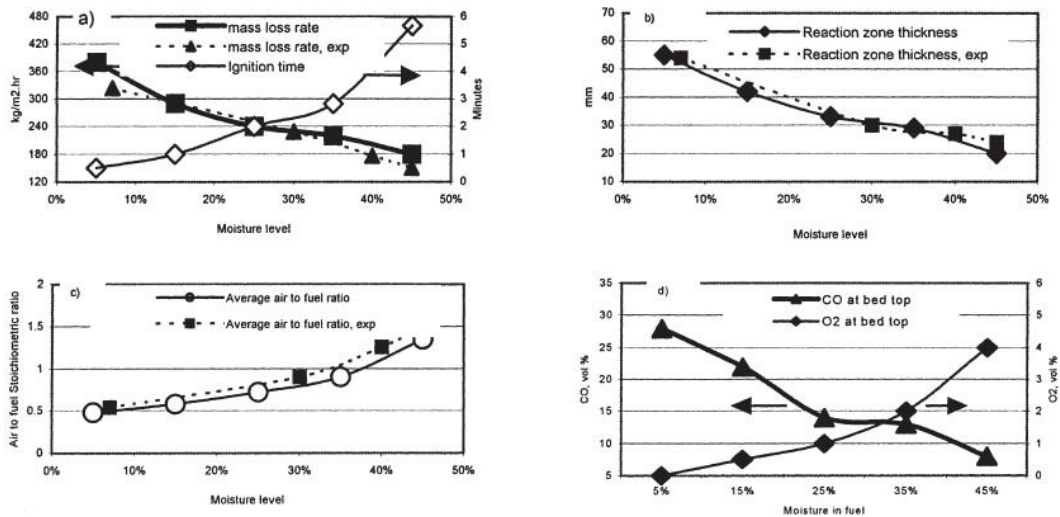
ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษไม้ ซึ่งประกอบด้วย การทำแห้ง การปล่อยสารระเหย และการเผาไหม้ถ่านชาร์ นั้นจะสังเกตเห็นว่าเมื่อใส่เชื้อเพลิงเศษไม้เข้าไปในเตาเผา เป็นช่วงของการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังเชื้อเพลิงชีวมวล เศษไม้จะเริ่มแห้ง ความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้จะลดลง จากนั้นจะมีการปล่อยสารระเหยจำพวกไฮโดรคาร์บอน และเกิดเป็นถ่าน สารระเหยซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกจากกระบวนการระเหยส่วนแรกจะผสมกับอากาศบริเวณรอบๆ ก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้จากแหล่งนี้จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ และอัตราการผสมของอากาศกับสารระเหยที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในเตาเผา

4.1.1 ผลกระทบของความชื้นในเชื้อเพลิง

ความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไปและเชื้อเพลิงชีวมวลจำพวกเศษไม้นั้นมีแนวโน้มจะเปลี่ยนแปลงตามสภาพภูมิอากาศ ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและพฤติกรรมทางการเผาไหม้มีความแตกต่างกันอย่างมาก และเป็นที่น่าทึ่งที่ทราบว่าความชื้นมีความสำคัญต่ออัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นสูงจะทำให้ติดไฟได้ยาก และได้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ต่ำลง จึงต้องอาศัยพื้นฐานและรายละเอียดของกระบวนการเผาไหม้ ที่ประกอบด้วย รูปแบบการกระจายแจกแจงของอุณหภูมิ (temperature profile) โครงสร้างโซนปฏิกิริยา (reaction zone structure) การเผาไหม้ที่ส่วนผสมสมบูรณ์พอดี (Stoichiometry of combustion) และสภาพการปล่อยก๊าซมลพิษ (gaseous emissions) ซึ่งองค์ประกอบและปัจจัยเหล่านี้เป็นฟังก์ชันตัวแปรของปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้ [11]

จากข้อมูลผลการจำลองการเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะแกรง โดย Y.B. Yang และคณะ [11] ที่แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 เป็นผลที่ได้จากการศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบของความชื้นต่อการเผาไหม้ซึ่งผลได้เปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อใช้เศษไม้ขนาด $2 \times 2 \times 2$ ซม. ที่ 7.5% ความชื้นและแบบจำลองของเศษของเสียชีวมวล (wastes) ขนาด $2 \times 2 \times 0.5$ ซม. ที่ 30, 40, 45 และ 47% ความชื้น เมื่อมีการไหลของอากาศปฐมภูมิ $0.13 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ที่ $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าอัตราเฉลี่ยของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เบด (ภาพที่ 4-1a) จะลดลงถ้าความชื้นในเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น การจุดติดไฟของเชื้อเพลิงในเตาจะต้องใช้เวลานานขึ้นและความหนาของโซนปฏิกิริยาจะลดลงตามปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 4-1b) และอัตราส่วนผสมระหว่างค่าอากาศเฉลี่ยต่อเชื้อเพลิงที่ทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้สมบูรณ์พอดี จะเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ไปเป็น 1.5 (ภาพที่ 4-1c) นอกจากนี้ระดับปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงยังส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สไอเสีย (ภาพที่ 4-1d) โดยเชื้อเพลิงที่แห้งจะก่อให้เกิด CO ขึ้นที่ด้านบนของผิวเชื้อเพลิงเพราะปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอต่อกระบวนการเผาไหม้ สำหรับเชื้อเพลิงเปียกจะมี O_2 สูงแต่ CO ต่ำ ที่ด้านบนของเบด โดยประสิทธิภาพเตาเผาจะดีขึ้นถ้าเชื้อเพลิงมีความชื้นลดลง

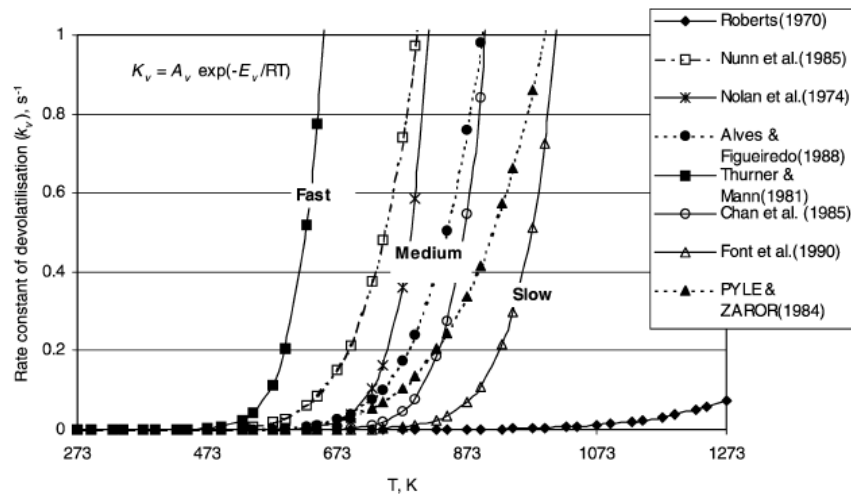
เนื่องจากเชื้อเพลิงแห้งสามารถเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพของเชื้อเพลิงในขั้นตอนต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วมากกว่า และลูกไหมได้ดีกว่าเชื้อเพลิงเปียกที่สภาวะการใช้งานเดียวกัน



ภาพที่ 4- 1 ผลกระทบของระดับความชื้นในเชื้อเพลิง [11]

4.1.2 ผลกระทบของการปล่อยสารระเหยในเชื้อเพลิง

สัดส่วนของปริมาณอนุภาคสารระเหยที่ปล่อยออกมาเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์จะเพิ่มสูง เมื่อชีวมวลมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกินระดับที่กำหนด ซึ่งจากการศึกษาวิจัยจำนวนมาก [6, 10-12] ได้แสดงให้เห็นว่า อัตราการปล่อยสารระเหยของชีวมวลจะเกิดขึ้นแตกต่างกันไปอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่แตกต่างกัน โดย Y.B. Yang และคณะ [11] ได้ประเมินผลแตกต่างในการปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงที่มีผลกระท่อพฤติกรรมกรรมการเผาไหม้ ชีวมวลและของเสีย ภายใต้สถานการณ์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเบด และแสดงผลของอัตราการปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงอาที่อุณหภูมิต่างๆ ไว้ในภาพที่ 4-2 และ ตารางที่ 4-1 ได้สรุปแสดงผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ของอัตราการปล่อยสารระเหย (rate parameters) เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมของอัตราการระเหยของเชื้อเพลิง ซึ่งได้จากคณะนักวิจัยต่างๆ



ภาพที่ 4- 2 แสดงผลของการปล่อยสารระเหยของเชื้อเพลิงชีวมวล เมื่อมีขนาดอนุภาคในช่วง 6-90 มม. ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่างๆ [6]

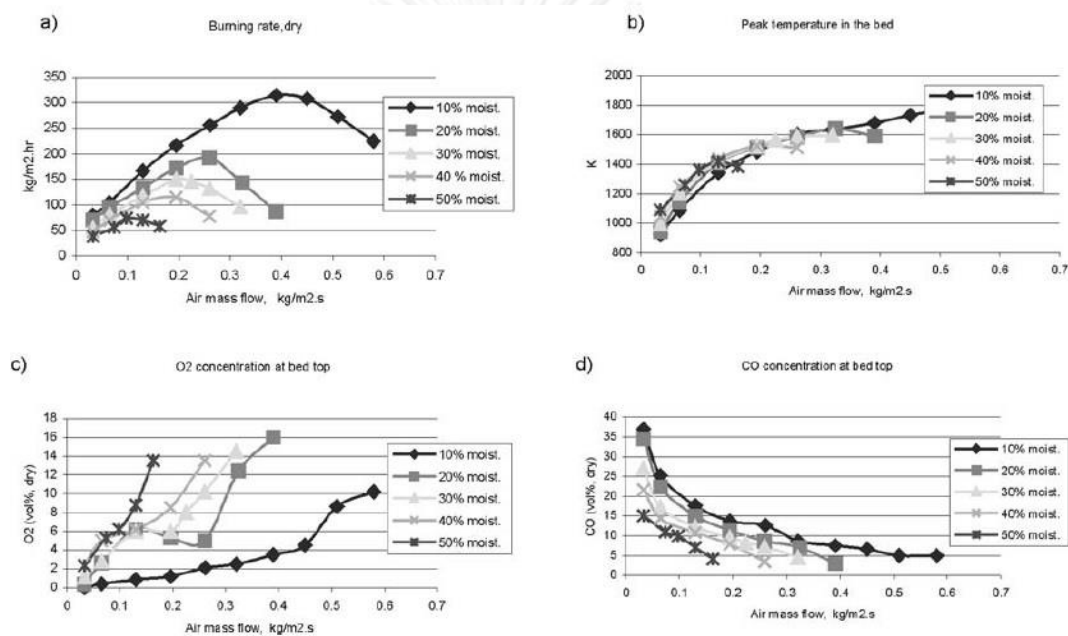
ตารางที่ 4- 1 ค่าพารามิเตอร์ของอัตราการปล่อยสารระเหย (rate parameters) ซึ่งได้จากคณะนักวิจัยต่างๆ [11]

Rate Parameters	Thumer Mann (1981)	Nunn et al. (1985)	Alves and Figueiredo (1988)	Pyle and Zaror (1984)	Font et al. (1990)
Av, 1/s	5.16×10^6	3.4×10^4	7.0×10^4	3.0×10^3	2.98×10^3
Ev, kJ/mol	84	69	83	69	73.1
Rating	Very fast	Fast	Medium	Slow	Very slow

4.1.3 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ

การพยากรณ์ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิต่อพฤติกรรมเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยแบบจำลอง FLIC ที่แสดงผลในภาพที่ 4-3 นั้นเป็นผลจากการพิจารณากรณีที่ค่าความชื้นมีค่าต่างๆ กันในช่วง 10 ถึง 50 % เมื่ออุณหภูมิของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหนือเบดได้ถูกตั้งไว้ที่ $1173 \text{ }^{\circ}\text{K}$ และค่า emissivity เป็น 0.8 (ภาพที่ 4-3a) แสดงให้เห็นว่าอัตราการเผาไหม้จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิเพิ่มขึ้นแต่หลังจากเพิ่มไปจนถึงจุดสูงสุด จะพบว่าหากมีการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเกินกว่านั้นอัตราการเผาไหม้จะลดลง โดยผลจากค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นจะพบค่าอัตราการเผาไหม้สูงสุดมีค่าลดลงและค่าอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิที่ให้ค่าอัตราการเผาไหม้สูงสุดก็จะลดลงด้วย (ภาพที่ 4-3b) แสดงการพยากรณ์อุณหภูมิสูงสุดในเบด ด้วยแบบจำลอง FLIC จะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดในเบดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มของอัตราการไหลของ

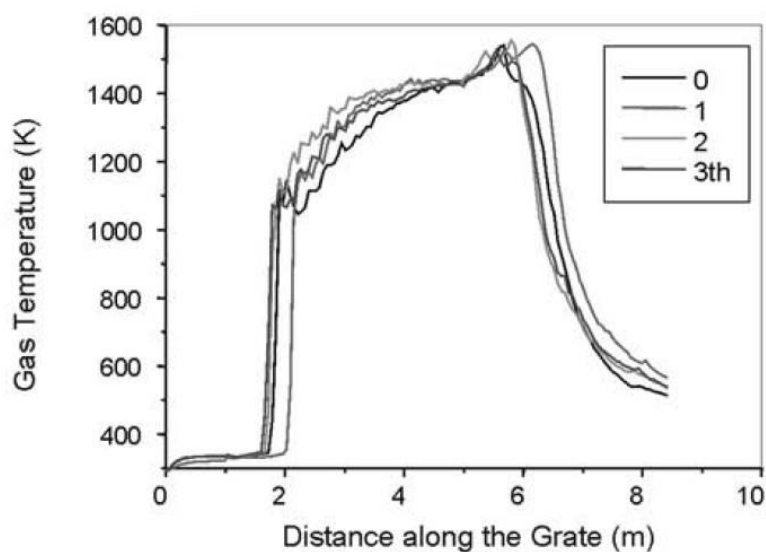
อากาศปฐุมภูมิและการเพิ่มขึ้นนั้นจะเริ่มช้าลงเมื่ออัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิมีค่าเกินกว่า $0.15 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ โดยผลการคำนวณของ [12] พบว่าเมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุดจะมีการเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยถ้าอากาศปฐุมภูมิเกิน $0.02 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 4-3c และ ภาพที่ 4-3d) แสดงการพยากรณ์ความเข้มข้นของ O_2 และความเข้มข้นของ CO ที่เบตเมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิด้วยแบบจำลอง FLIC พบว่าปริมาณ O_2 ที่เบตเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิโดยที่ค่าอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิเดียวกัน ค่าปริมาณ O_2 ที่เบตเพิ่มขึ้นเมื่อเชื้อเพลิงมีปริมาณความชื้นสูงขึ้นขณะที่ปริมาณ CO ที่เบตจะแสดงผลในทางตรงข้ามกัน



ภาพที่ 4- 3 ผลกระทบจากการปรับอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิและผลจากความชื้นของเชื้อเพลิงต่างๆกัน

4.1.4 ผลกระทบต่ออุณหภูมิก๊าซร้อนจากแบบจำลอง FLIC

การกระจายของรังสีความร้อน (radiation heat flux) ที่พื้นผิวด้านบนของเบตส่งผลต่ออุณหภูมิของก๊าซร้อน โดยจากการใช้แบบจำลอง FLIC [11] เพื่อทำนายการกระจายแฉกแฉงของอุณหภูมิการแผ่รังสี (radiation temperature profile) ของบอยเลอร์ที่มีการออกแบบให้มีขนาดความจุของเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการเผาไหม้ที่ ประมาณ 12 ตัน/ชม. ด้วยระบบการเผาไหม้ชนิดตะกรับแบบเคลื่อนที่ มีขนาดของตะกรับ ยาว 9.84 เมตร และกว้าง 3.76 เมตร โดยผลการพยากรณ์ที่แสดงไว้ในภาพที่ 4-4 พบว่า อุณหภูมิของการแผ่รังสีที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นผิวเบตมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่อยู่ที่ประมาณ 1173 K หรือ $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเมื่ออุปกรณ์ทำงานที่สภาวะคงตัว และที่การไหลคงที่ อุณหภูมิดังกล่าวจะเป็นอุณหภูมิของผนังเตาและอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากเบตอย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง และรูปแบบการไหลภายในบอยเลอร์



ภาพที่ 4- 4 แสดงอุณหภูมิของการแผ่รังสีที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวเบด (หรืออุณหภูมิก๊าซร้อน) ที่คำนวณด้วยแบบจำลอง FLIC [11]

4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเชื้อเพลิงไม้ไปใช้เป็นพลังงาน

ในปี 1995 จากการวิจัยของ Jirjis R. [13] ได้ใช้เทคโนโลยีสำหรับการเก็บรักษา และการทำแห้งของเชื้อเพลิงไม้ เนื่องจากผลกระทบคือ การสูญเสียอนุภาคระหว่างการทำให้แห้ง คุณภาพ และธรรมชาติของชีวมวลไม้ โดยได้ทำการทดลองโรงเก็บแบบระบายอากาศ และทดลองผลกระทบของการเก็บรักษาเชื้อเพลิงไม้ขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปสู่การกำหนดนิยาม และคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของไม้ ศึกษาผลกระทบของการเก็บรักษาและการทำแห้งของเชื้อเพลิงไม้ขนาดเล็กโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทดลองโดยใช้โรงเก็บแบบระบายอากาศ พบว่าการเก็บรักษามีผลกระทบคือ จะมีการสูญเสียอนุภาคระหว่างการทำให้แห้ง สูญเสียคุณภาพของเชื้อเพลิงด้วยถ้ามีการเก็บเชื้อเพลิงไว้นานเกินไป

ในปี 2009 สำหรับงานวิจัยของ Chau J. และคณะ [14] ได้อธิบายว่าความต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (boiler) และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างแตกต่างกัน โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะถูกกำหนดโดยค่าความชื้นของเชื้อเพลิง สำหรับการประเมินผลทางด้านเศรษฐกิจพบว่าถ้าติดตั้งบอยเลอร์ชีวมวลไม้ (ไม้อัดเม็ด (Wood pellet) หรือเศษไม้ (Wood chip)) จำเป็นต้องมีการเตรียมเชื้อเพลิงให้มากกว่าความต้องการตลอดทั้งปีประมาณ 40% เพื่อลดความเสี่ยงของการใช้งาน และพบว่าถ้าเปรียบเทียบระหว่างบอยเลอร์ที่ใช้ชีวมวลไม้กับบอยเลอร์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงนั้น ในเรื่องของมลพิษ (Emission) เช่น particulate matters (PM) และ เถ้า (Ash) จะสูงกว่าบอยเลอร์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ดังนั้นถ้ามีการใช้บอยเลอร์แบบ Wood Biomass Boiler อาจจะต้องมีการติดตั้ง ESP ซึ่งจะสามารถช่วยลด PM จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเศษไม้ลงได้เหลือในระดับเดียวกับบอยเลอร์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ

ในปี 2001 จากการศึกษาวิจัยของ Enrio Biagini และคณะ [15] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการปล่อยสารระเหย (Devolatilization) ถึงความต่างระหว่างเชื้อเพลิง ถ่านหิน ชีวมวล และถ่านหินผสมกับชีวมวล โดยใช้การวิเคราะห์ Kinetic Analysis เพื่อหาผลการทดลองที่เหมาะสม และตรวจสอบ Sub-model อย่างง่ายเพื่อใช้ในการเข้าใจ Combustion Code ให้มากขึ้นเทียบกับ SFOR Model เพื่อหาความต่างของการปล่อยสารระเหยที่เหมาะสมของวัสดุ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบ Isothermal run ในช่วงอุณหภูมิ 50 หรือ 100 °C เพื่อประมาณความต่างของอัตราการปล่อยสารระเหย (Devolatilization rate) ด้วยสมการ Global mass balance ร่วมกับ Arrhenius law ภายใต้เงื่อนไขของ Kinetic parameter ในการวิเคราะห์พบว่า การเปลี่ยนแปลง อัตราการปล่อยสารระเหย มีผลต่อ Kinetic parameter และ ถ้ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากจะทำให้ความสัมพันธ์คลาดเคลื่อนได้ด้วย สำหรับการศึกษานี้ในส่วนของการถ่านหินผสมกับชีวมวลในช่วงของกระบวนการ Devolatilization นั้นได้ศึกษาโดยใช้วิธี thermogravimetric Analysis โดยดูผลการเปลี่ยนแปลงของ Weight loss เทียบกันระหว่างผลการทดลองกับผลการคำนวณ แสดงให้เห็นว่าในระหว่างกระบวนการ Devolatilization ของเชื้อเพลิงไม่มีผลต่อ thermal decomposition ของเชื้อเพลิงถ่านหินและชีวมวลซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าการ Devolatilization อาจมีผลกระทบของ Volatile Compound จากวัสดุอื่นและแนะนำว่าถ้าใช้เชื้อเพลิงผสมกันระหว่างถ่านหินกับชีวมวลหรือชีวมวลอื่นๆ จะต้องมีความร้อนของเชื้อเพลิง (Heating value) สูงกว่า 20 MJ/kg เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถ auto-thermal combustion แต่ถ้ามั่นใจจริงๆ ให้พิจารณาแบบ Direct-combustion แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษา Devolatilization จะต้องมีการประเมิน NO_x emission ที่ได้จากการตรวจสอบการเผาไหม้โดยวิธีการวัด NO_x โดยตรงระหว่างกระบวนการเผาไหม้เพื่อเข้าใจการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ และทฤษฎีเกี่ยวกับ Devolatilization process ของชีวมวล และ ถ่านหิน-ชีวมวลผสมกันเพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ weight loss ของเชื้อเพลิง ถ่านหินและชีวมวล

ในปี 2012 จากการศึกษาวิจัยของ A. Soria-Verdugo และคณะ [16] ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล pine pellets และ sewage sludge โดยการใช้ Thermogravimetric analysis ภายใต้ความดันบรรยากาศและใช้ Distributed Activation Energy Model (DAEM) จากนั้นใช้พลังงานกระตุ้นของการปล่อยสารระเหย (activation energy) และตัวประกอบความถี่ในการกำหนดลักษณะของ kinetics เพื่อทำนายกระบวนการของ Devolatilization และประมาณค่าของกระบวนการทั้งสองกรณี โดยที่อธิบายว่า พลังงานกระตุ้นของการปล่อยสารระเหยและตัวประกอบความถี่นี้สามารถหาได้ 6 วิธีการดังต่อไปนี้

- การวัดอัตราการปล่อยสารระเหยของอัตราความร้อน 3 ความแตกต่างโดยทั่วไปแล้วอยู่ระหว่าง 3 ถึง 30 K/min
- สามารถคำนวณและ Plot หาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(a/T^2)$ vs $1/T$ ณ อัตราการปล่อยสารระเหย
- กำหนดได้จาก Activation energy, E_a และ frequency factor, K_0 จากความชัน (slope) และ Arrhenius plots ณ แต่ละอัตราการปล่อยสารระเหย

- Plot และหาความแตกต่างของค่า E_a กับ อัตราการปล่อยสารระเหยที่ได้จาก $f(E_a)$
- ทำนายอัตราการปล่อยสารระเหยที่อัตราความร้อนต่างกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการทำนายอัตราการปล่อยสารระเหยที่ความร้อนค่ากันหรือที่เรียกว่า thermogravimetric tests และนำค่าที่ได้ของกระบวนการปล่อยสารระเหยเทียบกับผลการทดลอง ภายใต้ความแตกต่างของอัตราความร้อน คือ 10 15 และ 20 K/min อัตราการไหลของไนโตรเจน 60 ml/min ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการทำนายการปล่อยสารระเหยคือ การคำนวณ และ Plot หาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(a/T^2)$ vs $1/T$ ณ อัตราการปล่อยสารระเหย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

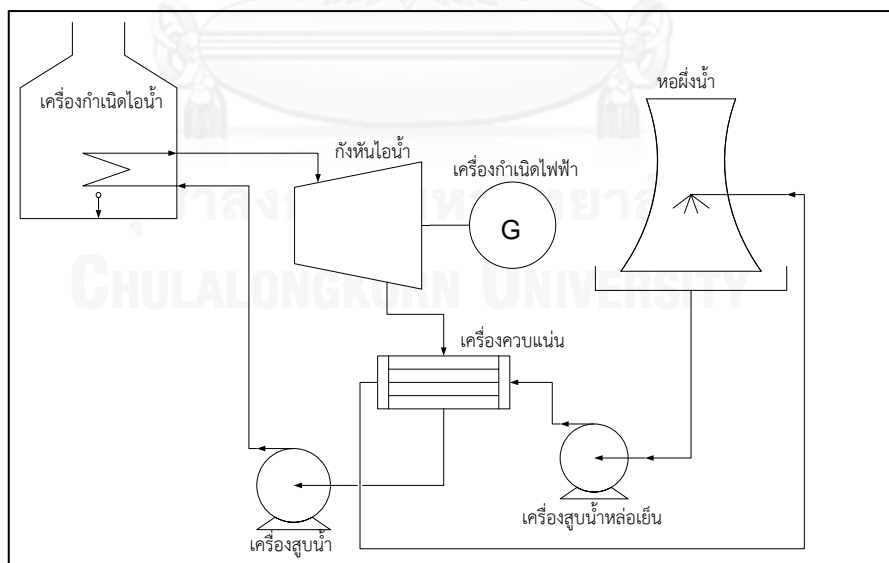
บทที่ 5

โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำและการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์

ในบทนี้มีนำเสนอที่แบ่งออกเป็นสามส่วน ในส่วนแรกจะนำเสนอเกี่ยวกับหลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล สมดุลความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าชีวมวล ส่วนที่สองทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ และส่วนสุดท้ายจะนำเสนอแบบจำลองของวัฏจักรแรงคิน อย่างง่ายที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และคำนวณหา ความร้อน งาน และประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคิน และประสิทธิภาพของบอยเลอร์

5.1 โรงไฟฟ้าที่ใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง

หลักการทำงานทั่วไปของโรงไฟฟ้าที่ใช้แหล่งพลังงานชีวมวลจากเศษไม้สามารถนำเสนอได้ดังนี้ เมื่อเศษไม้สับ (wood chip) หรือชีวมวลถูกป้อนเตาเผาจะเกิดการลุกไหม้เป็นก๊าซร้อน แล้วถูกส่งผ่านไปยัง Radiation room ของเครื่องกำเนิดไอน้ำ และถ่ายเทความร้อนให้แก่ Drum ของเครื่องกำเนิดไอน้ำ ภายใต้ความดันน้ำ 35-50 บาร์ และอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส จากนั้นไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงนี้ จะส่งไปยังกังหันไอน้ำเพื่อปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าที่ใช้โดยทั่วไปเป็นแบบ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Steam Power Plant) โดยมีส่วนประกอบหลักที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Steam generator) กังหันไอน้ำ (Steam turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ดังแสดงภาพที่ 5-1



ภาพที่ 5- 1 ระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้กังหันไอน้ำเป็นต้นกำลังและใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

ปกติการผลิตไฟฟ้าในระบบนี้มีข้อดีคือ เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและสามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย และใช้เงินลงทุนต่ำกว่าแบบอื่นๆ เมื่อเทียบกับกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เท่ากัน

ในแต่ละอุปกรณ์หลักมีรายละเอียดของเทคโนโลยีที่เลือกได้แก่ ระบบน้ำ (Water treatment system) ระบบผลิตไอน้ำ (Steam generator) และระบบผลิตไฟฟ้าซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ระบบน้ำ (Water treatment system)

ระบบน้ำป้อนเป็นส่วนหนึ่งของระบบการผลิตไอน้ำ ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการผลิตไฟฟ้า แหล่งน้ำดิบจากคลองชลประทานหรือแหล่งน้ำที่เตรียมไว้นำไปผ่านกระบวนการกรองเพื่อเป็นน้ำประปาใช้ภายในโรงงาน ระบบน้ำหล่อเย็น และนำไปจัดแร่ธาตุก่อนส่งไปยังเครื่องผลิตไอน้ำ ในระบบการผลิตน้ำป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวล น้ำจากแหล่งน้ำจะถูกปั๊มผ่านชุดกรองน้ำด้วยชั้นทรายและชุดจับกัลินด้วยผงถ่าน (Sand & carbon filter) มาพักที่ถังเก็บน้ำกรอง และปั๊มผ่านชุดแลกเปลี่ยนไอออน (De-ionization) จากนั้นน้ำที่ผ่านกระบวนการแล้วจะถูกปั๊มไปยังถังเก็บ (Demin water tank) เพื่อใช้ในการป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำต่อไป

5.1.2 ระบบผลิตไฟฟ้า (Electrical system)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีหลักการทำงานโดยเริ่มต้นที่เมื่อกังหันได้รับไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง โดยจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งต่อเข้ากับกังหันไอน้ำจะค่อยๆ เริ่มหมุนและเพิ่มความเร็วรอบจนมีความเร็วรอบคงที่ประมาณ 1,500 รอบต่อนาทีหลังจากนั้นระบบควบคุมและปรับแรงดันอัตโนมัติจะจ่ายกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตให้ได้แรงดันไฟฟ้า ความถี่ และการลำดับเฟส ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อไอน้ำที่ผลิตจากหม้อไอน้ำจะถูกป้อนเข้าสู่กังหันไอน้ำเพื่อเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานกลที่เพลลาของกังหันไอน้ำเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนไอน้ำที่ออกจากกังหันจะควบแน่นกลายเป็นของเหลวที่คอนเดนเซอร์ น้ำที่ถูกควบแน่นบริเวณอุปกรณ์คอนเดนเซอร์จะถูกป้อนกลับเข้าสู่หม้อไอน้ำเพื่อใช้ต่อไปอีกครั้ง

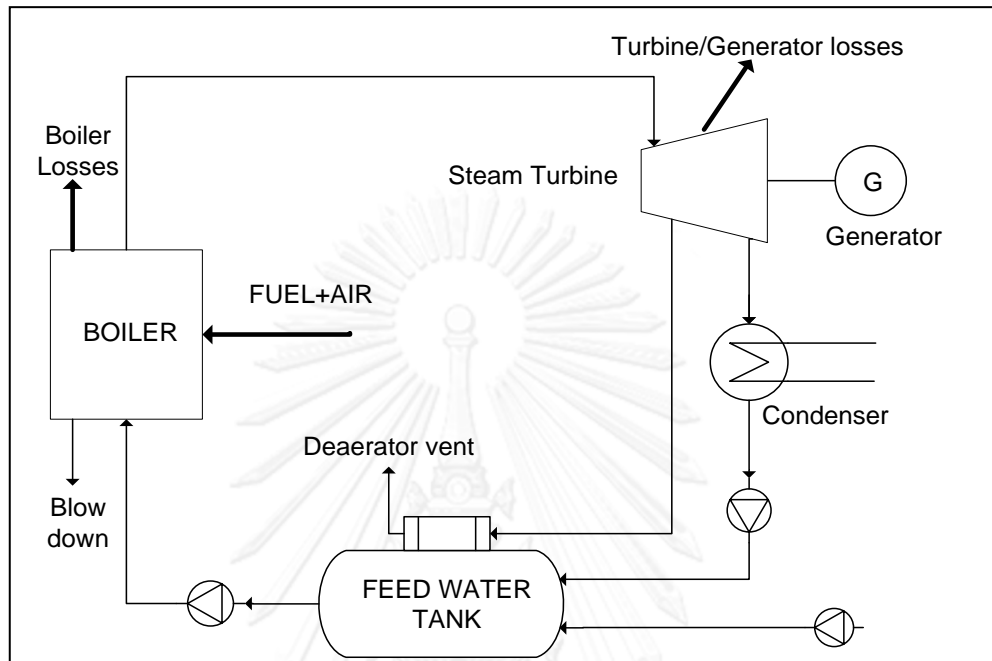
5.1.3 ระบบผลิตไอน้ำ (Boiler)

สำหรับระบบผลิตไอน้ำที่เหมาะสมกับโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลคือ ระบบเผาไหม้แบบเบดนิ่ง (Fixed bed combustion) ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยียอมรับกันว่ามีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงรองจากระบบฟลูอิดไดซ์เบดซึ่งมีประสิทธิภาพสูงที่สุดแต่มีราคาแพงและใช้ได้กับเชื้อเพลิงบางชนิดเท่านั้น รวมถึงจะต้องมีการย่อยขนาดให้มีความเหมาะสมต่อการป้อนเข้าสู่ระบบเผาไหม้ ดังนั้นในระบบ Fixed Bed จึงมีการพัฒนาระบบใช้กันอย่างกว้างขวาง สามารถนำเทคโนโลยีระบบการเผาไหม้มาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลได้หลากหลายชนิด เช่น เศษไม้ หรือเปลือกไม้ชนิดต่างๆ ซึ่งเลือกรวมทั้งวัสดุเหลือทิ้งประเภทอื่นๆ จากอุตสาหกรรมเกษตร ซึ่งข้อดีของระบบการเผาไหม้แบบ Fixed bed คือ มีประสิทธิภาพโดยรวม (โดยปกติมากกว่า 80%) ซึ่งมีข้อได้เปรียบในด้านอัตราการป้อนของเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า แต่ให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้ความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 สมดุลความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าชีวมวล

จากหลักการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลจากเศษไม้ยางพาราหรือวัสดุทางการเกษตร นิยมใช้เทคโนโลยีโรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Steam power plant) เพราะเป็นโรงไฟฟ้าที่สามารถนำเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษไม้ยางพาราสับ หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเผาไหม้ให้ความร้อนเพื่อ

ผลิตไอน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง แล้วนำไปหมุนกังหันไอน้ำเพื่อจุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีรูปแบบของสมดุลความร้อนของโรงไฟฟ้าแสดงในภาพที่ 5-2



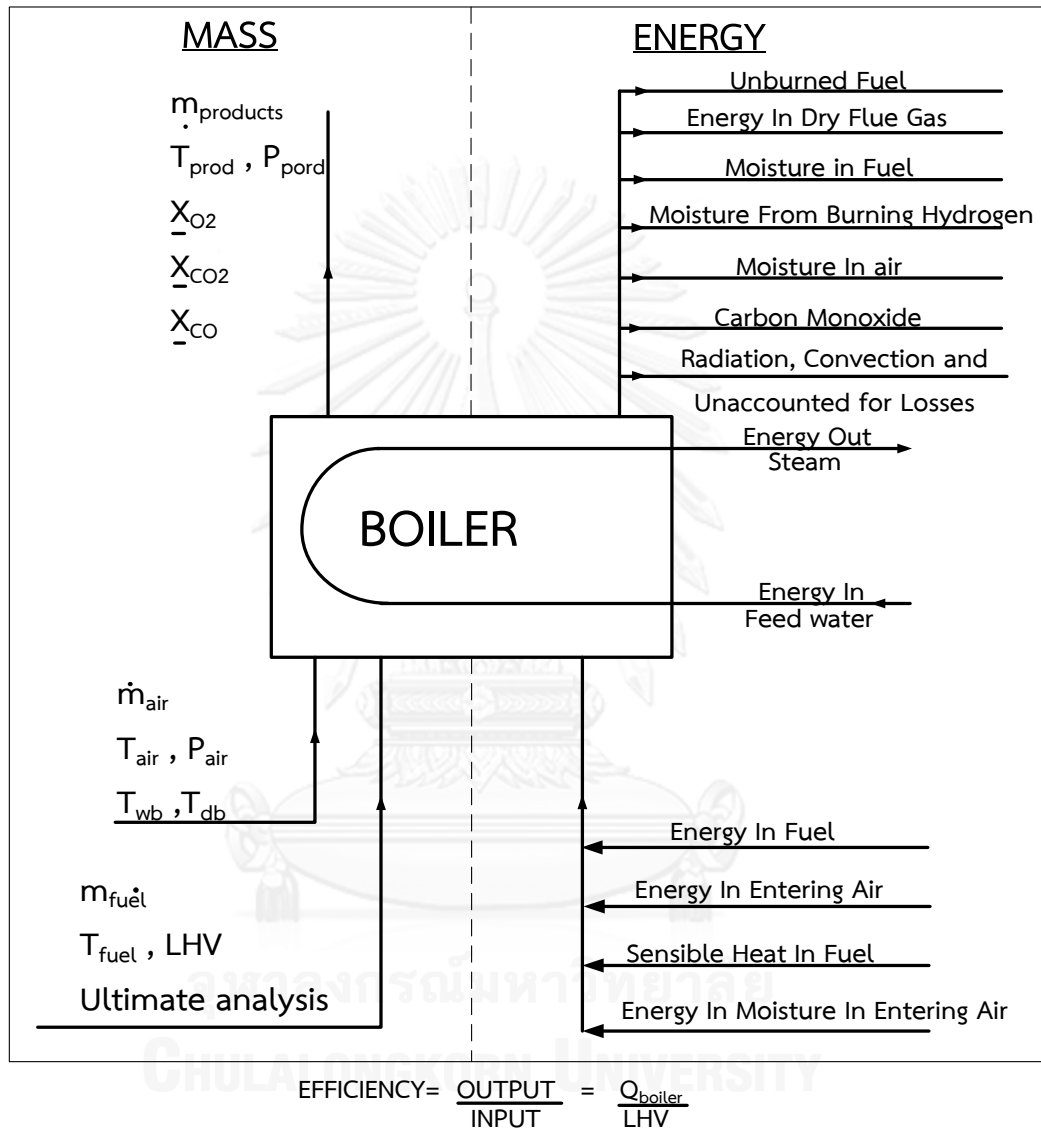
ภาพที่ 5- 2 แผนผังสมดุลความร้อนของโรงไฟฟ้าชีวมวล

สมดุลพลังงานของบอยเลอร์ (Boiler Energy balance)

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงของแข็งหลายชนิดที่ใช้กับระบบผลิตไอน้ำ steam generating system เป็นระบบที่ใช้สำหรับการผลิตความร้อนหรือผลิตพลังงานในอุตสาหกรรม และการผลิตไฟฟ้าจึงมีการกำหนดการทดสอบประสิทธิภาพของบอยเลอร์ที่เป็นมาตรฐาน ASME Boiler test Codes แห่งสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในภาพที่ 5-3 นั้นลักษณะพลังงานที่สำคัญของการแสดงค่าของการเผาไหม้ของบอยเลอร์ สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

1. พลังงานที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงทางเคมี
2. พลังงานดูดซึมโดยไอน้ำที่สร้างขึ้น
3. การสูญเสียพลังงานเนื่องจาก dry flue gas
4. การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิง
5. การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความชื้นในการเผาไหม้ของอากาศ
6. การสูญเสียพลังงานเนื่องจากความชื้นที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง

7. การสูญเสียพลังงานจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์
8. การสูญเสียพลังงานจากการถ่ายเทความร้อน รังสีและผลกระทบอื่น ๆ



ภาพที่ 5- 3 สมดุลพลังงานของบอยเลอร์

5.3 ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์: กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์คือ พลังงานไม่สามารถถูกสร้างให้เพิ่มขึ้นหรือทำลายให้ลดลงไปได้แต่สามารถเปลี่ยนรูปหรือถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ โดยผลรวมของพลังงานทั้งหมดก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงจะเท่าเดิม ดังนั้น หลักการโดยรวมของกฎอนุรักษ์พลังงานคือ พลังงานรวมจะมีค่าคงที่ ดังนั้น

$$[\text{พลังงานที่ถูกถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ}] = [\text{พลังงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงไป}] \quad (5.1)$$

ในการประยุกต์ใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์แบ่งได้ 2 กรณีดังนี้

ระบบปิด พลังงานที่ถูกถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบมี 2 รูปแบบคือ พลังงานความร้อน (Q) และงาน (W) เท่านั้นซึ่งสามารถเขียนสมการของกฎข้อที่หนึ่งในระบบปิดของเทอร์โมไดนามิกส์ได้ดังต่อไปนี้

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (5.2)$$

โดยที่ Q = พลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบ (+) หรือ ออกมาจากระบบ (-)

W = งาน (เข้าเป็นลบ -) หรือ (ออกเป็นบวก +)

ΔE = การเปลี่ยนแปลงของพลังงานของของไหลทำงาน

ΔU = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของของไหลทำงาน

ΔKE = การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของของไหลทำงาน

ΔPE = การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ของของไหลทำงาน

ระบบเปิด เป็นระบบที่แตกต่างจากระบบปิดตรงที่ว่าจะมีการถ่ายโอนมวลข้ามขอบเขตของระบบ ทำให้การวิเคราะห์ระบบเปิดจำเป็นต้องคำนึงผลที่เกิดจากปรากฏการณ์ทั้ง 2 ส่วน โดยผลของการถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนพลังงานจะเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวลและกฎการอนุรักษ์พลังงาน การพิจารณากระบวนการในระบบเปิดพบว่ามี 2 ลักษณะ คือ กระบวนการที่มีการไหลคงตัว (Steady Flow process) และกระบวนการที่มีการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow Process) ในการวิเคราะห์ในที่นี้จะทำการวิเคราะห์ระบบกรณีการไหลคงตัวเท่านั้นซึ่งสามารถเขียนสมการกฎข้อที่หนึ่งในระบบเปิดได้ต่อไปนี้

$$Q - W = \Delta H + \Delta KE + \Delta PE \quad (5.3)$$

สำหรับกระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโรงไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า วัฏจักรแรงดัน นั้น ประยุกต์โดยการวิเคราะห์แบบ Steady State Steady Flow Energy Equation (SSSFEE) ในระบบเปิดซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$q - w = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + g(z_2 - z_1) \quad (5.4)$$

โดยที่ h = เอนทัลปี (kJ/Kg^oK)

v = ความเร็วของของไหลทำงาน (m/s)

z = ระยะความสูงเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง (m)

g = ตัวแปรหน่วย ถ้าเป็นหน่วย SI (g=9.81m/s²) และถ้าเป็นหน่วยอังกฤษ (32.2ft/s²)

ในส่วนของสมบัติพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญคือ พลังงานภายใน (internal energy, u) ความร้อน (heat, q) งาน (work, w) และเอนทัลปี (enthalpy, h) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้[17]

1. พลังงานภายใน (internal energy, u)

พลังงานภายใน (u) คือผลรวมของกิจกรรมการเคลื่อนที่ เช่น การเคลื่อนที่ (translational activity) การสั่นสะเทือน (vibrational activity) และการหมุน (rotational activity) ของแต่ละโมเลกุลโดยมีอุณหภูมิเป็นตัววัดระดับพลังงาน ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก T ไปเป็น dT ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในตามปริมาณแสดงในสมการต่อไปนี้

$$du = C_v dT \quad (5.5)$$

เมื่อ C_v คือ ค่าความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่และขึ้นกับอุณหภูมิ T

แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในเมื่อระบบมีอุณหภูมิเปลี่ยนจาก T_1 เป็น T_2

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v(T) dT \quad (5.6)$$

ถ้าระบบถูกทำให้เปลี่ยนแปลง T_1 ไปเป็นสถานะอื่น ๆ ที่มีปริมาตรและความดันต่าง ๆ แล้วกลับมาเป็นสถานะ T_1 ตามเดิม (ครบวัฏจักร) พลังงานภายในของระบบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

$$\oint du = 0 \quad (5.7)$$

เนื่องมาจากพลังงานภายในนั้นเป็นสมบัติที่ขึ้นกับสถานะ

2. ความร้อน (heat, q)

ความร้อนจะเกิดขึ้นที่ขอบเขตของระบบเทอร์โมไดนามิกส์สองระบบที่มีอุณหภูมิต่างกันมาสัมผัสกัน เมื่อระบบที่พิจารณาถูกทำให้เปลี่ยนแปลงไปจากสถานะเดิมแล้วกลับมาที่สถานะเดิมอีกครั้งจนครบ วัฏจักรความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์

$$\oint dq \neq 0 \quad (5.8)$$

เพราะความร้อน q เป็นสมบัติที่ขึ้นกับเส้นทาง (path properties)

3. งาน (work, w)

งานคือ ผลคูณของแรงสุทธิที่แตกมาอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของระบบกับระยะเคลื่อนที่อันเนื่องมาจากมีแรงกระทำดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$dW = PdV \quad (5.9)$$

ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของระบบที่ความดัน P คงที่ได้

$$W = P(V_2 - V_1) \quad (5.10)$$

ความสัมพันธ์ของ u , q และ w ตามกฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่หนึ่ง เมื่อมี q และ w ที่ขอบเขตของระบบคือ

$$du = dq - dw \quad (5.11)$$

4. เอนทัลปี (enthalpy or total energy, h)

เอนทัลปี (h) คือ ผลรวมของพลังงานทั้งหมดที่อยู่ในรูปของพลังงานภายใน (u) และงานที่เกิดจากการไหล (flow work) Pv

$$h \equiv u + Pv \quad (5.12)$$

กรณีที่ P มีค่าคงที่

$$dh \equiv du + Pdv \quad (5.13)$$

นำสมการ (4.11) แทนใน (4.13) จะได้

$$dh \equiv dq \quad (5.14)$$

ในสมการที่ (4.14) หมายความว่าเอนทัลปีที่เพิ่มขึ้นจะเท่ากับความร้อนป้อนเข้าระบบที่ความดันคงที่หรือเขียนได้เป็น

$$dh \equiv C_p dT \quad (5.15)$$

5.4 สมบัติของไอน้ำ

ไอน้ำคือ น้ำที่ระเหยเมื่อได้รับความร้อนมีสถานะเป็นก๊าซที่ผลิตได้จากบอยเลอร์ (boiler) ไอน้ำเป็นตัวกลางการนำความร้อนที่ควบคุมได้สะดวก ปลอดภัย และราคาถูก การผลิตไอน้ำได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง เช่น ไม้ฟืน เศษไม้ แกลบ และถ่านหิน เป็นต้น

ไอน้ำมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนเพราะว่า

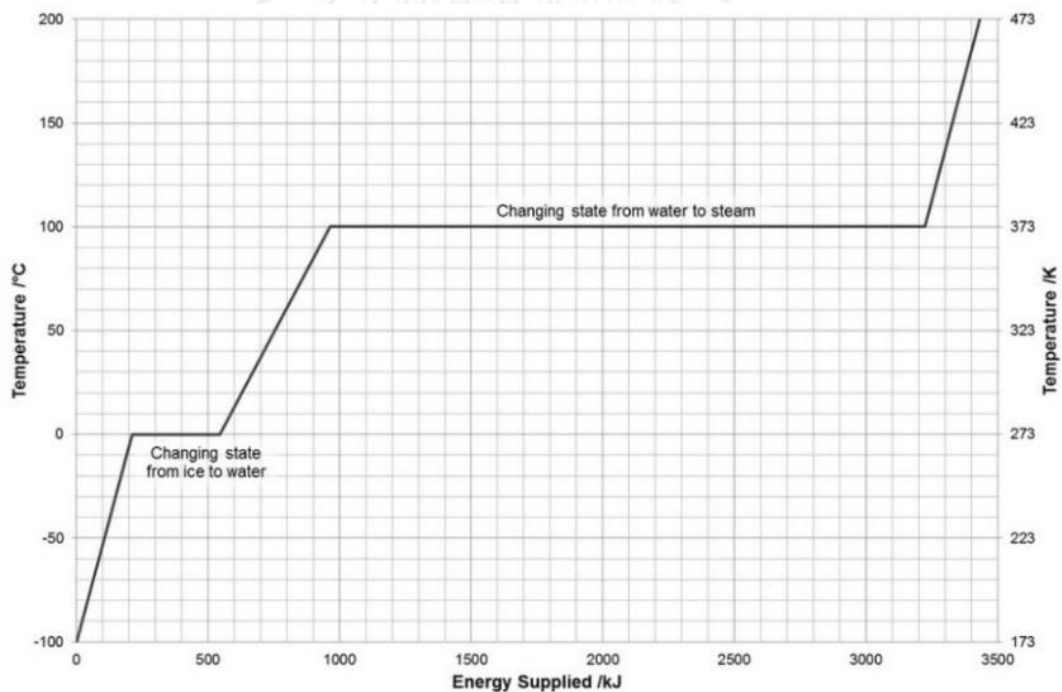
- ไอน้ำมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดีเมื่อกระทบกับภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์
- การควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำภายในโดมรูปประซังทำได้โดยการควบคุมความดัน
- การผลิตไอน้ำทำได้ง่าย และขั้นตอนไม่ยุ่งยาก

ไอน้ำ (อิมตัว) มีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนสูง เนื่องจากไอน้ำมีความร้อนแฝงของการเป็นไอ (latent heat) ซึ่งคือค่าความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 kg ที่ 100°C กลายเป็นไอน้ำที่อุณหภูมิเดียวกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,257 kJ และมีค่ามากกว่าปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำจาก 24°C ร้อนจนถึง

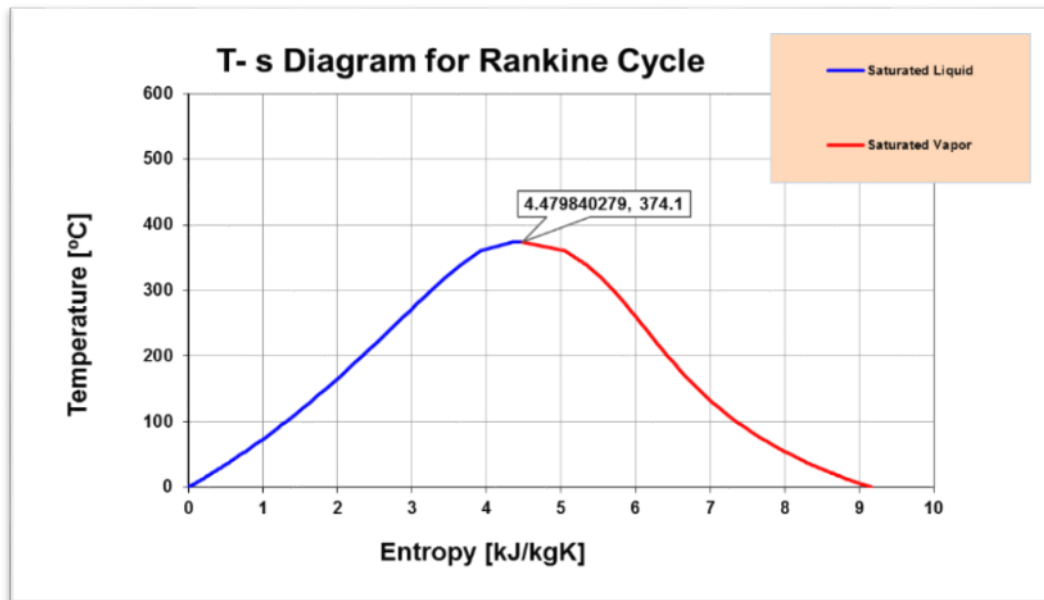
จุดเดือด 100°C (318 kJ) ถึง 7 เท่า ดังนั้นไอน้ำจะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนได้สูง

ถ้าน้ำได้รับความร้อนที่ความดันคงที่น้ำจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือด จากนั้นอุณหภูมิของน้ำจะไม่เพิ่มขึ้นแต่น้ำจะกลายเป็นไอน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตราบใดที่น้ำยังได้รับความร้อนในที่สุดน้ำจะกลายเป็นไอน้ำในที่สุดกลายเป็นไอทั้งหมดและไอน้ำก็จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อยๆถ้าไอน้ำยังคงได้รับความร้อน ภาพที่ 5-4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำและไอน้ำเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องที่ความดันที่ค่าหนึ่ง

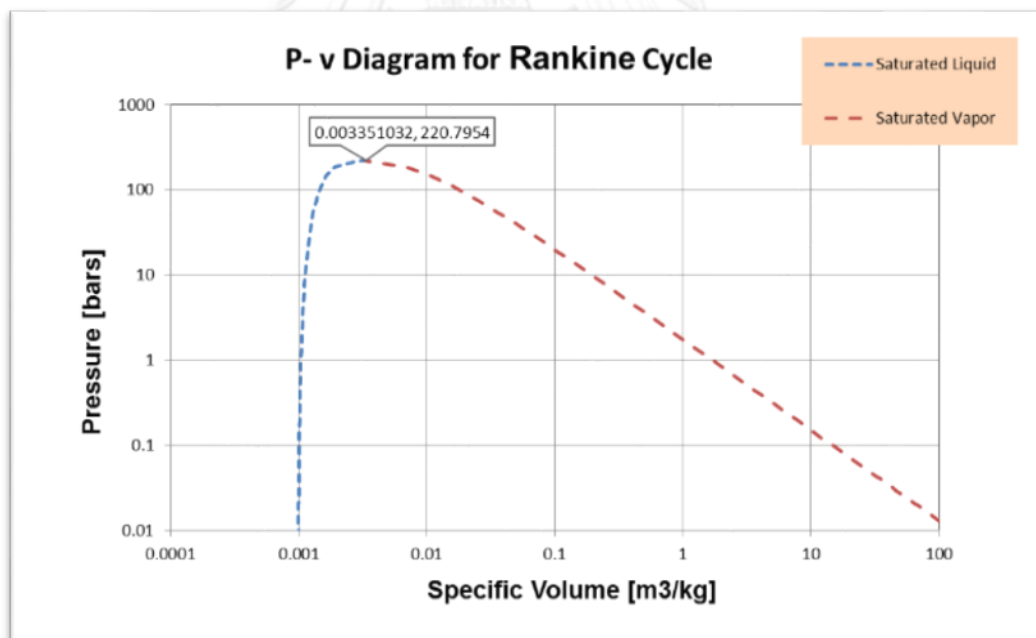
แต่ถ้าเขียนกราฟที่ความดันอื่นก็จะได้กราฟคล้ายๆกับภาพที่ 5-5 และ 5-6 จะเห็นว่าตำแหน่งของของเหลวอิมตัวก่อให้เกิดเส้นโค้งที่เรียกว่า (saturated liquid line) และตำแหน่งของไออิมตัวก็ก่อให้เกิดเส้นโค้งที่เรียกว่าไออิมตัว (saturated vapor line) เส้นโค้งสองเส้นนี้บรรจบกันที่จุดวิกฤติ ซึ่งมีอุณหภูมิ 374°C และความดัน 22 MPa กลายเป็นโดมครอบพื้นที่ที่เป็นของผสมระหว่างน้ำกับไอน้ำ พื้นที่นี้เรียกว่า vapor dome ส่วนพื้นที่ที่อยู่เหนือโดมเป็นบริเวณที่น้ำอยู่ในสถานะของเหลวหรือไออย่างชัดเจนในการเปลี่ยนสถานะ



ภาพที่ 5- 4 แสดงการเปลี่ยนสถานะของน้ำ [18]



ภาพที่ 5- 5 แสดง T-s Diagram ของจุดวิกฤติ



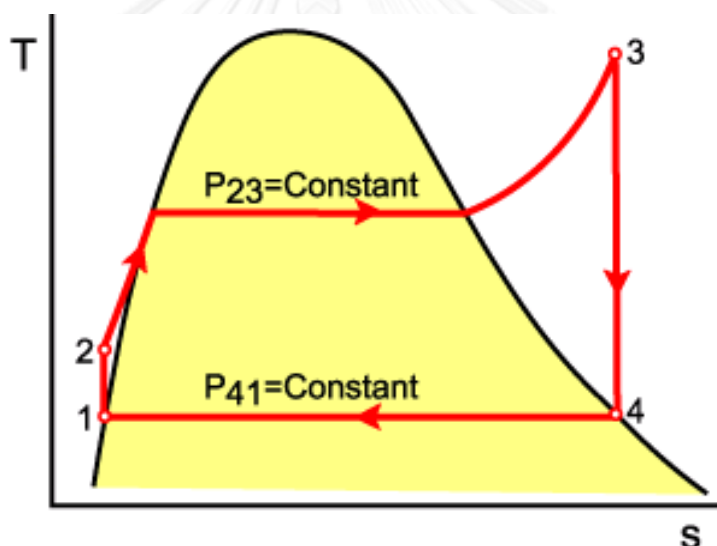
ภาพที่ 5- 6 แสดง P-v Diagram ของจุดวิกฤติ

ในการวิเคราะห์หัวจักรไอน้ำมีความจำเป็นจะต้องทราบคุณสมบัติเชิงปริมาณของน้ำและไอน้ำ สมบัติที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ (T) ความดัน (P) ปริมาตรจำเพาะ (v) เอนทัลปี (h) และเอนโทรปี (s) ซึ่งตัวแปรอิสระมักเป็นอุณหภูมิและความดันเนื่องจากตัวแปรนี้สะดวกต่อการวัด ในขณะที่ปริมาณจำเพาะ เอนทัลปี และเอนโทรปีจะหาจากอุณหภูมิและความดันโดยใช้สูตร โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางไอน้ำ (steam table) หรือแผนภูมิไอน้ำ (steam chart) ในงานวิจัยนี้ใช้ตารางไอน้ำในการคำนวณความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทั้งหมด

5.5 แบบจำลองวัฏจักรแรงดันเบื้องต้น (Rankine Cycle Model)

การพิจารณาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไอน้ำจริงมีความซับซ้อนมาก แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะเปรียบเทียบผลจากการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (เศษไม้) ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ประกอบด้วยกระบวนการทางกายภาพ และทางเคมีที่ซับซ้อน และขึ้นอยู่กับปัจจัยตัวแปรต่างๆ อาทิ ความชื้นเชื้อเพลิง ขนาดเชื้อเพลิง การแห้ง และการเผาไหม้ของถ่านชาร์ที่มีต่อสมรรถนะของโรงไอน้ำ จึงได้ทำการศึกษาการทำงานของวัฏจักรแรงดัน ซึ่งทำงานแบบ Steady State Steady Flow Energy Equation (SSSFEE) ในระบบเปิด โดยสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรแรงดันอย่างง่าย เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทางความร้อนตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น ซึ่งการสร้างแบบจำลองวัฏจักรแรงดันได้แบ่งการพิจารณาออกเป็นช่วงๆ ดังแสดงในภาพที่ 5-7 ได้ดังนี้ [19]



ภาพที่ 5- 7 แสดง T-s diagram ของวัฏจักรแรงดันในอุดมคติ [20]

3-4 เป็นกระบวนการขยายตัวของไอน้ำแบบไม่สูญเสียความร้อน (Isentropic Expansion) ในอุปกรณ์เทอร์ไบน์ โดยได้งาน W_t ออกจากระบบ ($Q=0$)

$$W_t = h_3 - h_4 \quad (5.20)$$

4-1 เป็นการคายความร้อนปริมาณ q_{out} ออกจากระบบที่ความดันคงที่ ($W=0$)

$$q_{out} = h_4 - h_1 \quad (5.21)$$

2-1 เป็นการอัดแบบไม่สูญเสียความร้อน (Isentropic Compression) จึงต้องให้งานแก่ปั๊ม เพื่อเพิ่มแรงดันของของไหลทำงาน W_p ($Q=0$)

$$W_p = V_f (P_2 - P_1) = h_2 - h_1 \quad (5.22)$$

2-3 เป็นการให้ความร้อนปริมาณ q_{in} แก่อุปกรณ์ระบบผลิตไอน้ำ (Steam Generator) ที่ความดันคงที่ ($w=0$)

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad (5.23)$$

งานสุทธิที่ได้จากระบบ

$$W_{net} = W_t - W_p = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (5.24)$$

โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของวัฏจักรแรงคินคำนวณได้จาก

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = \frac{W_t - W_p}{q_{in}} \quad (5.25)$$

เมื่อประสิทธิภาพของบอยเลอร์ (Boiler Efficiency.%) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{water} (h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel} (LHV)} \times 100 \quad (5.26)$$

เมื่อ m_{water} = อัตราการใช้น้ำในการผลิตไอน้ำ kg/hr,

m_{fuel} = อัตราการใช้เชื้อเพลิง kg/hr,

h_{water} = เอนทัลปีของน้ำที่ป้อน kJ/kg,

h_{steam} = เอนทัลปีของไอน้ำ kJ/kg,

LHV = ความร้อนขั้นต่ำของเชื้อเพลิงชีวมวล kJ/kg.

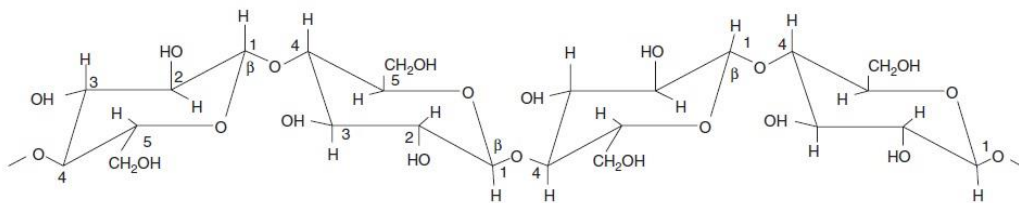
บทที่ 6

ความแปรปรวนของเชื้อเพลิงไม้

ความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุไม้ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในไม้และความชื้นสัมพัทธ์รอบบริเวณวัสดุ จึงมีนัยสำคัญในทางปฏิบัติก่อนการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเผาไหม้ให้ความร้อนในบอยเลอร์ ซึ่งในบทนี้จำอธิบายถึงทฤษฎีการแก้ปัญหาหาระบบความชื้นไม้ วิธีการลดความชื้นของเศษไม้โดยใช้ Solar Greenhouse drying ผลการทดสอบการลดปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้โดยใช้วิธีแบบ passive mode รวมถึงการทำนายพฤติกรรมลดลงของปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้ที่เก็บไว้ใน Solar Greenhouse drying

6.1 ทฤษฎีการแก้ปัญหาหาระบบความชื้นไม้

ไม้มีส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินโดยที่จะมีเซลลูโลสประมาณ 40-50%ของมวลรวมซึ่งส่วนใหญ่จะตอบสนองต่อการดูดซับน้ำผ่านตัวมันเองที่เป็นกลุ่มของไฮโดรคาร์บอนดังแสดงในภาพที่ 6-1 แสดงโครงสร้างของสายโซ่เซลลูโลสประกอบด้วยแบบโพลีเมอร์แบบเชิงเส้น 2800 หน่วยกลูโคสต่อกัน โดยวิธี β -1 และ 4-glycoside[21]



ภาพที่ 6- 1 สูตรโครงสร้างของสายโซ่เซลลูโลส [21]

เฮมิเซลลูโลสในไม้มีประมาณ 25-30% ของมวลรวมซึ่งพบมากที่สุดไนไม้เนื้ออ่อนในกลุ่มของ galactotoglucmannans กล่าวคือ โพลีเมอร์ของกลูโคส (glucose) กาแลคโตส (galactose) และแมนโนส (mannose) ซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบ

ไฮโมเซลลูโลสเป็นการรวมตัวกันของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสประกอบกันเป็นผนังเซลล์ส่วนที่เหลือเป็นลิกนินประมาณ 20-30%ของมวลรวม ไนไม้เนื้ออ่อนลิกนินจะมีส่วนช่วยน้อยมากที่จะดูดซับน้ำเมื่อเทียบกับไฮโมเซลลูโลส

ทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมีส่วนประกอบทางเคมีคือ $(C_6H_{10}O_5)_x$ แม้ว่ารายละเอียดโครงสร้างของทั้งสองจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันและค่าของ x ของเซลลูโลสจะมากกว่าเฮมิเซลลูโลส แต่อย่างไรก็ตามหน่วยความร้อนสุทธิโดยรวมของการดูดซับต่อหน่วยโมลของน้ำจะเท่ากัน

สำหรับทุกๆ ส่วนประกอบในไม้กล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่ากระบวนการดูดซับน้ำจะมีลักษณะวิธีการคล้ายๆกัน

ดังนั้นการที่จะทำให้ไม้มีความชื้นลดลงต้องทำให้โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของสายโซ่เซลลูโลสระเหย (volatile) ออกไปจากเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

6.2 วิธีการเก็บรักษาเชื้อเพลิงเศษไม้สับโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ในการเก็บไม้ก่อนการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับบอยเลอร์ เนื่องจากไม้สดหลังจากการสับเป็นชิ้นเล็กๆ (Wood chip) มีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูงประมาณ 50-60% ของมวลรวมสำหรับไม้ยางพารา ดังนั้นวิธีการลดปริมาณความชื้นในไม้มีหลายวิธี เช่นการอบด้วยความร้อน หรือการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ เป็นต้น จากศึกษาพบว่าการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ในการตากแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้นไม้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายไปทั่วโลกและวิธีนี้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างต่ำสำหรับในภาคใต้ของประเทศไทยมีฝนตกชุกทำให้การตากไม้บนพื้นหรือลานซีเมนต์มีการจัดการได้ยากเนื่องจากสภาพอากาศแปรปรวนและมีฝนตกบ่อย จึงควรตากไม้ภายในโรงเรือนที่สามารถกันฝนได้ Om Prakash [22] ได้นำเสนอวิธีการ greenhouse drying ซึ่งมีวิธีการที่แตกต่างกัน 2 แบบของการตากแห้งคือ Greenhouse drying แบบ passive mode (ด้านบนหลังคามีช่องเปิด-ปิด) ดังแสดงในภาพที่ 6-2 และแบบ Greenhouse drying แบบ active mode (มีการติดตั้งอุปกรณ์พัดลม) ดังแสดงในภาพที่ 6-3



ภาพที่ 6- 2 Greenhouse drying แบบ passive mode [23]



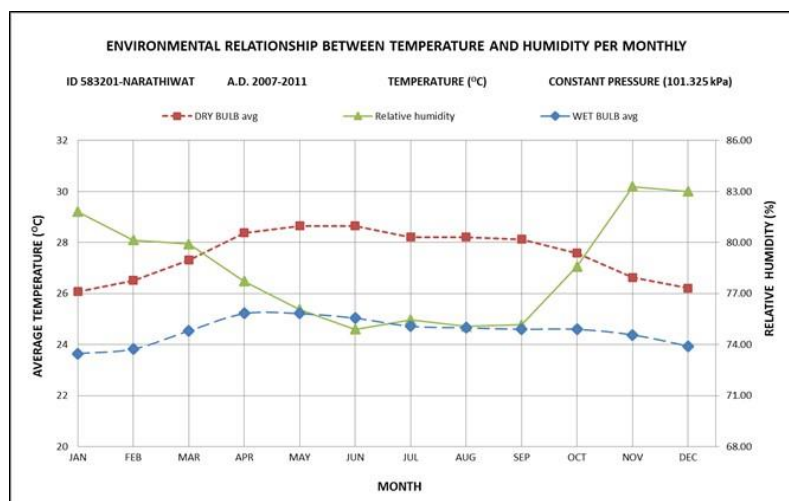
ภาพที่ 6- 3 Greenhouse drying แบบ active mode [22]

Berruoga et al. [24] ได้เสนอการลดความชื้นแบบวิธี Greenhouse drying แบบ passive mode พบว่าอุณหภูมิภายในจะสูงกว่าภายนอกประมาณ 6-12 °C ในระหว่างช่วงที่มีแสงอ่อนในฤดูหนาว กับประเทศไทยที่มีสภาพอากาศค่อนข้างร้อนอยู่แล้วดังนั้นการลดความชื้นโดยใช้ Greenhouse drying แบบ passive mode ก็น่าจะสามารถลดปริมาณความชื้นของเศษไม้สดจาก 50-60% ให้ปริมาณความชื้นในเศษไม้ลดลงมาเหลือ 35-45% ก็เพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ตาม specification ของบอยเลอร์

สาเหตุนี้ในงานวิจัยเล่มนี้จึงเลือกการเตรียมเชื้อเพลิงในกระบวนการลดความชื้นแบบวิธี Greenhouse แบบ passive mode เพราะสามารถลดการใช้พลังงานและลดต้นทุนการออกแบบและติดตั้งพัฒนาเป่าอากาศได้ดีกว่าแบบวิธี Greenhouse drying แบบ Active mode

6.3 สภาพภูมิอากาศของจังหวัดนราธิวาส

ก่อนทำการทดลองการศึกษาความแปรปรวนของเศษไม้ ได้มีการนำข้อมูลสภาพอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ dry bulb, wet bulb และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วง พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดที่คัดเลือกในภาคใต้ของประเทศไทยได้แก่ จังหวัดชุมพร จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดชุมพร ท่าอากาศยานอำเภอหาดใหญ่จังหวัดสงขลา ท่าอากาศยานจังหวัดปัตตานี จังหวัดยะลา และจังหวัดนราธิวาส (ในภาคผนวก ก) จากนั้นสังเกตผลของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วง พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส พบว่าช่วงแรกที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ต่ำสุดคือช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม ซึ่งมีแนวโน้มของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศค่อนข้างคงที่มีค่า ~ X และในช่วงที่สองมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี สูงสุดคือปลายเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคมมีค่า ~ Y ดังแสดงในภาพที่ 6-4 อาจกล่าวได้ว่าความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไม้ในช่วงหนึ่งปีของจังหวัดนราธิวาสมีการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติอยู่ในระหว่างสองช่วง ต่ำสุด~X และสูงสุด ~ Y ที่กล่าวมาเท่านั้น

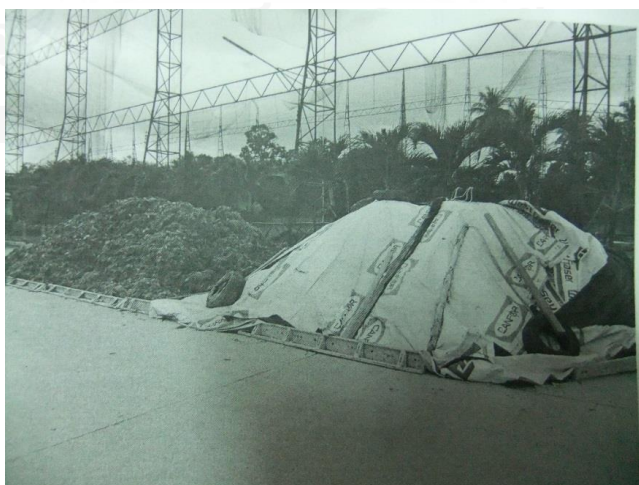


ภาพที่ 6- 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส

สรุปได้ว่าการศึกษาความแปรปรวนของคุณสมบัติคือปริมาณความชื้นของเพลิงไม้ในช่วงหนึ่งปีของจังหวัดนราธิวาสนั้นจากภาพที่ 6-4 พบว่าช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงตั้งแต่ปลายเดือนตุลาคมถึงพฤศจิกายนจะทำให้ไม้แห้งช้ามากและการทดลองก็ทำได้ยาก ดังนั้นจะศึกษาความแปรปรวนของปริมาณความชื้นไม้เฉพาะเดือนที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดคือเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน ซึ่งใช้วิธีการลดความชื้นโดยใช้ Solar Greenhouse drying เท่านั้น แล้วจึงวิธีทำนายผลการลดลงของปริมาณความชื้นกองไม้ในช่วงข้อมูลที่ทดลองโดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง

6.4 วิธีการทดลองสำหรับการศึกษาความแปรปรวนของเศษไม้

1. เตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดลองโดยการนำเศษไม้ที่ผ่านการย่อยด้วยเครื่อง Chipper ดังแสดงในภาพที่ 2-1 กองรวมกันที่ความสูง 2 เมตร ดังแสดงในภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 6- 5 กองไม้ที่ผ่านการย่อยด้วยเครื่อง Chipper

2. ทำ Solar greenhouse drying โดยใช้แผ่นผ้าใบโปร่งแสงเป็นผนังในภาพที่ 6-5 เพราะว่าแสงสามารถทะลุผ่านได้ทำให้อุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิภายนอกของ Solar greenhouse drying ถ้าอุณหภูมิภายในสูงกว่าความชื้นสัมพัทธ์ในของอากาศภายในก็จะต่ำกว่าภายนอกด้วย



ภาพที่ 6- 6 Solar Greenhouse drying ทำด้วยแผ่นผ้าโปร่งแสง

3. ทำการบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิภายใน Solar Greenhouse drying ได้แก่อุณหภูมิ dry bulb อุณหภูมิ wet bulb และค่า Relative Humidity ของวันทุกๆ 2 ชั่วโมงเริ่มตั้งแต่ 8.00น ถึง 16.00น ซึ่งเวลาที่ใช้ในการตากด้วยแสงอาทิตย์ทั้งหมดวันละ 8 ชั่วโมง

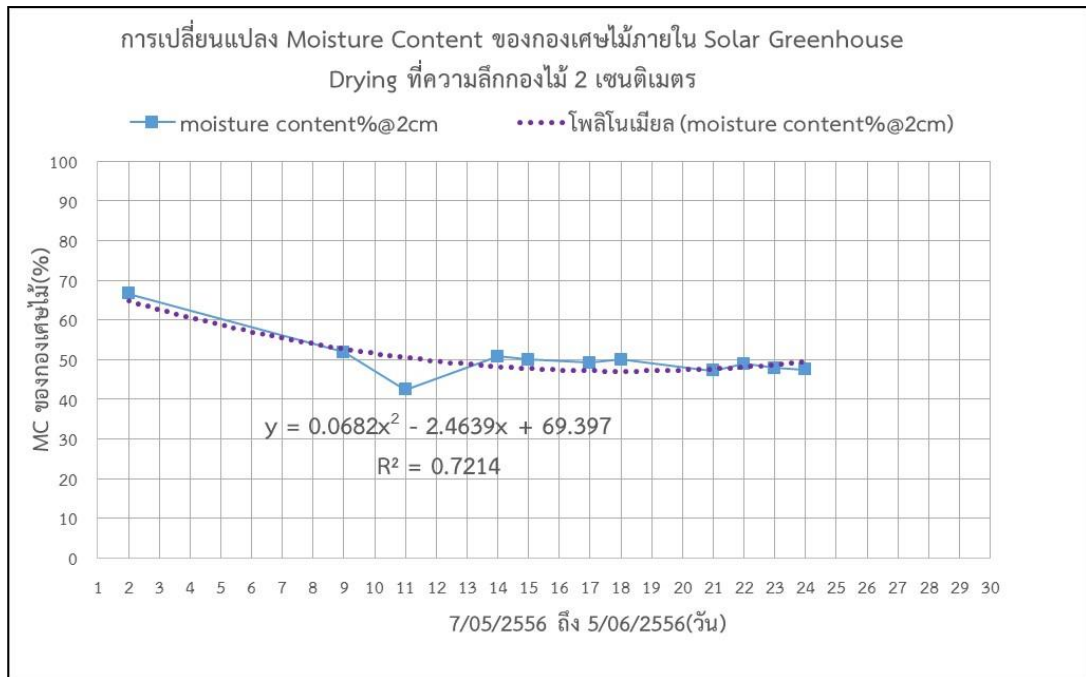
4. วัดปริมาณความชื้นของเศษไม้ที่ความลึก 2 ซม. 5 ซม. 10 ซม. 15 ซม. และ 20 ซม. โดยการชั่งน้ำหนักของกองไม้แล้วทำการสุ่มตัวอย่างมาวัดปริมาณความชื้นด้วยเครื่องมือวัดความชื้นของไม้ โดยทำวันละหนึ่งครั้งทุกวัน

6.5 ผลการทดลองความแปรปรวนของไม้

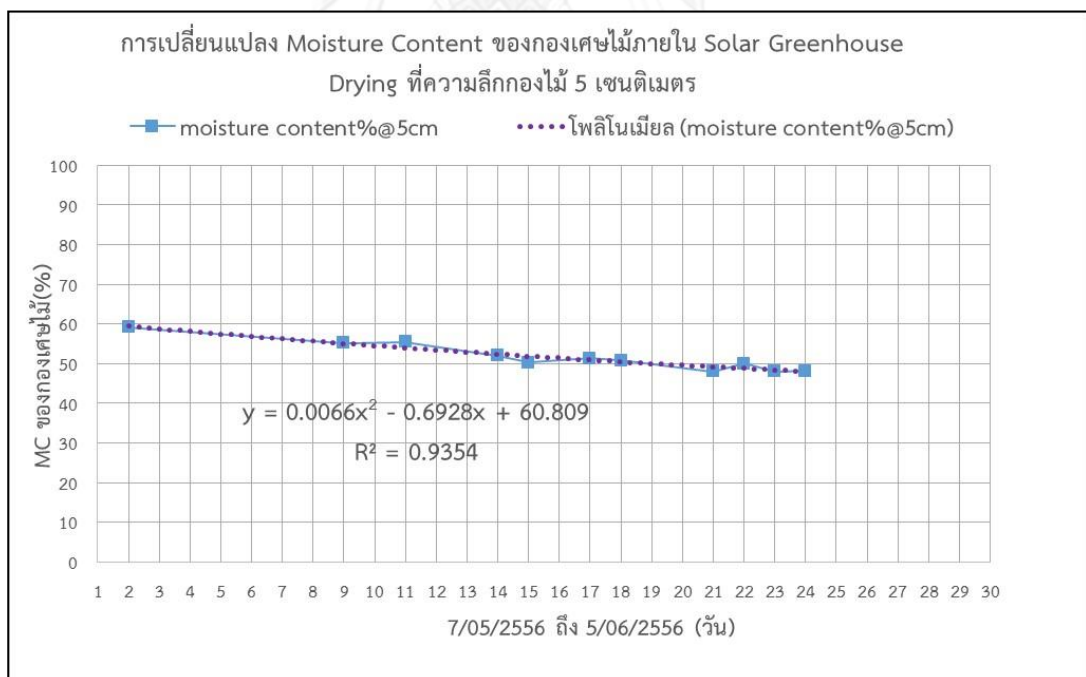
ผลการทดลองความแปรปรวนของไม้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะนำเสนอผลการทดลองการวัดปริมาณความชื้นไม้ที่ตำแหน่งความลึกของไม้ 2 ซม. 5 ซม. 10 ซม. 15 ซม. และ 20 ซม. จากผลการทดลองจะนำมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์สมการโพลีโนเมียลกำลังสองสำหรับทำนายผลการลดลงของปริมาณความชื้นของไม้ และอีกส่วนเป็นผลการเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ของอากาศภายใน Solar Greenhouse drying เทียบกับค่า Relative Humidity ของอากาศเฉลี่ย 5 ปี ของเดือนพฤษภาคม ในช่วง พ.ศ. 2550-2554 (ตารางที่ ก-8) ซึ่งมีค่าประมาณ 76.06 เปอร์เซ็นต์ดังอธิบายต่อไปนี้

1. ผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของไม้ในช่วงเดือนพฤษภาคม

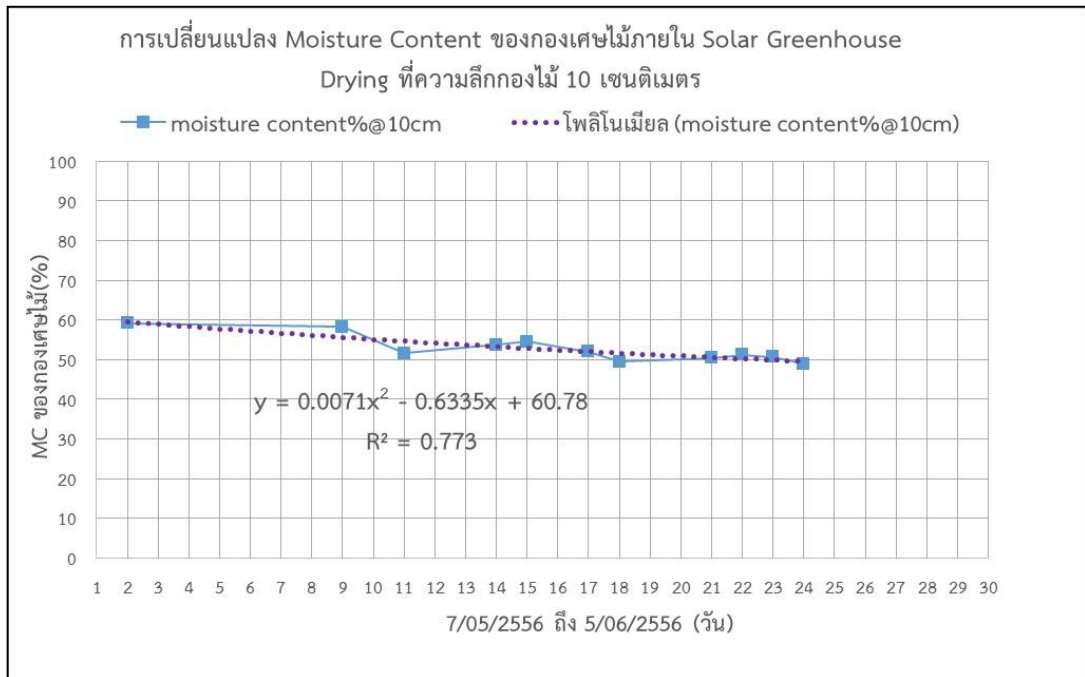
จากข้อมูลของเดือนพฤษภาคมผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นไม้ที่ความลึก 2 ซม. 5 ซม. 10 ซม. 15 ซม. และ 20 ซม. ภายใน Solar Greenhouse Drying (ในตารางที่ ข-1) นำมาหาความสัมพันธ์ของสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง และ R^2 เพื่อนำสมการที่ได้ไปใช้ทำนายพฤติกรรมลดลงของปริมาณความชื้นของกองไม้ที่ตากไว้ภายใน Solar Greenhouse Drying



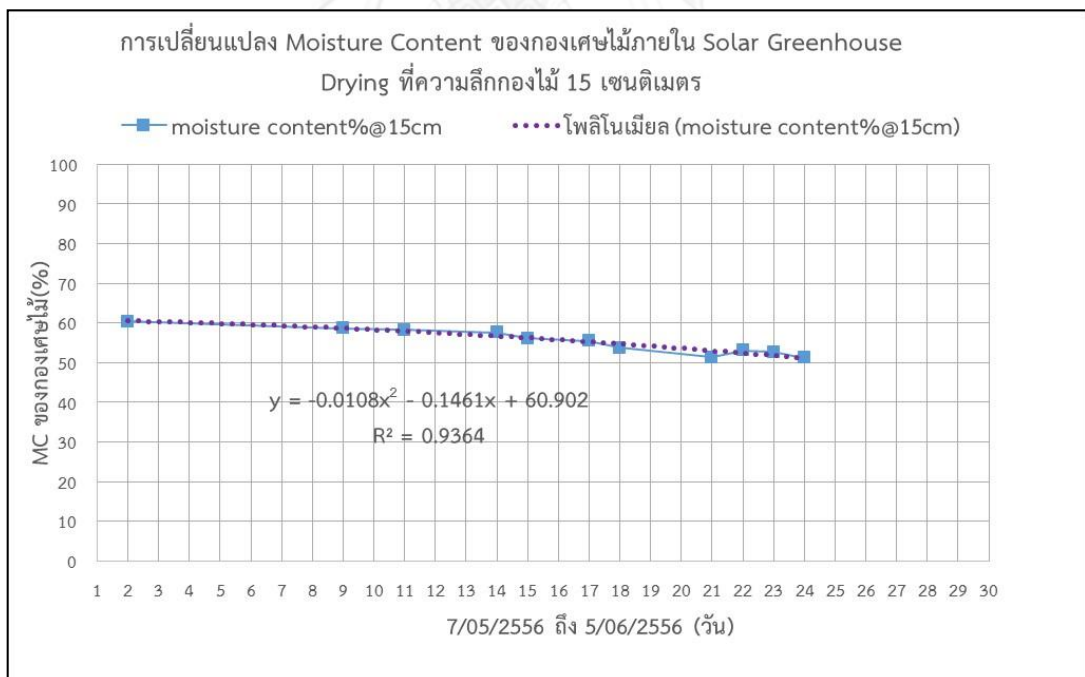
ภาพที่ 6- 7 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse
Drying ที่ความลึกกองไม้ 2 เซนติเมตร



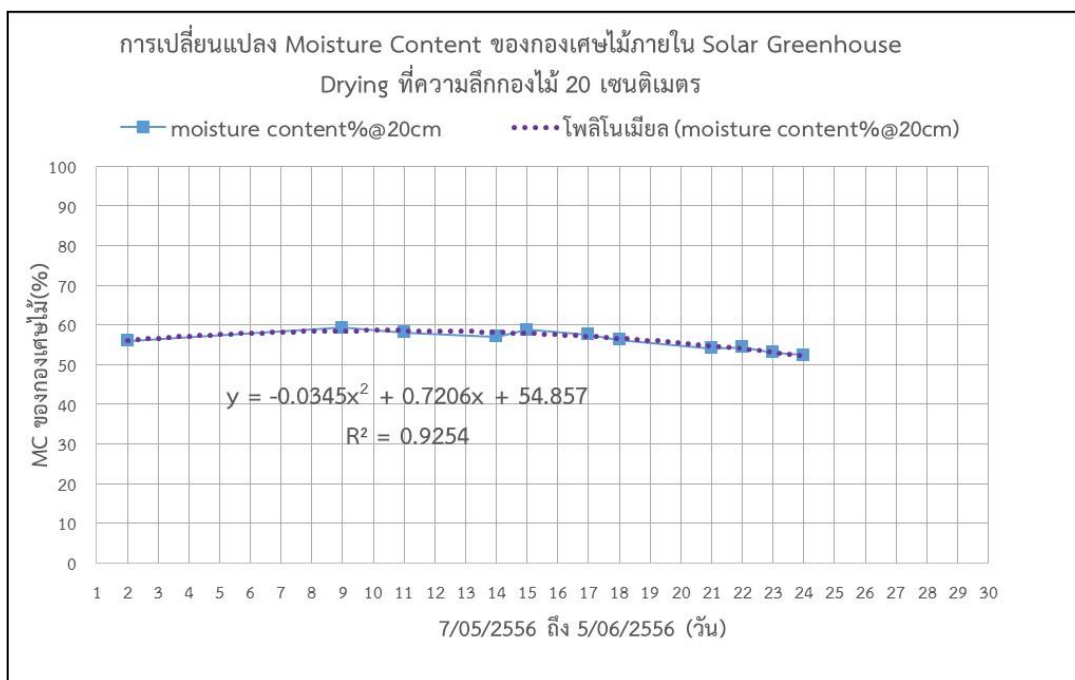
ภาพที่ 6- 8 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse
Drying ที่ความลึกกองไม้ 5 เซนติเมตร



ภาพที่ 6- 9 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse
Drying ที่ความลึกกองไม้ 10 เซนติเมตร



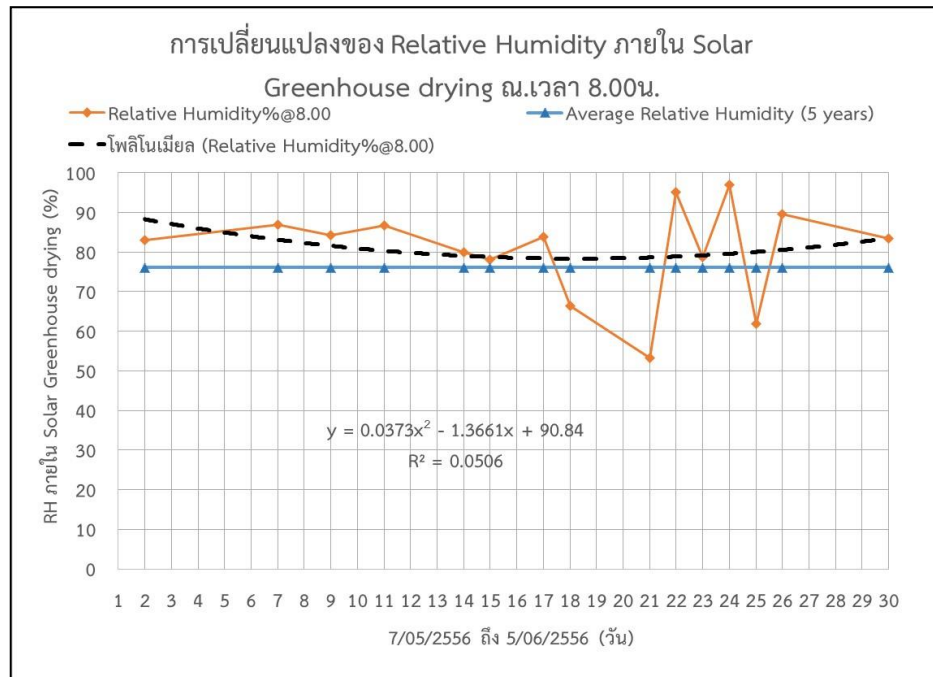
ภาพที่ 6- 10 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse
Drying ที่ความลึกกองไม้ 15 เซนติเมตร



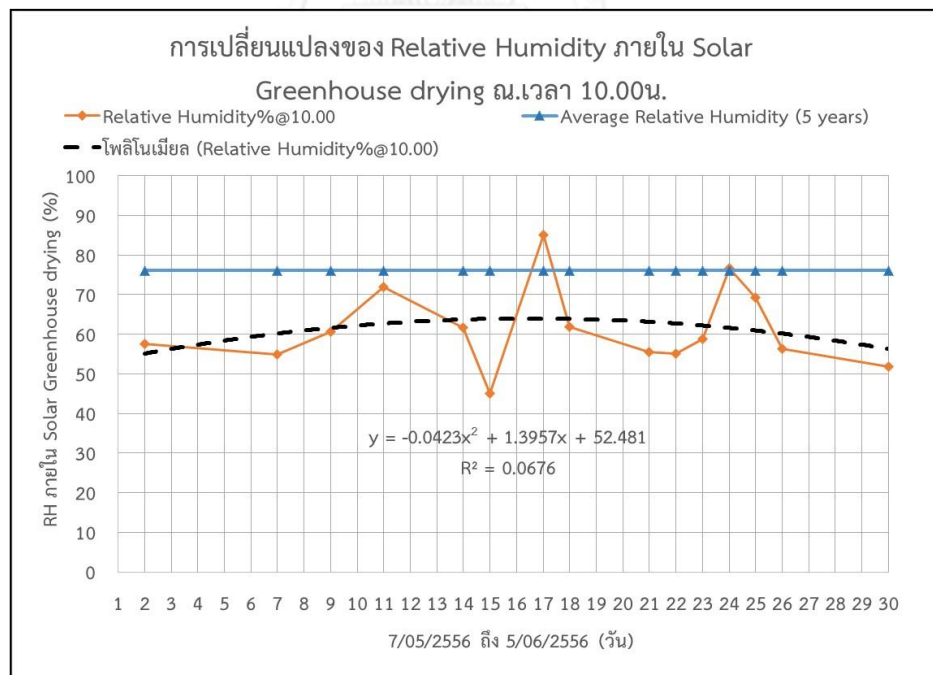
ภาพที่ 6- 11 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse
Drying ที่ความลึกกองไม้ 20 เซนติเมตร

2. การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse drying ในช่วง
เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2556

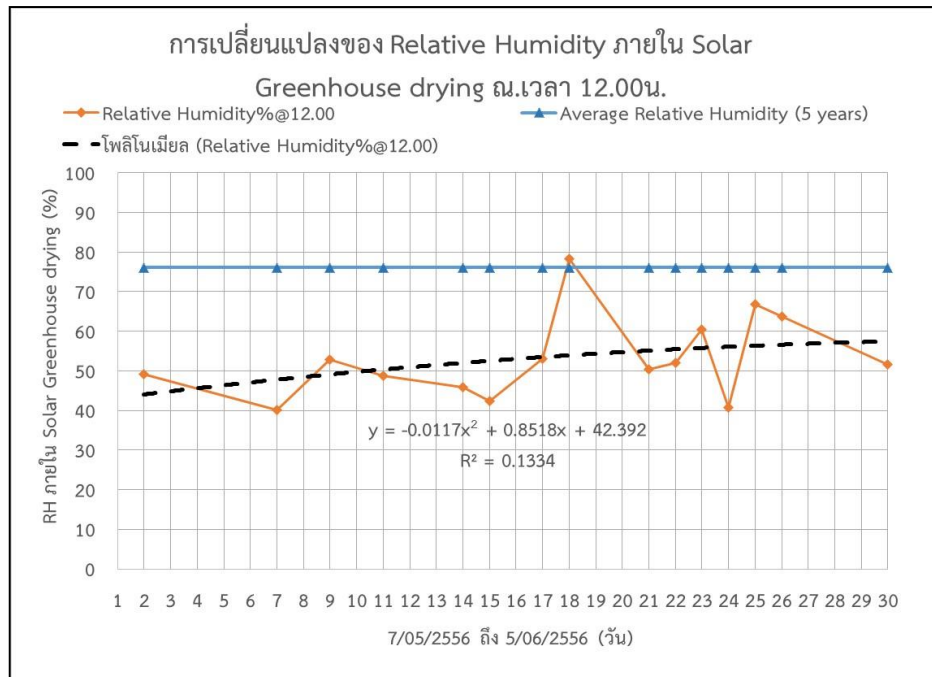
จากการเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ.
เวลา 8.00น. 10.00น. 12.00น. 14.00น. และ 16.00น. ของเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2556 (ในตารางที่
ข-2) เทียบกับ Relative Humidity ของอากาศเฉลี่ย 5 ปีของเดือนพฤษภาคม ในช่วง พ.ศ. 2550-
2554 ของจังหวัดนราธิวาส (ตารางที่ ก-8) ซึ่งมีค่าประมาณ 76.06 % สามารถแสดงความสัมพันธ์
ของ Relative Humidity ได้ดังนี้



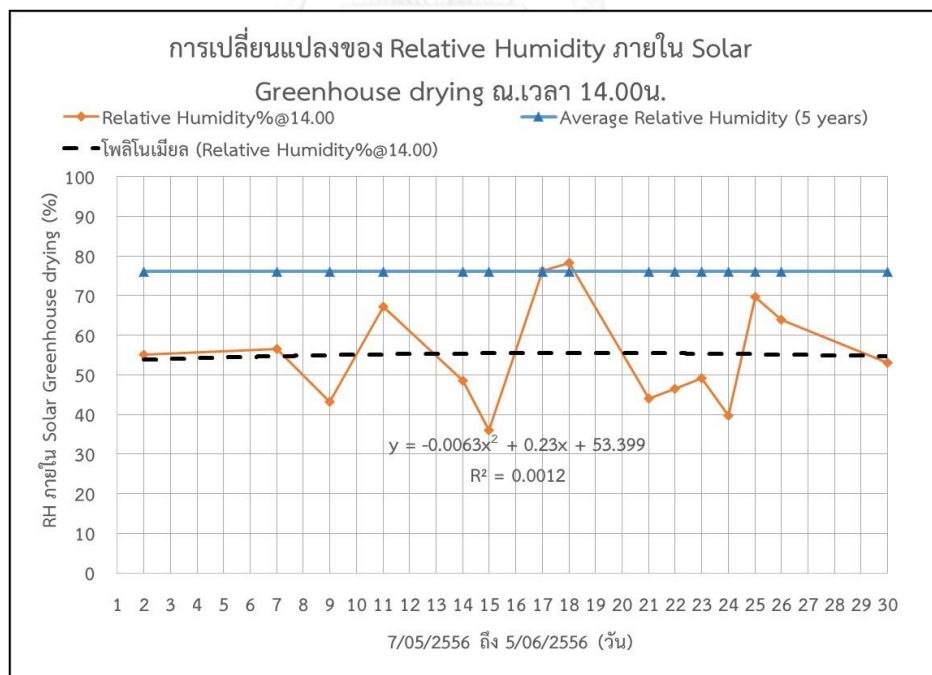
ภาพที่ 6- 12 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ. เวลา 8.00น.



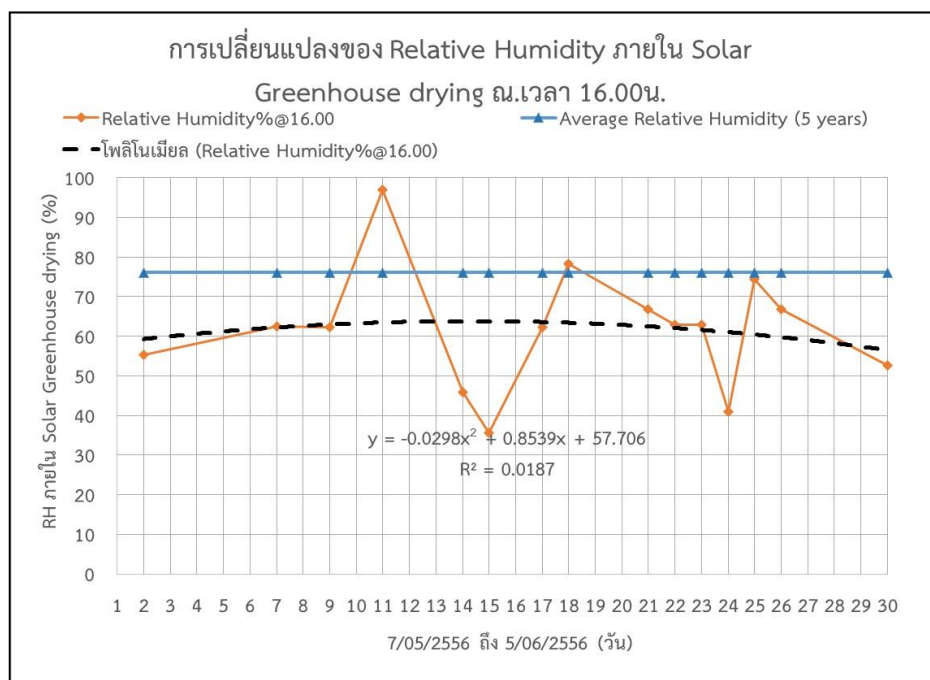
ภาพที่ 6- 13 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ. เวลา 10.00น.



ภาพที่ 6- 14 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ. เวลา 12.00น.



ภาพที่ 6- 15 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ. เวลา 14.00น.



ภาพที่ 6- 16 การเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ณ. เวลา 16.00น.

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของ Relative Humidity ภายใน Solar Greenhouse Drying ของมูลจากภาพที่ 6-12 ถึง ภาพที่ 6-16 ณ.เวลา 14.00น เป็นช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศภายใน Greenhouse ต่ำกว่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 5 ปี ของเดือนพฤษภาคม ในช่วงพ.ศ. 2550-2554 มากที่สุดรองลงมาเป็นเวลา 16.00น 12.00น 10.00น และ8.00น ตามลำดับซึ่งหมายความว่าที่เวลา 14.00น มีการระเหยของความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้สูงสุดและเป็นช่วงเวลาที่เศษไม้แห้งได้เร็วที่สุด รองลงมาเป็น 16.00น 12.00น 10.00น และ8.00น ตามลำดับเช่นกัน

6.6 สรุปผลการทดลองความแปรปรวนของไม้

จากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ที่ความลึกกองไม้ 2 เซนติเมตร 5 เซนติเมตร 10 เซนติเมตร 15 เซนติเมตร และ20 เซนติเมตร สังเกตการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของกองเศษไม้ที่ความลึกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6-1 ซึ่งสามารถนำสมการโพลีโนเมียลกำลังสองทำนายผลการทดลองการลดลงของปริมาณความชื้น ซึ่งได้ข้อมูลมาจากการเปลี่ยนแปลง Moisture Content ที่ความลึกกองไม้ต่างกัน ในภาพที่ 6-6 ถึงภาพที่ 6-10 ใช้เฉพาะสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง และ R^2 เมื่อ Y คือปริมาณความชื้น (moisture content, %) ของเศษไม้ที่ความลึกต่างๆ และ X คือเวลาในการตากกองเศษไม้ (Drying Time, วัน)

ตารางที่ 6- 1 สมการโพลีโนเมียลกำลังสองของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ความลึกต่างกัน

ความลึกของเศษไม้	สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง	R ²
2 เซนติเมตร	$Y=0.0682X^2-2.4639X+69.397$	0.7214
5 เซนติเมตร	$Y=0.0066X^2-0.6928X+60.809$	0.9354
10 เซนติเมตร	$Y=0.0071X^2-0.6335X+60.78$	0.773
15 เซนติเมตร	$Y=-0.0108X^2-0.1461X+60.902$	0.9364
20 เซนติเมตร	$Y=-0.0345X^2+0.7206X+54.857$	0.9254

จากผลการทดลองตากกองไม้โดยใช้วิธี passive mode ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2556 เป็นเวลาหนึ่งเดือน แล้วนำผลที่ได้จากการเก็บผลไปหาความสัมพันธ์ของการลดลงของปริมาณความชื้นในกองไม้โดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง และ R² จากตารางที่ 6-1 ไปทำนายผลการลดลงของความชื้นในช่วงชุดข้อมูล จากนั้นเมื่อคำนวณโดยการแทนค่า X (วัน) จะได้ค่า Y คือปริมาณความชื้นของกองไม้ที่ความลึกต่างๆ

ตารางที่ 6- 2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse drying

Day	กองไม้ลึก 5 เซนติเมตร		กองไม้ลึก 10 เซนติเมตร		กองไม้ลึก 15 เซนติเมตร		กองไม้ลึก 20 เซนติเมตร	
	MC (%)	Differ (%)	MC (%)	Differ (%)	MC (%)	Differ (%)	MC (%)	Differ (%)
7	56.25	3.87	56.69	3.46	59.38	1.37	58.21	2.67
14	52.29	3.36	53.30	2.86	56.80	2.28	58.18	0.23
21	48.91	2.86	50.61	2.27	53.17	3.18	54.78	3.13
28	46.11	2.36	48.61	1.67	48.47	4.09	47.99	6.03

ถ้าพิจารณาของงอไม้ที่แตกต่างกันภายใน Solar Greenhouse drying โดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสองในตารางที่ 6-2 คำนวณการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นแล้วสังเกตพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของงอไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying พบว่าที่ทุกๆความลึกจะมีการลดลงของปริมาณความชื้นจากการทดลองเฉลี่ยสัปดาห์ละ 2-6% เท่านั้น

จากผลการทดลองพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse drying ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสองในช่วงของข้อมูลระหว่างวันที่ 7 พฤษภาคม 2556 ถึงวันที่ 5 มิถุนายน 2556 พบว่าการตากไม้ภายใน Solar Greenhouse drying สมมุติว่าถ้าสามารถลดปริมาณความชื้นได้สัปดาห์ละประมาณ 5% คือ ตากไม้ไว้ 1 สัปดาห์ปริมาณมีความชื้นเศษไม้ลดลงเหลือที่ 59% จากนั้นสัปดาห์ที่ 2 ปริมาณความชื้นไม้ลดลงเหลือที่ 54% ในสัปดาห์ที่ 3 ปริมาณความชื้นไม้ลดลงเหลือที่ 49% และสัปดาห์ที่ 4 ปริมาณความชื้นไม้ลดลงเหลือที่ 46% โดยสังเกตได้จากพฤติกรรมในช่วงชุดข้อมูลของตารางที่ 6-2 จากนั้นปริมาณความชื้นที่สมมุติขึ้นทั้ง 4 ค่าจะนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้สำหรับการเผาไหม้ของบอยเลอร์ที่กำลังการผลิตไอน้ำ 33.23 ตัน/ชม.

สรุปว่าในบทนี้ได้อธิบายวิธีการลดลงของปริมาณความชื้นและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงเศษไม้ก่อนการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหีบเผาไหม้ให้ความร้อนภายในบอยเลอร์จุดประสงค์เพื่อให้ได้ต้องปริมาณความชื้นของเศษไม้ตามที่เหมาะสมกับความต้องการนำไปใช้งาน ซึ่งจากผลการทดลองถ้าอุณหภูมิภายใน Solar Greenhouse Drying สูงกว่าอุณหภูมิภายในจะทำให้วัสดุภายใน Greenhouse สามารถระเหยความชื้นออกไปทางช่องได้บนหลังคาได้ และถ้าในอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำน้ำในเชื้อเพลิงเศษไม้จะเกิดการระเหยได้มาก เศษไม้ที่ตากภายใน Greenhouse จะแห้งเร็ว แต่ถ้าอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงน้ำในเชื้อเพลิงเศษไม้ระเหยได้น้อยองเศษไม้ภายใน Greenhouse จะแห้งช้าเช่นเดียวกัน

บทที่ 7

การทดสอบและวิเคราะห์ผลจากกระบวนการเผาไหม้ไม้

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการทดสอบวิเคราะห์ผลการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเศษไม้ภายในบอยเลอร์ แต่เนื่องจากการทดลองเก็บตัวอย่างจริงโดยใช้บอยเลอร์ทำได้ยาก จึงได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน gasification system จากนั้นเก็บตัวอย่างของ Syngas ไปทดสอบด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) เพื่อหาส่วนประกอบของ Producer Gas ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเศษไม้แทน โดยสมมติให้การปล่อยสารระเหยจากการเผาไหม้ไม้ของระบบแก๊สซิฟิเคชันใกล้เคียงกับการปล่อยสารระเหยของการเผาไหม้ไม้ภายในบอยเลอร์ ถึงแม้ว่าที่จริงแล้วจะมีความแตกต่างกันตามเงื่อนไขของการเผาไหม้ก็ตาม

โดยบทนี้จะนำเสนอ รายละเอียดการดำเนินงานทดสอบ ขั้นตอนการปฏิบัติงาน ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอุปกรณ์ในระหว่างการทดลอง แผนผังของอุปกรณ์จุดวัดอุณหภูมิและความดัน ผลการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงเศษไม้ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน จากนั้นนำผลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างของ syngas ไปวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC) ซึ่งต้องการยืนยันผลของส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดลองมานั้นสามารถเทียบเคียงได้กับผลของส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยที่ผ่านมาของผู้อื่นได้ จากนั้นนำส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ไปคำนวณ Adiabatic Flame Temperature (ADF) เพื่อหาอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ที่เปอร์เซ็นต์อากาศเกิน (Excess Air) 10% 15% 20% 25% และ 30%

7.1 รายละเอียดการดำเนินงานทดสอบ

7.1.1 ทดสอบเดินอุปกรณ์ด้วยเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่ (ไม้ทรงกระบอกขนาดยาว 4.50 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 3 นิ้ว) อย่างเดียวใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง. (ตั้งแต่เวลา 12.05 p.m. ถึง 3.55 p.m.) และเก็บตัวอย่างส่วนประกอบของ syngas ที่ตำแหน่งหลัง Main Blower จำนวนทั้งหมด 2 ครั้ง คือ ครั้งแรก sample gas MgO-1 ณ.เวลา 2.59 p.m. ครั้งที่สอง sample gas MgO-2 ณ.เวลา 3.19 p.m.

7.1.2 ทดสอบเดินอุปกรณ์ด้วยเชื้อเพลิงไม้ขนาดเดียวกับข้อ 7.1.1 ต่อสาร Catalytic (ในอัตราส่วน 100:1 เปอร์เซ็นต์) ใช้เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมง.(ตั้งแต่เวลา 4.00 p.m. ถึง 7.30 p.m.) และเก็บตัวอย่าง syngas ที่ตำแหน่งหลัง Main Blower จำนวนทั้งหมด 9 ครั้ง คือ 1.) Sample gas 4 ณ.เวลา 5.12 p.m., 2.) Sample gas 5 ณ.เวลา 5.22 p.m., 3.) Sample gas 6 ณ.เวลา 5.34 p.m., 4.) Sample gas 7 ณ.เวลา 5.47 p.m., 5.) Sample gas 8 ณ.เวลา 5.58 p.m., 6.) Sample gas 9 ณ.เวลา 6.12 p.m., 7.) Sample gas 10 ณ.เวลา 6.27 p.m., 8.) Sample gas 11 ณ.เวลา 6.42 p.m., 9.) Sample gas 12 ณ.เวลา 6.59 p.m.

7.2 รายละเอียดการปฏิบัติงาน

7.2.1 ก่อนการปฏิบัติงานได้ทำการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ของระบบแก๊สซิฟิเคชัน

7.2.2 เริ่มทำการทดสอบโดยการเติมเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่จนเต็มเตา Gasifier และบันทึกค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (ซึ่งจะเติมเชื้อเพลิงครั้งต่อไปทุกๆ 2 ชั่วโมง)

7.2.3 เปิด Blower เต็มอากาศและ Main Blower แล้วเริ่มจุดเตา Gasifier จนเชื้อเพลิงภายในเตาติดทั่วกันดีแล้ว

7.2.4 หลังจากเชื้อเพลิงภายในเตาติดทั่วกันดีแล้วเริ่มบันทึกค่า อุณหภูมิ และความดันทุกๆ 5 นาทีเพื่อดูแนวโน้มของอุณหภูมิ

7.2.5 รอจนระบบ Gasification System ทำงานที่สภาวะของระบบคงที่ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง.

7.2.6 เริ่มเก็บตัวอย่าง Sample gas ของ Condition เชื้อเพลิงไม้ขนาดเล็กอย่างน้อยสองครั้งระยะห่างกัน 15 นาที

7.2.7 เติมเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่กับสาร Catalytic (Dolomite) ในอัตราส่วน (100:1 เปอร์เซ็นต์)

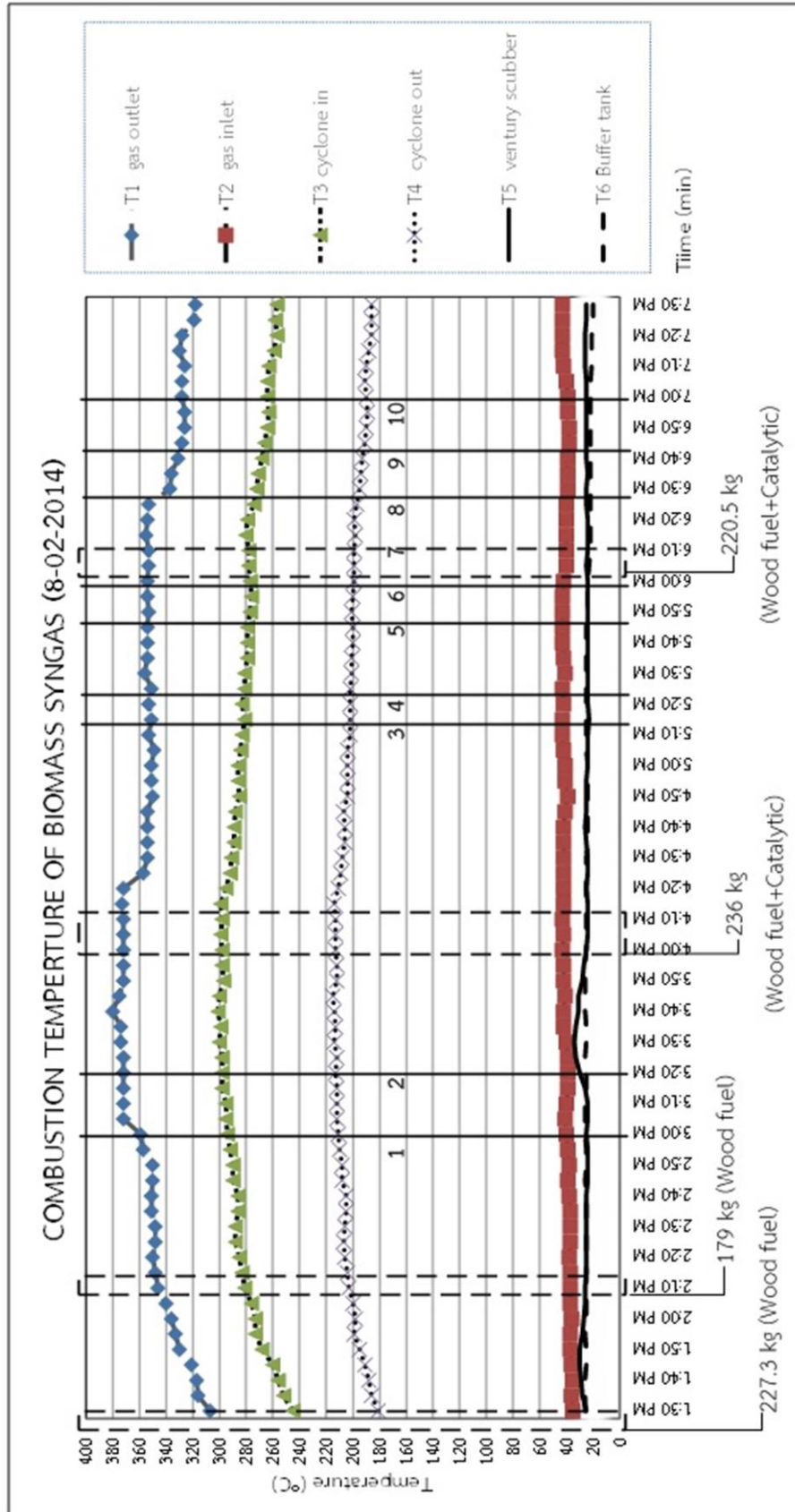
7.2.8 รอจนเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่กับสาร Catalytic เผาไหม้ได้ทั่วกันดีแล้วใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากเติมเชื้อเพลิง

7.2.9 จากนั้นเริ่มเก็บตัวอย่าง Sample gas ทุกๆ 15 นาทีเพื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบด้วย เครื่อง GAS CHROMATOGRAPHY (GC)

7.3 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ในระหว่างการทดลอง

จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิและความดันที่จุดต่างๆ (ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิแสดงในภาพที่ 7-2) หลังจากการ Warm up อุปกรณ์เรียบร้อยแล้วการทดสอบดังแสดงในภาพที่ 7-1 พบว่า

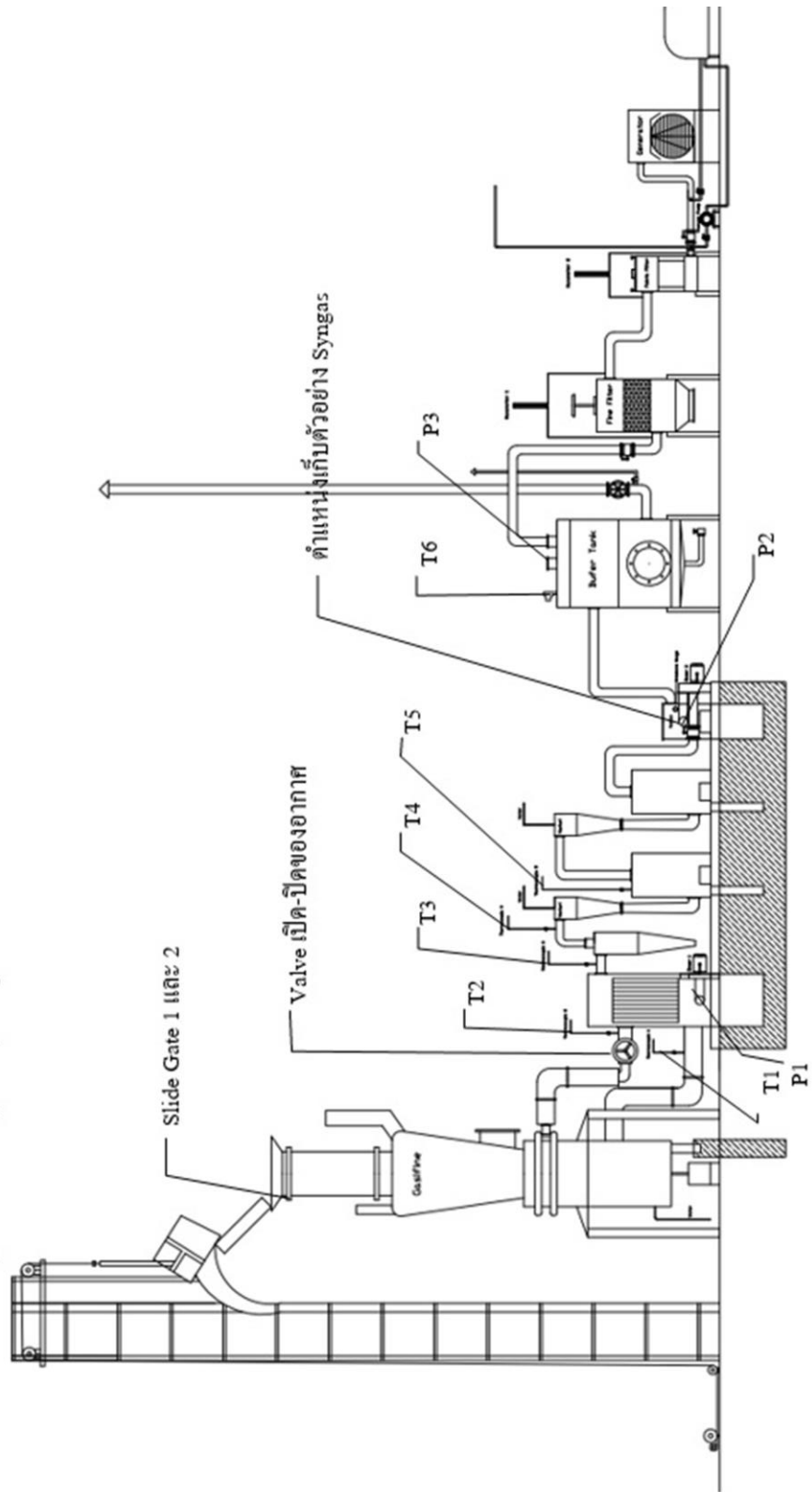
1. อุณหภูมิแก๊สไหลออกจากเตา T₁ gas outlet ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ 307-380°C
2. แก๊สที่ไหลเข้าเตา T₂ gas inlet ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ 35-45°C
3. แก๊สไหลเข้าไซโคลน T₃ Cyclone in ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ 241-301°C
4. แก๊สไหลออกจากไซโคลน T₄ Cyclone out ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ 173-215°C
5. อุณหภูมิแก๊ส T₅ Venturi scrubber ที่อ่านได้ 13-34°C
6. อุณหภูมิแก๊ส T₆ Buffer Tank ที่อ่านได้ 13-27°C
7. ความดันทางออก P₁ Pressure Blower ที่อ่านได้ 20-22 bar และ
8. ความดันของถัง P₃ Buffer Tank ค่าที่อ่านได้ 110-120 bar.



ภาพที่ 7- 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอุปกรณ์ระหว่างทำการทดลอง

Note: เส้นตั้งบอกตำแหน่งเวลาที่มีการ Sample Gas

7.4 แผนผังของอุปกรณ์และจุดวัดอุณหภูมิและความดัน



ภาพที่ 7- 2 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิและความดันของ Gasification System

7.5 ผลการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิง

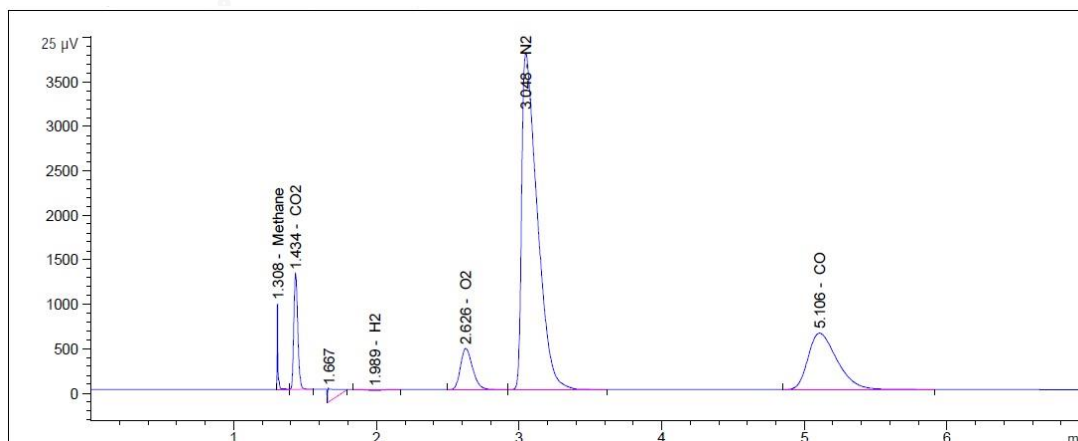
เติมเชื้อเพลิง ไม้ขนาดใหญ่ (Big Wood) อย่างเดียว ตอนเวลา 12.05 p.m. จากนั้น RUN อุปกรณ์จนถึงเวลา 3.55 p.m. รวมแล้วเวลาที่ใช้ไปสำหรับ RUN อุปกรณ์ทั้งหมด 230 นาที ใช้เชื้อเพลิงไป ทั้งหมด 456.3 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่ สำหรับการ RUN อุปกรณ์ Gasification นั้นจะต้องใช้เชื้อเพลิงในการ RUN อุปกรณ์ในอัตรา 119.03 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

เมื่อเติมเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่กับสาร Catalytic (Dolomite) ตอนเวลา 4.00 p.m. แล้ว จากนั้น RUN อุปกรณ์จนถึงเวลา 7.30 p.m. รวมแล้วใช้เวลาที่ใช้ไปสำหรับ RUN อุปกรณ์ทั้งหมด 210 นาที ใช้เชื้อเพลิงไปทั้งหมด 456.5 กิโลกรัม เช่นกันเมื่อคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่สำหรับการ RUN อุปกรณ์ Gasification จะต้องใช้เชื้อเพลิงในการ RUN อุปกรณ์ในอัตรา 130.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

จากข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ Gasification System อัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงมาตรฐานของอุปกรณ์ $120 \pm 10\%$ กิโลกรัมต่อชั่วโมงสำหรับการทดลองเติมเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่ อย่างเดียวพบว่าผลการวัดอัตราการสิ้นเปลืองคลาดเคลื่อน 0.8% เมื่อเติมเชื้อเพลิงไม้ขนาดใหญ่ กับสาร Catalytic (Dolomite) ผลการวัดอัตราการสิ้นเปลืองคลาดเคลื่อน 8.58% จากผลการวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของอุปกรณ์ Gasification System อยู่ในช่วงค่ามาตรฐานแสดงให้เห็นว่า อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเตา Gasification ค่อนข้างนิ่งเมื่อสังเกตเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอุปกรณ์ Gasification System ด้วย

7.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของ Syngas

การวิเคราะห์ของ Syngas เพื่อต้องการทราบสัดส่วนของแก๊สโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สที่เรียกว่า Gas Chromatography (GC) ในระหว่างการทดลองได้ทำการสุ่มตรวจตัวอย่าง Syngas ทุกๆ 15-20 นาที ตัวอย่างผลการวิเคราะห์จากเครื่อง GC ที่ได้จากการเก็บตัวอย่าง Syngas จาก Gasification แสดงในภาพที่ 7-3 และตารางที่ 7-1 ดังต่อไปนี้

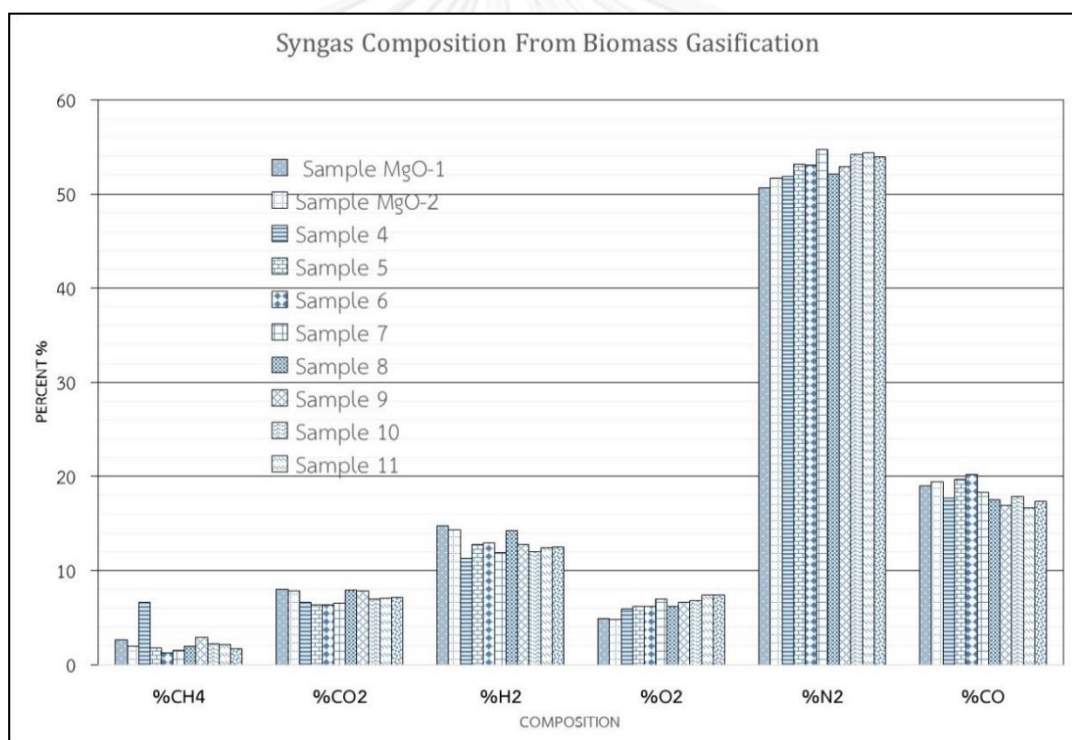


ภาพที่ 7- 3 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ Syngas ด้วยเครื่อง GC

ตารางที่ 7- 1 ผลการวิเคราะห์ Syngas จุดที่มีการ Sample Gas

Sample	Time	%CH ₄	%CO ₂	%H ₂	%O ₂	%N ₂	%CO	LHV (MJ/m ³)	NOTES
Sample MgO-1	2:59 PM	2.676278	8.048422	14.756088	4.927099	50.608014	18.984100	4.950445126	
Sample MgO-2	3:19 PM	1.941356	7.802795	14.325640	4.803023	51.706465	19.420721	4.696054458	Wood
Sample 4	5:12 PM	6.657709	6.641547	11.279019	5.900333	51.853813	17.667489	5.835695329	
Sample 5	5:22 PM	1.809288	6.391990	12.788375	6.209861	53.120482	19.680004	4.51598992	
Sample 6	5:34 PM	1.245985	6.399650	12.916836	6.172572	53.060580	20.204378	4.394381399	
Sample 7	5:47 PM	1.538086	6.544477	11.886748	6.981787	54.726530	18.322372	4.149918246	Wood and
Sample 8	5:58 PM	1.940840	7.964706	14.252103	6.224507	52.136468	17.481376	4.442525556	Catalytic
Sample 9	6:12 PM	2.930537	7.825736	12.783794	6.587247	52.914571	16.958115	4.572728947	(Dolomite)
Sample 10	6:27 PM	2.174045	6.949742	12.009160	6.769196	54.214374	17.883483	4.335392927	
Sample 11	6:42 PM	2.117823	7.049018	12.406316	7.381590	54.358967	16.686286	4.206519816	
Sample 12	6:59 PM	1.670647	7.158929	12.521578	7.385346	53.910956	17.352544	4.143047682	

จากผลการเก็บตัวอย่าง Syngas ในตารางที่ 7-1 ไปวิเคราะห์ส่วนประกอบแก๊สและพบว่าใช้ไม่อย่างเดียวนั้นเป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ sample Mog-1 และ sample Mog-2 พบการเปลี่ยนแปลงของ CH_4 อยู่ระหว่าง (1.9-2.6%) CO ที่(18.9-19.4%) และ H_2 ที่(14.3-14.8%) เมื่อนำผลของส่วนประกอบที่ได้ไปคำนวณค่า Heating Value, LHV ได้ประมาณ (4.6-4.9 MJ/m^3) สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบแก๊สของการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม้กับสาร Catalytic (Dolomite) ได้แก่ sample 4 พบการเปลี่ยนแปลงของ CH_4 ค่อนข้างสูงในช่วงแรกที่ (6.6%) CO ที่ (17.6%) และ H_2 มีการลดลงอยู่ที่ (11.2%) ค่าความร้อน LHV ประมาณ 5.8 MJ/m^3 แต่หลังจากนั้น sample 5 ถึง sample 12 พบการเปลี่ยนแปลงของ CH_4 อยู่ระหว่าง (1.2-2.9%) CO (16.6-20.2%) และ H_2 (11.8-14.2%) เมื่อนำผลที่ได้ไปคำนวณค่า Heating Value, LHV ได้ประมาณ (4.1-4.5 MJ/m^3) ซึ่งเป็นผลการเปลี่ยนแปลงของ Syngas Composition ดังแสดงได้ในภาพที่ 7- 4



ภาพที่ 7- 4 ผลการเปลี่ยนแปลงของ Syngas Composition จากเครื่อง GC

จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการทดลองของ Jayah et al., 2003[25] และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (NEST model) ของ Felipe Centeno et al., 2010 ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ gas composition โดยการทดลองใช้ Downdraft biomass Gasification[26] ในเงื่อนไขของ Gasification system แบบเดียวกันกับผลที่ทำการทดลองที่ศูนย์วิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี จึงนำผลทั้งสามแบบมาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ Syngas

Composition เพื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของส่วนประกอบของ Producer Gas ว่าผลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกับการวิจัยที่ผ่านมาแล้วดังแสดงในตารางที่ 7-2

ตารางที่ 7- 2 การเปรียบเทียบผลการทดลองของ Producer Gas

Sample	Material	%CH ₄	%CO ₂	%H ₂	%N ₂	%CO	%O ₂	LHV MJ/m ³
1	Sample MOg-1	2.68	8.05	14.76	50.61	18.98	4.93	4.95
	Jayah et al, 2003	1.10	9.70	18.30	50.70	20.20	-	4.92
	Felipe et al, 2010	0.90	10.80	14.50	54.50	19.20	-	4.31
2	Sample MOg-2	1.94	7.80	14.33	51.71	19.42	4.80	4.70
	Jayah et al, 2003	1.30	10.60	17.00	52.70	18.40	-	4.63
	Felipe et al, 2010	1.10	11.10	15.20	53.90	18.70	-	4.40

จากผลการเปรียบเทียบผลการทดลองในตารางที่ 7-2 พบว่าผลที่ได้ของ Sample Mog-1 และ Sample Mog-2 มีค่าความร้อน LHV ใกล้เคียงกันกับผลการทดลองของ Jayah et al., 2003 แต่เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Felipe et al., 2010 มีค่า LHV ต่างกันเล็กน้อย

สรุปได้ว่าผลการทดลองของ Sample Mog-1 และ Sample Mog-2 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้เพียงอย่างเดียวจากผลการทดลองเก็บตัวอย่างที่ได้จากเครื่อง GC แสดงค่าส่วนประกอบของ Producer Gas ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Jayah et al., 2003 จากนั้นจะนำค่าที่ได้จากผลการทดลองทั้งสองไปใช้ในการคำนวณโดยแบบจำลอง Adiabatic Flame Temperature (ADF) เพื่อหาอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ต่อไป

7.7 ผลการคำนวณ Adiabatic Flame Temperature

จากผลการเก็บตัวอย่าง Sample Gas ไปทดสอบหา Composition Gas ด้วยเครื่อง GC ได้ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen, H₂) ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen, N₂) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide, CO) ส่วนนี้คือสารระเหยที่ปล่อยออกมาเป็นก๊าซผลิตภัณฑ์ (Producer gas) เมื่อก๊าซ

ผลิตภัณฑ์สัมผัสกับอากาศทุติยภูมิ (Secondary air) จะเกิดการลุกไหม้ เมื่อนำส่วนประกอบของก๊าซมาคำนวณโดยใช้วิธี Adiabatic Flame Temperature โดยกำหนดให้ปริมาตรและความดันคงที่ การเผาไหม้สารระเหยไม่มีการสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการ ได้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ แต่อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ก๊าซผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศทุติยภูมิซึ่งโดยทั่วไปแล้วสำหรับการเผาไหม้ภายในบอยเลอร์จะคำนวณที่ 10-30 เปอร์เซ็นต์ของอากาศเกิน (excess air)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองของการคำนวณการเผาไหม้ ADF โดยใช้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเก็บตัวอย่างก๊าซ (ในภาคผนวก ง) จากระบบแก๊สซิฟิเคชันมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งใช้ตัวอย่างก๊าซ Sample Mog-1 และ Sample Mog-2 และทำการปรับปริมาณของอากาศเกินที่ 10% 15% 20% 25% และ 30% excess air เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ดังแสดงต่อไปนี้

ตารางที่ 7- 3 การเปลี่ยนแปลงของ Adiabatic flame Temperature

Name	Excess air	Maximum Temperature
	Percentage	°C
Sample Mog-1	10%	1549.44
	15%	1514.6
	20%	1481.33
	25%	1449.48
	30%	1419.02
Sample Mog-2	10%	1604.99
	15%	1570.00
	20%	1536.49
	25%	1504.44
	30%	1473.68

จากผลการคำนวณโดยใช้ก๊าซผลิตภัณฑ์ (Producer gas) ตัวอย่าง Sample Mog-1 และ Sample Mog-2 และทำการปรับปริมาณของอากาศเกินที่ 10% 15% 20% 25% และ 30% excess air พบว่าถ้าเปอร์เซ็นต์อากาศเกินเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ลดลง

7.8 ผลความแตกต่างของปริมาณชื้นไม้ต่อ Adiabatic Flame Temperature

จากผลการทดลองโดย Jayah et.al, 2003 โดยใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงโดย RUN เครื่อง Gasification แบบ downdraft ที่ปริมาณความชื้นของไม้ยางพาราระหว่าง 12.5%-18.5% dry basis จากนั้นเก็บตัวอย่าง Gas Composition ขนาดของ Chip size[25] ในตารางที่ 7-4 แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง Gas Composition ระหว่างการทดลอง

ตารางที่ 7- 4 ผลของ Gas Analyses จากการทดลองของ Jayah et.at,2003 [25]

Run no	Chip size (cm)	MC %	CO %	H ₂ %	CO ₂ %	CH ₄ %	N ₂ %
1	3.3	18.5	19.6	17.2	9.9	1.4	51.9
2	3.3	16.0	20.2	18.3	9.7	1.1	50.7
3	3.3	14.7	19.4	17.2	9.7	1.1	52.6
4	4.4	16.0	18.4	17.0	10.6	1.3	52.7
5	4.4	15.2	19.7	13.2	10.8	1.3	55.0
6	4.4	14.0	18.9	12.5	8.5	1.2	59.1
7	5.5	14.7	19.1	15.5	11.4	1.1	52.9
8	5.5	13.8	22.1	12.7	10.5	1.3	53.4
9	5.5	12.5	19.1	13.0	10.7	1.2	56.0

การทดลองของ Jayah et.at ได้แสดงผลของ Gas Analysis โดยการทดสอบที่ความแตกต่างของปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพารา (Chip size) ขนาด 3.3, 4.4 และ 5.5 เซนติเมตรที่ปริมาณความชื้นต่างกัน ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่กำลังนำมาเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อปริมาณความชื้นเศษไม้ที่มีต่อ Adiabatic Flame Temperature เพื่อหาอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้

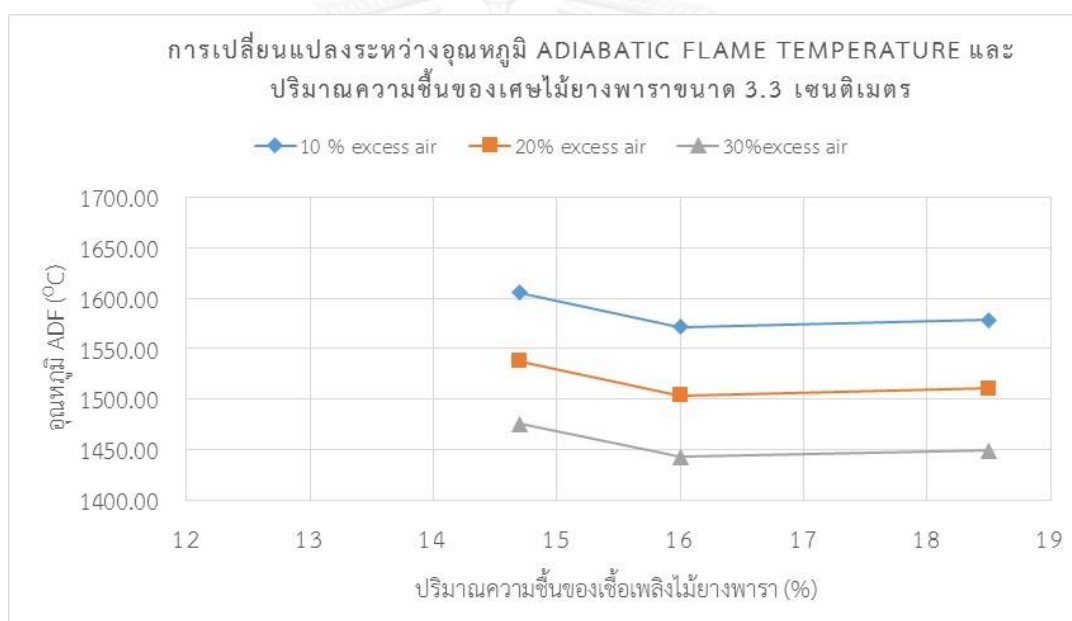
วิธีการวิเคราะห์ทำโดยนำค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของส่วนประกอบของ Producer Gas ที่ได้จากรายการที่ 7-4 ไปคำนวณหาอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ (วิธีการคำนวณในภาคผนวก ง) โดยคำนวณที่เปอร์เซ็นต์อากาศเกิน 10% 20% และ 30% ตามลำดับเพื่อดูพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ยางพาราภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงขนาดของเศษไม้ที่ 3.3 เซนติเมตร 4.4 เซนติเมตร และ 5.5 เซนติเมตรตามลำดับในตารางที่ 7-5 แสดงผลการเปรียบเทียบของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ที่ปริมาณความชื้นของเศษไม้ที่มีขนาดต่างกัน

ตารางที่ 7- 5 ผลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นต่ออุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature

chip Size (cm)	MC %	Adiabatic Flame Temperature		
		10 % excess air	20% excess air	30%excess air
		°C	°C	°C
3.3	18.5	1578.29	1510.71	1448.80
3.3	16	1571.52	1503.83	1442.74
3.3	14.7	1605.31	1537.64	1475.51
4.4	16	1618.15	1549.98	1487.44
4.4	15.2	1661.55	1593.87	1531.60
4.4	14	1681.29	1615.29	1554.35
5.5	14.7	1654.13	1582.58	1522.60
5.5	13.8	1619.28	1551.92	1490.04
5.5	12.5	1686.45	1618.85	1556.50

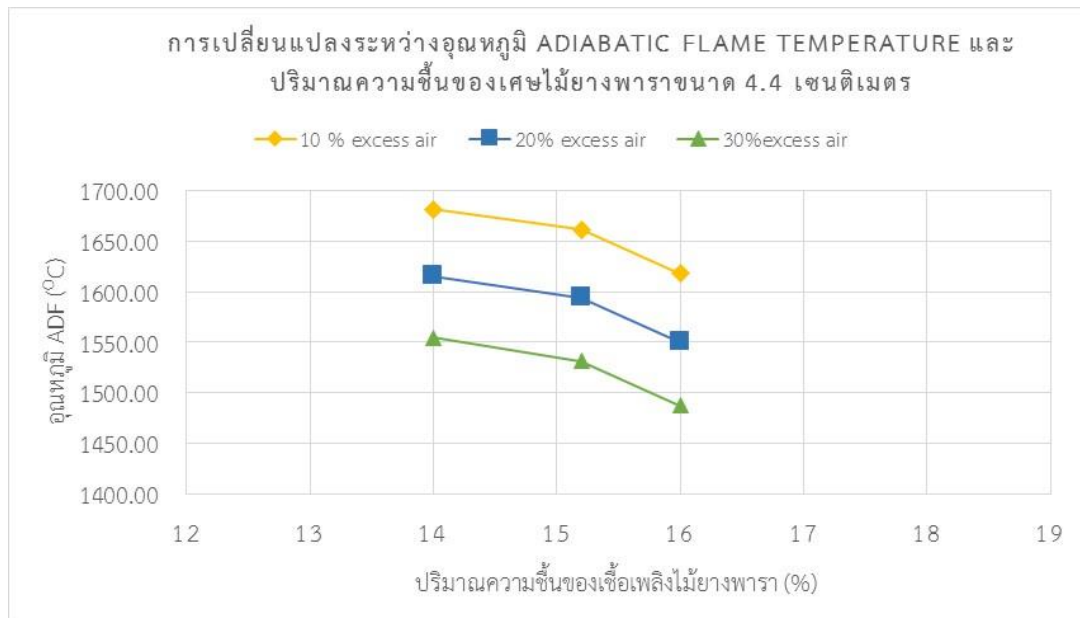
จากผลการทดลองในตารางที่ 7-5 พบว่าขนาดของเชื้อเพลิงเศษไม้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ Adiabatic Flame temperature ของการเผาไม้เล็กน้อยแต่อย่างไรก็ตามขนาด Chip Size เชื้อเพลิงเศษไม้จะมีผลต่ออัตราการเผาไหม้ถ่านชาร์และขึ้นอยู่กับขนาดของเตา gasification ที่ใช้

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature ที่ปริมาณอากาศเกิน 10% 20% และ 30% แสดงในภาพที่ 7-5 ภาพที่ 7-6 และภาพที่ 7-7 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิสูง Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ขนาด 3.3 เซนติเมตร 4.4 เซนติเมตร และ 5.5 เซนติเมตร ดังนี้



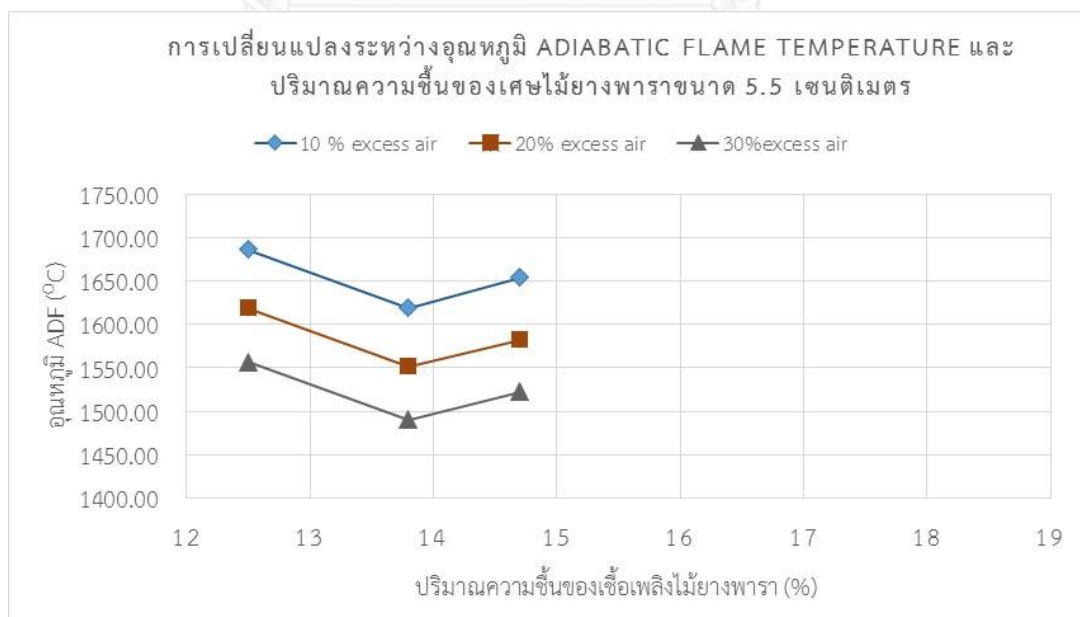
ภาพที่ 7- 5 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ขนาด 3.3 เซนติเมตร

ผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ขนาด 3.3 เซนติเมตรพบว่าปริมาณความชื้นลดลงจาก 18.5% ไปที่ 14.7% หรือลดลงประมาณ 4% ที่ปริมาณอากาศเกิน 10% 20% และ 30% จะทำให้อุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature เพิ่มขึ้นประมาณ 26-27 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7- 6 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพาราขนาด 4.4 เซนติเมตร

ผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพาราขนาด 4.4 เซนติเมตรพบว่าปริมาณความชื้นลดลงจาก 16% ไปที่ 14% หรือลดลงประมาณ 2% ที่ปริมาณอากาศเกิน 10% 20% และ 30% จะทำให้อุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature เพิ่มขึ้นประมาณ 63.14-69.91 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 7- 7 การเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพาราขนาด 5.5 เซนติเมตร

ผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพาราขนาด 5.5 เซนติเมตรพบว่าปริมาณความชื้นลดลงจาก 14.7% ไปที่ 12.5% หรือลดลงประมาณ 2.2% ที่ปริมาณอากาศเกิน 10% 20% และ 30% จะทำให้อุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature เพิ่มขึ้นประมาณ 107-108 องศาเซลเซียส

สรุปจากผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพาราเปลี่ยนแปลงลดลง 2-4% จะทำให้อุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature เพิ่มขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่นำไปใช้ ถ้าขนาดของ Chip size เศษไม้ยางพาราประมาณ 3.3 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 26-27 องศาเซลเซียส ขนาดของ Chip size เศษไม้ยางพาราประมาณ 4.4 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 63.41-66.91 องศาเซลเซียส และสุดท้ายที่ขนาดของ Chip size เศษไม้ยางพาราประมาณ 5.5 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 107-108 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้จะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดแต่จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น เพราะปริมาณความชื้นจะส่งผลต่อส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้

บทที่ 8

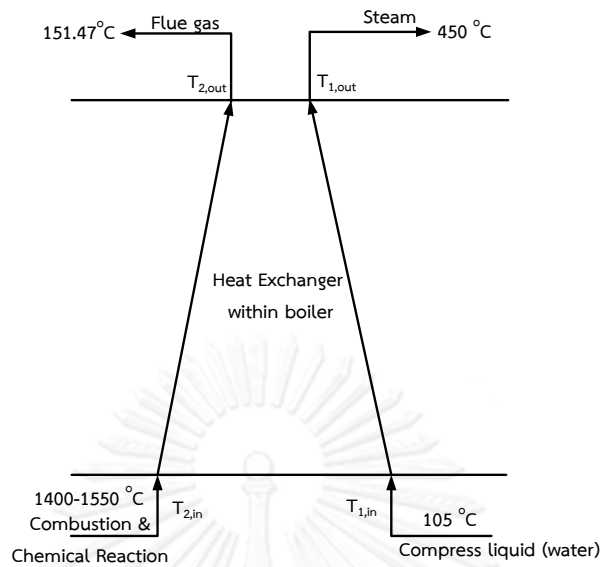
แบบจำลองของวัฏจักรแรงคิน

ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรแรงคินและผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบจากวัฏจักรแรงคินอย่างง่าย จากนั้นผลการทดลองในบทที่ 6 ที่ได้จากการทำนายการลดลงของปริมาณความชื้นของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ได้แก่ ที่ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ 10.4% 46% 49% 54% และ 59% ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้จะนำไปคำนวณกับสมการที่ 4.26 ประสิทธิภาพของบอยเลอร์เพื่อหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้สำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์ ซึ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะมากหรือน้อยจะขึ้นกับค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศป้อนเข้า อัตราการเผาไหม้ของชีวมวล อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงสุดที่เกิดขึ้นในเบด ซึ่งปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้มีอิทธิพลอย่างมากต่อตัวแปรต่างๆเหล่านี้ แต่บทนี้จะพูดถึงผลของปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงที่มีผลต่อการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์เท่านั้น

8.1 วิธีการวิเคราะห์แบบจำลองวัฏจักรแรงคิน

วิธีการวิเคราะห์โดยสร้างแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรแรงคิน เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวัฏจักร สมมุติที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 7.5 MW คอนเดนเซอร์ควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อัตราการผลิตไอน้ำของบอยเลอร์ที่ต้องการเพื่อขับเทอร์ไบน์ 33.23 ตัน/ชม. ที่ความดันไอน้ำของบอยเลอร์ 50 บาร์

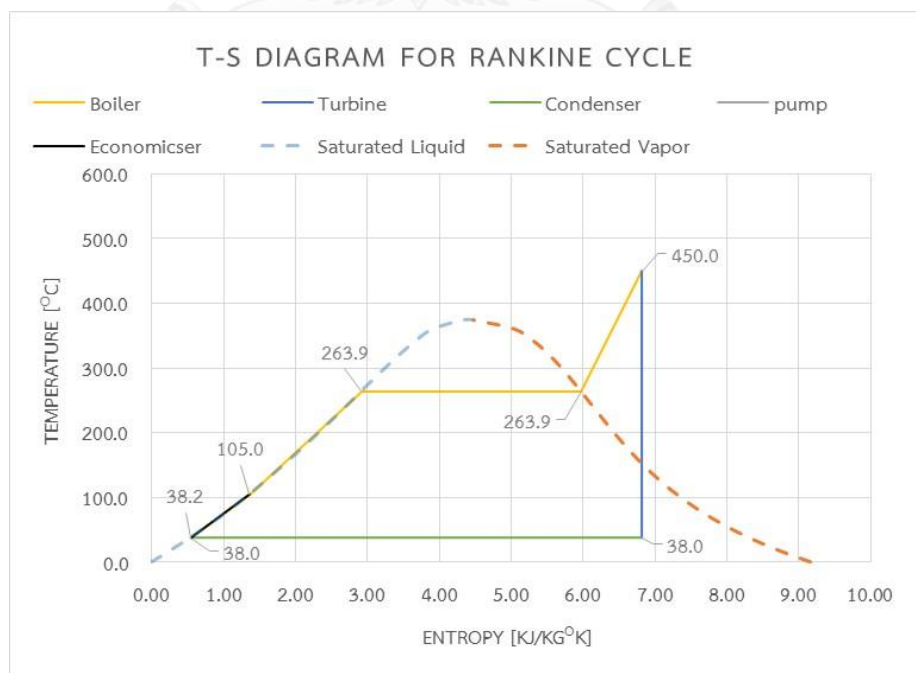
อุณหภูมิเฉลี่ยของการแผ่รังสีบนพื้นผิวเชื้อเพลิงที่เผาไหม้มีค่า 900 องศาเซลเซียสจากนั้นสารระเหยจากเชื้อเพลิง (Devolatilisation) ที่ปล่อยออกมาจากเนื้อไม้สัมผัสกับอากาศทุกชนิดแล้วเกิดการลุกไหม้ที่อุณหภูมิจากการคำนวณ Adiabatic Flame Temperature ประมาณ 1400-1550 องศาเซลเซียส เมื่อสมมุติให้ระบบมีการป้อนเชื้อเพลิงจนสามารถที่จะรักษาปริมาณความร้อนเข้าที่บอยเลอร์จนสามารถให้ไอน้ำได้ตามความต้องการแล้ว จากนั้นกำหนดให้ก๊าซร้อนเมื่อไหลผ่านอุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำในท่อของบอยเลอร์ ดังแสดงในภาพที่ 8-1 แล้วอุณหภูมิลดลงเหลือ 450 องศาเซลเซียส



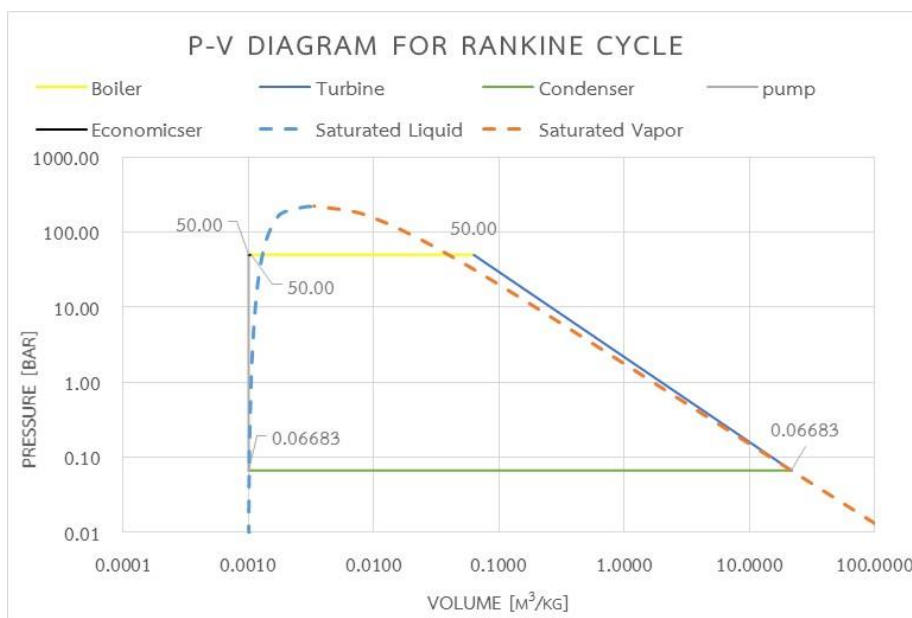
ภาพที่ 8- 1 การแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซร้อนกับน้ำในท่อภายในบอยเลอร์

8.2 ผลการคำนวณแบบจำลองวัฏจักรแรงคิน

จากข้อมูลที่กล่าวมา นำมาใช้คำนวณกับแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรแรงคินอย่างง่ายได้ (โดยใช้สมมติฐานเดียวกับภาคผนวก จ) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T กับเอนโทรปี s ของแบบจำลองของวัฏจักรแรงคินอย่างง่ายแสดงในภาพที่ 8-2 และได้ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P กับปริมาตร v แสดงในภาพที่ 8-3 ได้ดังนี้



ภาพที่ 8- 2 T-s ไดอะแกรมของวัฏจักรแรงคิน



ภาพที่ 8- 3 P-v ไดอะแกรมของวัฏจักรแรงคิน

ผลการคำนวณพบว่าต้องการปริมาณความร้อนเข้าที่บอยเลอร์ในการผลิตไอน้ำมีค่า 3151.96 (+) kJ/kg และหลังจากผ่านเทอร์ไบน์แล้วยังมีปริมาณความร้อนที่ต้องขับออกที่คอนเดนเซอร์ 1951.84 (-) kJ/kg และต้องการงานป้อนเข้าที่ปั๊ม 5.04 (-) kJ/kg ซึ่งระบบจะทำงานออกจากเทอร์ไบน์เป็น 1205.15 (+) kJ/kg ซึ่งต้องใช้ไอน้ำปริมาณ 33.23 ตัน/ชม ดังแสดงในตารางที่ 8-1 จึงจะเพียงพอที่ขับอุปกรณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อให้ได้กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้า 7.5 MW ตามต้องการ

ตารางที่ 8- 1 ผลการคำนวณปริมาณความร้อนและงานของอุปกรณ์

	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	Q (kJ/kg)	W (kJ/kg)
ปั๊ม (Pump) kJ/kg	159.21	164.245	0.00	(-) 5.04
บอยเลอร์ (Boiler)	164.245	3316.20	(+) 3151.96	0.00
เทอร์ไบน์ (Turbine)	3316.20	2111.05	0.00	(+) 1205.15
คอนเดนเซอร์ (Condenser)	2111.05	159.21	(-) 1951.84	0.00
		Sums=	(+) 1200.12	(+) 1200.12

จากการคำนวณด้วยแบบจำลองพบว่าที่กำลังการผลิตไฟฟ้า 7.5 MW ระบบมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ของระบบ 25.78% งานสุทธิของระบบ (work net) 1200.12 kJ/kg ดังนั้นที่ปริมาณไอน้ำ 33.23 ตัน/ชั่วโมง จะได้กำลังขับเพลานขนาด 11.123 MW ซึ่งเพียงพอในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 7.5 MW (ดูภาคผนวก จ)

8.3 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นเศษไม้ที่มีต่อการใช้เชื้อเพลิงไม้ในโรงไฟฟ้า

จากการคำนวณด้วยแบบจำลองวัฏจักรแรงคินพบว่าเพื่อให้ได้กำลังการผลิตไฟฟ้า 7.5 MW ที่กำลังการผลิตไอน้ำของบอยเลอร์ที่ 33.23 ตัน/ชม.หรือ 9.23 กิโลกรัมต่อวินาที ภายใต้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ 25.78 เปอร์เซ็นต์ นั้นต้องการปริมาณความร้อนเข้าที่บอยเลอร์ในการผลิตไอน้ำมีค่า 3151.96 kJ/kg ซึ่งจะนำผลนี้ไปคำนวณความต้องการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพของบอยเลอร์ที่ขึ้นอยู่กับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้โดยใช้สมการที่ 4.26 สำหรับการคำนวณความต้องการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ประสิทธิภาพโดยทั่วไปของบอยเลอร์ประมาณ 90% เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณความชื้นที่มีผลต่อการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้สำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อนกับบอยเลอร์

จากผลการทดสอบตัวอย่างเศษไม้ยางพาราของกรมวิทยาศาสตร์บริการ (Laboratory No. L54/10205.1) ของวันที่ 26 ธันวาคม 2554 ในภาคผนวก ค ผลการทดสอบทั้ง 3 ครั้งคือ received basis, Air-dry basis และ Dry basis มีปริมาณความชื้นของเศษไม้ 48.8% 10.4% และแห้งสนิท 0% ตามลำดับ ในตารางที่ 8-2 ซึ่งแสดงค่าความร้อนสุทธิ Net Calorific value, kJ/Kg ของเชื้อเพลิงเศษไม้แสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 8- 2 ผลการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ยางพารา

Elements	As received basis		Air-dry basis		Dry basis	
Moisture	48.8	%	10.4	%	-	%
Ash	1.9	%	3.4	%	3.8	%
Volatile matter	39.5	%	69.2	%	19	%
Fixed carbon	9.8	%	17	%	77.2	%
carbon	26.6	%	46.5	%	51.9	%
Hydrogen	8.3	%	6.2	%	5.6	%
Nitrogen	0.14	%	0.24	%	0.27	%
Sulfur	0.02	%	0.03	%	0.03	%
Oxygen	63	%	43.6	%	38.4	%
Gross Calorific value	10106.94	kJ/kg	17685.04	kJ/kg	19736.58	kJ/kg
Net Calorific Value	8298.68	kJ/kg	16336.89	kJ/kg	18518.22	kJ/kg

ปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพของบอยเลอร์ที่ขึ้นอยู่กับค่าความชื้นต่ำของเชื้อเพลิงเศษไม้ยางพาราจากตารางที่ 8-2 นำมาคำนวณโดยใช้สมการที่ 4.26 ประสิทธิภาพของบอยเลอร์เพื่อหาความต้องการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้สำหรับการเผาไหม้ โดยกำหนดให้คำนวณที่ปริมาณความชื้นของไม้ต่างกันคือ 10.4% 46% 49% 54% และ 59% ตามลำดับ

วิธีการหาค่าความร้อน Gross Calorific value (HHV) และ Net Calorific Value (LHV) ของไม้ที่ความชื้นต่างๆทำได้โดย

$$HHV = HHV_{dry\ basis} * ((100 - MC) / 100) \quad (8.1)$$

$$LHV = HHV_{dry\ basis} - ((HHV_{dry\ basis} - LHV_{dry\ basis}) * (100 - MC) / 100) - (LH\ Heat * (MC / 100)) \quad (8.2)$$

เมื่อ Latent heat of vaporization of water มีค่าเท่ากับ 2260 kJ/kg

ผลจากการคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้จากสมการที่ 8.1 และ 8.2 ที่ปริมาณความชื้นของไม้ที่ 10.4% 46% 49% 54% และ 59% แสดงในตารางที่ 8-3 ดังนี้

ตารางที่ 8- 3 ผลการคำนวณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ความชื้นต่างกัน

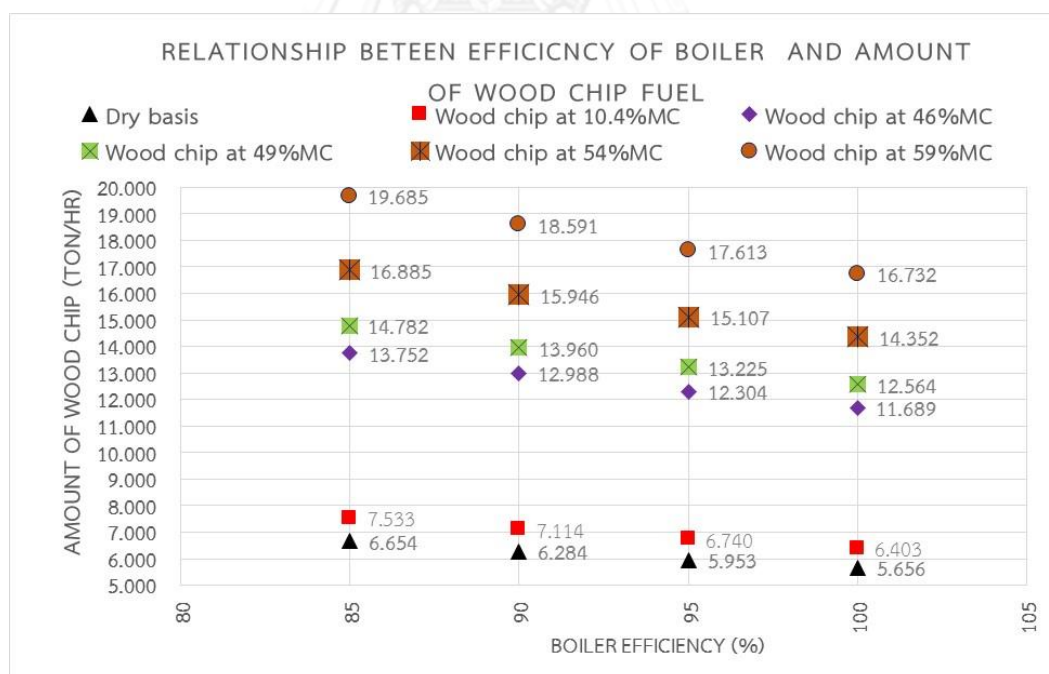
ปริมาณความชื้น MC (%)	(Dry basis)	10.4%	46%	49%	54%	59%
HHV (kJ/kg)	19736.58	17685.04	10659.59	10065.07	9076.98	8093.08
LHV (kJ/kg)	18518.22	16357.83	8959.75	8335.92	7297.59	6259.27

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของบอยเลอร์กับปริมาณเชื้อเพลิงเศษไม้ที่ต้องการใช้สำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อนกับบอยเลอร์ ที่ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่ dry basis 10.4% 46% 49% 54% และ 59% ซึ่งมีค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงเศษไม้ LHV คือ 18,518.22 kJ/kg, 16,375.83 kJ/kg, 8,959.75 kJ/kg, 8,335.92 kJ/kg, 7,297.9 kJ/kg และ 6,259.27 kJ/kg ตามลำดับ แสดงได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 8- 4 ผลของความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของบอยเลอร์กับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์

Boiler Efficiency %	Wood Chip Fuel					
	Dry basis	10.4%MC	46%MC	49%MC	54%MC	59%MC
100	5.656	6.403	11.689	12.564	14.352	16.732
95	5.953	6.740	12.304	13.225	15.107	17.613
90	6.284	7.114	12.988	13.960	15.946	18.591
85	6.654	7.533	13.752	14.782	16.885	19.685

ผลของความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของบอยเลอร์กับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์ ในตารางที่ 8-4 ซึ่งความต้องการใช้เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่ประสิทธิภาพโดยทั่วไปของบอยเลอร์ประมาณ 90% สามารถแสดงได้ดังนี้



ภาพที่ 8- 4 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของบอยเลอร์กับปริมาณเชื้อเพลิงเศษไม้ที่ใช้เผาไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์

จากการทดลองพบว่าเศษไม้ยางพาราสดหลังจากการย่อยด้วยเครื่อง Chipper มีปริมาณความชื้นอยู่ประมาณ 50-60% จากนั้นนำเชื้อเพลิงเศษไม้ไปตากโดยใช้วิธี Solar Greenhouse Drying แล้วพบว่าปริมาณความชื้นของเศษไม้ลดลงประมาณ 5% ต่อสัปดาห์ จากนั้นนำผลการลดลงของความชื้นในแต่ละช่วงสัปดาห์คือ 59% 54% 49% 46% และ 10.4% ถ้านำไปใช้เผาไหม้ให้ความร้อนกับบอยเลอร์ที่ทำงานภายใต้ประสิทธิภาพ 90% จะต้องใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ยางพาราประมาณ 18.591ตัน/ชม. 15.946ตัน/ชม. 13.960ตัน/ชม. 12.988ตัน/ชม. และ 7.114 ตัน/ชม.ตามลำดับ

ดังนั้นที่เงื่อนไขการทำงานของบอยเลอร์ที่ประสิทธิภาพคงที่ เศษไม้ยางพาราที่นำมาใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงถ้ามีปริมาณความชื้นน้อยลงก็สามารถลดปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิง (Fuel Consumption) ของบอยเลอร์ลงได้

8.4 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าเพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพของบอยเลอร์ที่ต้องการนั้น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะมากหรือน้อยจะขึ้นกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ นอกจากนี้ปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเศษไม้ที่ระบบเตาเผาจะได้รับ ยังขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศป้อนสู่อัตราการเผาไหม้ของชีวมวล อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงสุดที่เกิดขึ้นในเบด ซึ่งปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้มีอิทธิพลอย่างมากต่อตัวแปรต่างๆ เหล่านี้อีกด้วย

บทที่ 9

สรุป

ในบทนี้จะเป็นการสรุปสาระสำคัญทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ โดยกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในด้าน ของความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่มีผลต่อผลผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ

9.1 สรุป

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองสมรรถนะการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำจากเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาผลความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ ที่มีผลต่อสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้า

ในกระบวนการทางการเกษตรไปถึงการแปรรูปผลผลิตของอุตสาหกรรมทำให้เกิดของเหลือทิ้งซึ่งเป็นอินทรีย์สาร หรือเรียกว่า "ชีวมวล" วัสดุเหล่านี้เป็นของเหลือทิ้งที่มีศักยภาพ สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานภายในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ และยังมีจำนวนเศษไม้เหลือทิ้งมากเพียงพอที่จะส่งขายเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าขนาดเล็กได้ แต่เนื่องจากการนำเอาเชื้อเพลิงเศษไม้มาใช้ให้ความร้อนในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ พบว่าฤดูกาลในช่วงหนึ่งปีและวิธีการเก็บรักษาเชื้อเพลิงเศษไม้ มีผลต่อความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ ซึ่งเมื่อนำเชื้อเพลิงเหล่านี้ไปเผาไหม้ให้ความร้อนในระบบผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของการผลิตการกระแสไฟฟ้า

จากการศึกษาแบบจำลองการเผาไหม้และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษไม้เป็นขั้นตอนโดยเศษไม้จะเริ่มแห้ง ความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้จะลดลง จากนั้นจะมีการปล่อยสารระเหยจำพวกไฮโดรคาร์บอนและเกิดเป็นถ่าน สารระเหยซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงที่ปล่อยออกจากกระบวนการระเหยส่วนแรกจะผสมกับอากาศบริเวณรอบๆ ก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของการเผาไหม้จากแหล่งนี้จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ และอัตราการผสมของอากาศกับสารระเหยที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในเตาเผา

เนื่องจากความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไม้ ซึ่งสามารถลดได้โดยใช้ Solar Greenhouse ลดปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้โดยใช้วิธีแบบ passive mode จากนั้นทำนายพฤติกรรมลดลงของปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้ที่เก็บไว้ภายใน Solar Greenhouse drying

จากผลการทดลองพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse drying ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการโพลีโนเมียลกำลังสอง พบว่าที่ปริมาณมีความชื้นเศษไม้ลดลงเหลือที่ 59% 49% 46% และ 10.4% ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ของบอยเลอร์ที่กำลังการผลิตไอน้ำ 33.23 ตัน/ชม. แต่เนื่องจากว่าการทดลองเก็บตัวอย่างจริงโดยใช้บอยเลอร์ทำได้ยาก จึงได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน gasification

โดยการเปลี่ยนแปลงระหว่างอุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature และปริมาณความชื้นของเศษไม้ยางพาราเปลี่ยนแปลงลดลง 2-4% จะทำให้อุณหภูมิ Adiabatic Flame Temperature เพิ่มขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นนั้นยังอยู่กับขนาดของเชื้อเพลิงเศษไม้ที่นำไปใช้ด้วย ถ้าขนาดของ Chip size เศษไม้ยางพาราประมาณ 3.3 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 26-27 องศาเซลเซียส ขนาดของ Chip size เศษไม้ยางพาราประมาณ 4.4 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 63.41-66.91 องศาเซลเซียส และสุดท้ายที่ขนาดของ Chip size เศษไม้ยางพาราประมาณ 5.5 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นประมาณ 107-108 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น เพราะปริมาณความชื้นจะส่งผลต่อส่วนประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้

การวิเคราะห์วัฏจักรแรงคินและผลการคำนวณประสิทธิภาพของระบบจากวัฏจักรแรงคินอย่างง่าย เพื่อนำมาประเมินผลปริมาณความชื้นของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying ได้แก่ ที่ปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงเศษไม้ 10.4% 46% 49% 54% และ 59% เพื่อหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้สำหรับการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่บอยเลอร์ ซึ่งปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจะมากหรือน้อยจะขึ้นกับค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศป้อนหมุ่ อัตราการเผาไหม้ของชีวมวล อุณหภูมิของการเผาไหม้สูงสุดที่เกิดขึ้นในเบด ซึ่งปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเศษไม้มีอิทธิพลอย่างมากต่อตัวแปรต่างๆ

สรุปจากการศึกษาพบว่าเศษไม้ยางพาราสดหลังจากการย่อยด้วยเครื่อง Chipper มีปริมาณความชื้นอยู่ประมาณ 50-60% เมื่อนำเชื้อเพลิงเศษไม้ไปตากโดยใช้วิธี Solar Greenhouse Drying แล้วพบว่าปริมาณความชื้นของเศษไม้ลดลงประมาณ 2-6% ต่อสัปดาห์ จากการนำผลการลดลงของความชื้นในแต่ละช่วงสัปดาห์คือ 59% 54% 49% 46% และ 10.4% ถ้านำไปใช้เผาไหม้ให้ความร้อนกับบอยเลอร์ที่ทำงานภายใต้ประสิทธิภาพ 90% จะต้องใช้เชื้อเพลิงเศษไม้ยางพาราประมาณ 18.591 ตัน/ชม. 15.946 ตัน/ชม. 13.960 ตัน/ชม. 12.988 ตัน/ชม. และ 7.114 ตัน/ชม. ตามลำดับ

9.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการบวนการลดความชื้นของเศษไม้โดยใช้ Solar Greenhouse Drying แบบ passive mode ต้องทำช่องเปิด-ปิด ด้านบนหลังคาเพื่อในตอนกลางวันความชื้นระเหยออกไปได้และในตอนเย็นจากต้องเปิดโล่งด้านข้างเพื่อให้อากาศภายนอกไล่ความร้อนที่อยู่ภายใน Solar Greenhouse drying ออกไป

2. เศษไม้ที่ตากใน Solar Greenhouse Drying ต้องมีความลึกไม้ไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตรขึ้นไปเพราะที่ผิวของกองไม้มีการเปลี่ยนแปลงต่อสภาวะอากาศมากกว่าพื้นผิวชั้นในทำให้ปริมาณความชื้นลดลงได้ยากกว่า

3. ในการคำนวณของ Adiabatic flame Temperature และ Rankine Cycle Model ในงานวิจัยนี้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณอาจจะมีความยุ่งยากในการใช้งานดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานจะต้องมีการพัฒนาให้เป็นแบบจำลองสำเร็จรูป

4. ในการวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ภายในบอยเลอร์เพื่อให้ทราบถึงพลังงานและความร้อนที่ใช้สำหรับการเผาไหม้จึงควรศึกษาข้อมูลของบอยเลอร์และทำ Mass and energy balance เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น

5. การศึกษาและรวบรวมขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาของการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเศษไม้ในงานวิจัยนี้ยังเป็นขั้นพื้นฐานดังนั้นเพื่อให้เข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาและผลกระทบของตัวแปรต่างๆ อาจจะต้องพิจารณาไปถึงการทดลองจริงในอนาคต



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

1. Ragland, K.W., D.J. Aerts, and A.J. Baker, Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource Technology*, 1991. 37(2): p. 161-168.
2. Maithel, S., *Rasource Assessmaent Handbook*. 2009.
3. Kofman, P.D., *finalfuelquality Quality wood chip fuel.pdf*. Harvesting/transportation, 2006. 6.
4. Gary L Borman and K.W. Ragland, *Combustion Engineering*. International Editions ed. 1998, Singapore: McGraw-Hill.
5. Zhang, X., et al., Experimental investigation and mathematical modelling of wood combustion in a moving grate boiler. *Fuel Processing Technology*, 2010. 91(11): p. 1491-1499.
6. Yang, Y.B., et al., Effects of fuel devolatilisation on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed. *Fuel*, 2003. 82(18): p. 2205-2221.
7. กนกจรรูจิตร, ก., *พื้นฐานของการสันดาป (Fundamentals of Combustion)*. พิมพ์ครั้งที่ 1 ed. ตุลาคม 2556: บริษัท จรัสสินทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.
8. W.C.R., C. and K. B.B., Analysis of Chemical and Physical Process During Devolatilization of a Single Large Particle of Wood. *Chemical Reaction Engineering*, 1982. ACC Symposium Series 1982, n 196: p. 459-471.
9. Mohan, D., C.U. Pittman, and P.H. Steele, Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 2006. 20(3): p. 848-889.
10. Yang, Y.B., et al., Mathematical modelling of straw combustion in a 38MWe power plant furnace and effect of operating conditions. *Fuel*, 2007. 86(1-2): p. 129-142.
11. Yang, Y.B., et al., Modelling Waste Combustion in Grate Furnaces. *Process Safety and Environmental Protection*, 2004. 82(3): p. 208-222.
12. Rönnbäck, M., et al., Combustion Processes in a Biomass Fuel Bed- Experimental Results, in *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*. 2008, Blackwell Science Ltd. p. 743-757.
13. Jirjis, R., Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, 1995. 9(1-5): p. 181-190.
14. Chau, J., et al., Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry. *Applied Energy*, 2009. 86(3): p. 364-371.
15. Biagini, E., et al., Devolatilization rate of biomasses and coal-biomass blends: an experimental investigation. *Fuel*, 2002. 81(8): p. 1041-1050.

16. Soria-Verdugo, A., et al., Analysis of biomass and sewage sludge devolatilization using the distributed activation energy model. *Energy Conversion and Management*, 2013. 65(0): p. 239-244.
17. CENGEL, Y.A. and M.A. BOLES, *Thermodynamic: An Engineering Approach*. 5th edition ed. 2005: McGraw-Hill.
18. คณะวิทยาศาสตร์-มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. การทดลองการเรื่องเปลี่ยนสถานะ. cited 2014 27 July; Available from: <http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/labphysics1/heat/ideal.htm>.
19. P. K. Nag, *Power Plant Engineering*. Third Edition, ed. 2008: McGraw-Hill., pp 41-96.
20. ThermoNET. Tutorial X: Vapor Power System. cited 2014 11 May; Available from: http://www.wiley.com/college/moran/CL_0471465704_S/user/tutorials/tutorial10/tutorial10b_parent.html.
21. Ma, Q. and V. Rudolph, Prediction of vapor–moisture equilibriums for a wood–moisture system using a modified UNIQUAC model. *Chemical Engineering Science*, 2006. 61(18): p. 6077-6084.
22. Prakash, O. and A. Kumar, Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 29: p. 905-910.
23. Sethi, V.P. and S. Arora, Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection. *Solar Energy*, 2009. 83(9): p. 1472-1484.
24. Berroug, F., et al., Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Buildings*, 2011. 43(11): p. 3027-3035.
25. Jayah, T.H., et al., *Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying*. *Biomass and Bioenergy*, 2003. 25(4): p. 459-469.
26. Centeno, F., et al., Theoretical and experimental investigations of a downdraft biomass gasifier-spark ignition engine power system. *Renewable Energy*, 2012. 37(1): p. 97-108.



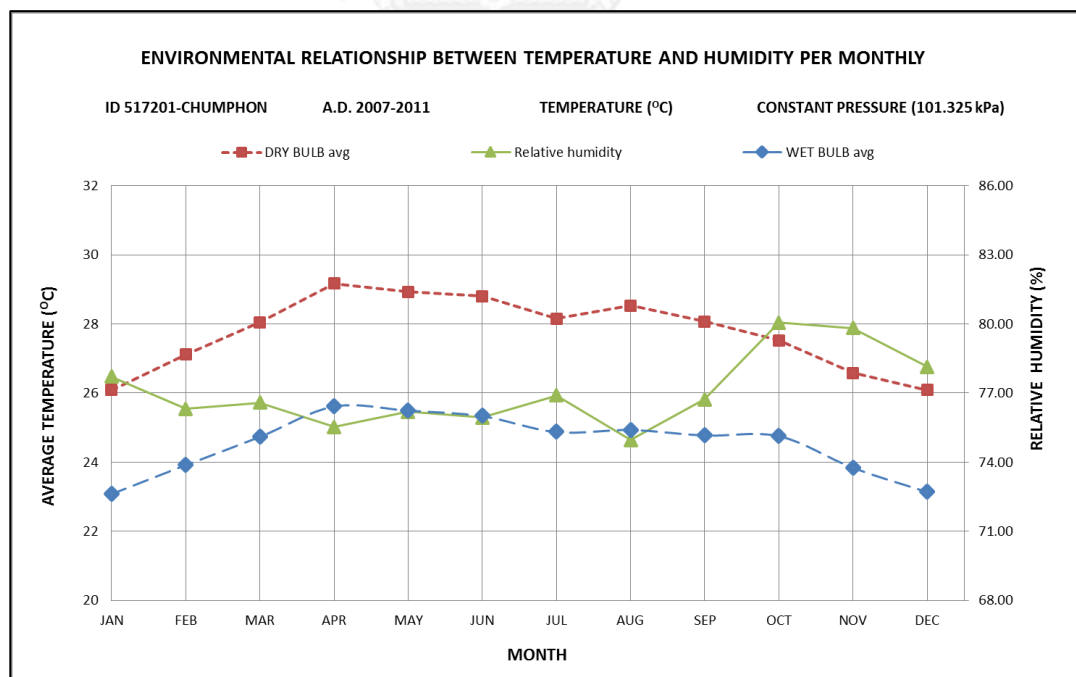
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

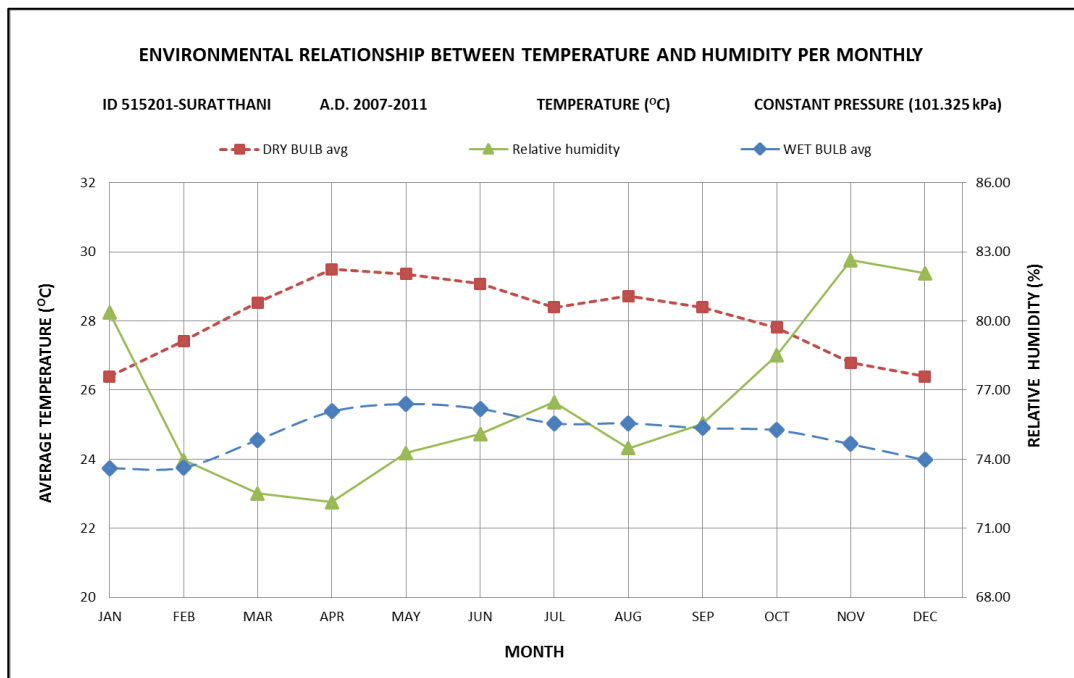
ภาคผนวก ก
ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ
เฉลี่ยในแต่ละเดือน

ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดที่คัดเลือกในภาคใต้ของประเทศไทย ดังนี้

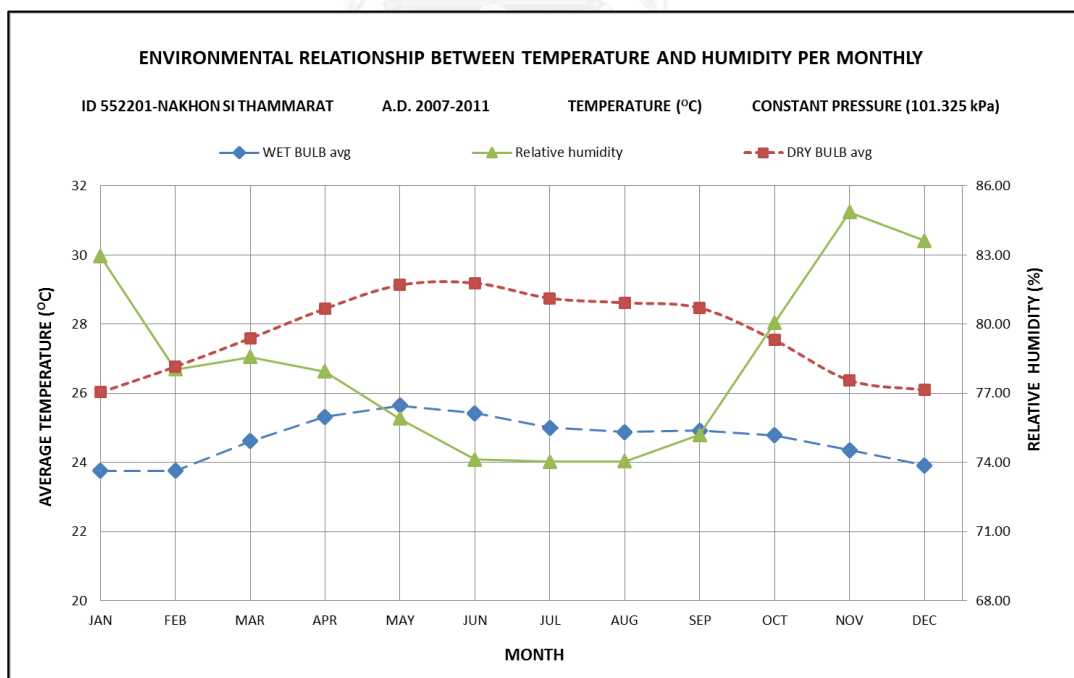
- จังหวัดชุมพร
- จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- จังหวัดนครศรีธรรมราช
- พัทลุง
- ท่าอากาศยานอำเภอหาดใหญ่จังหวัดสงขลา
- ท่าอากาศยานจังหวัดปัตตานี
- จังหวัดยะลา
- จังหวัดนราธิวาส



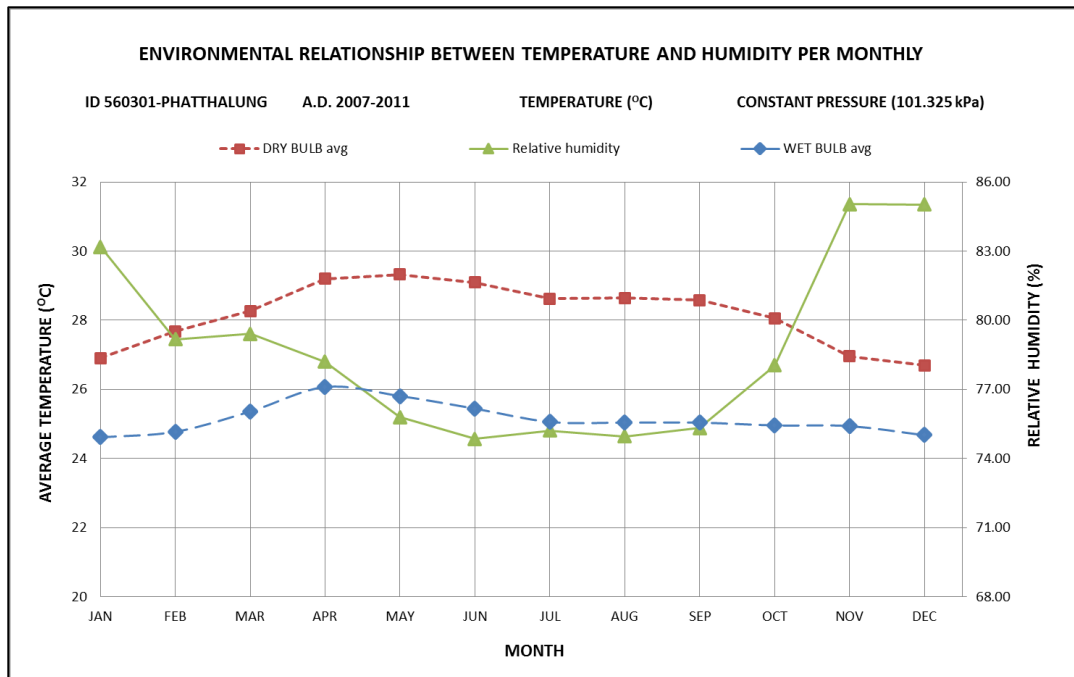
ภาพที่ ก- 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดชุมพร



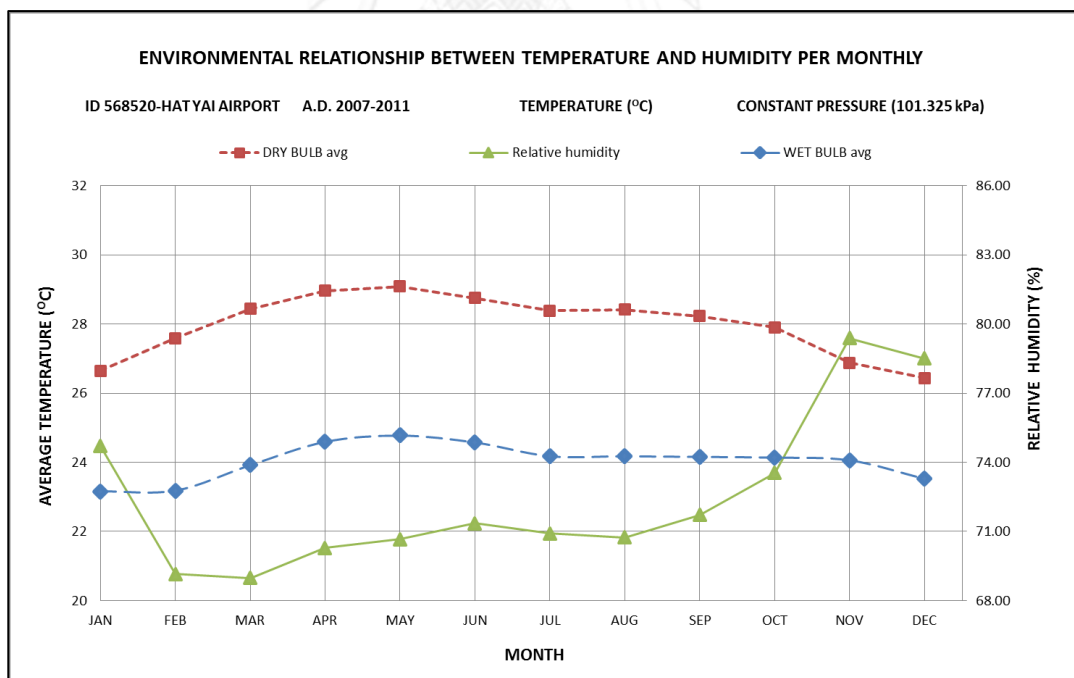
ภาพที่ ก- 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดสุราษฎร์ธานี



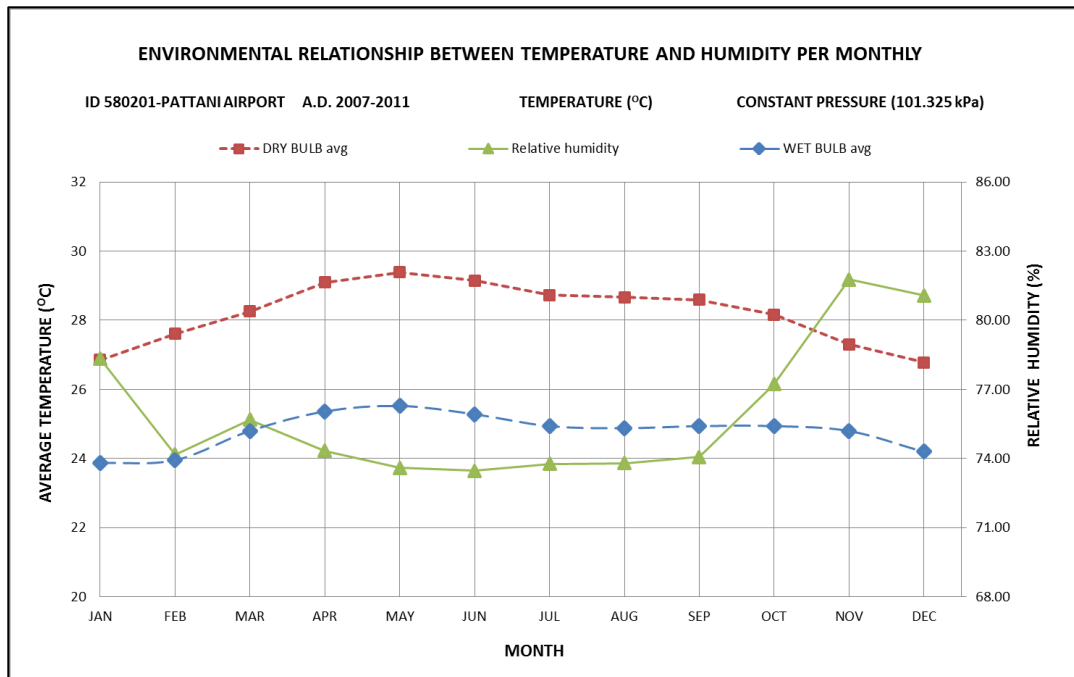
ภาพที่ ก- 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนครศรีธรรมราช



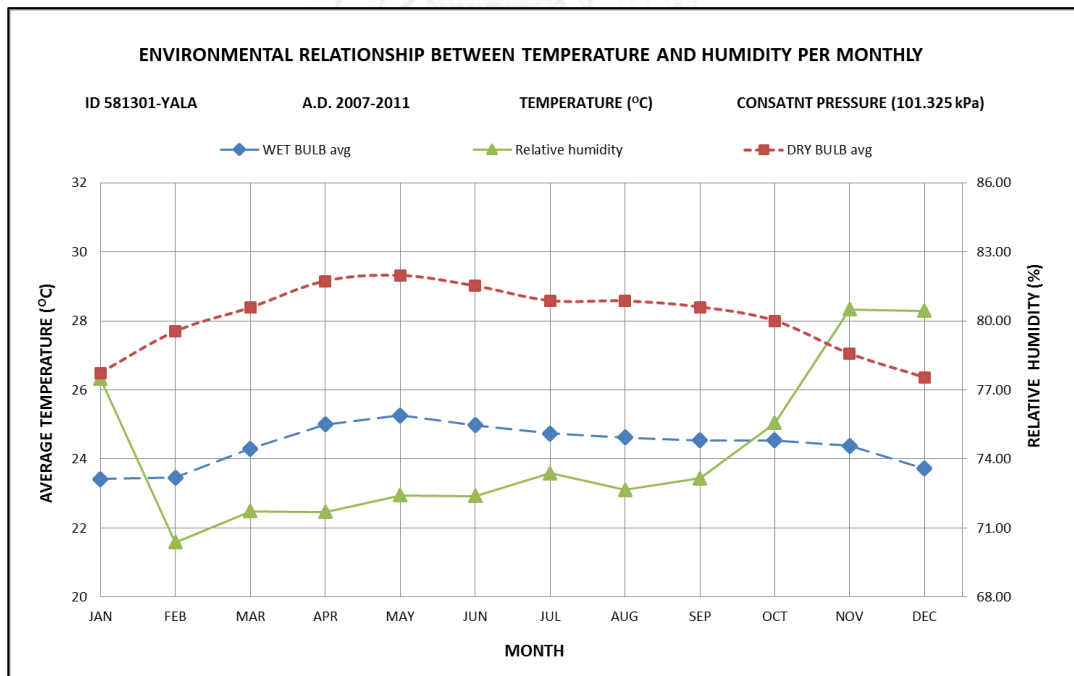
ภาพที่ ก- 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดพัทลุง



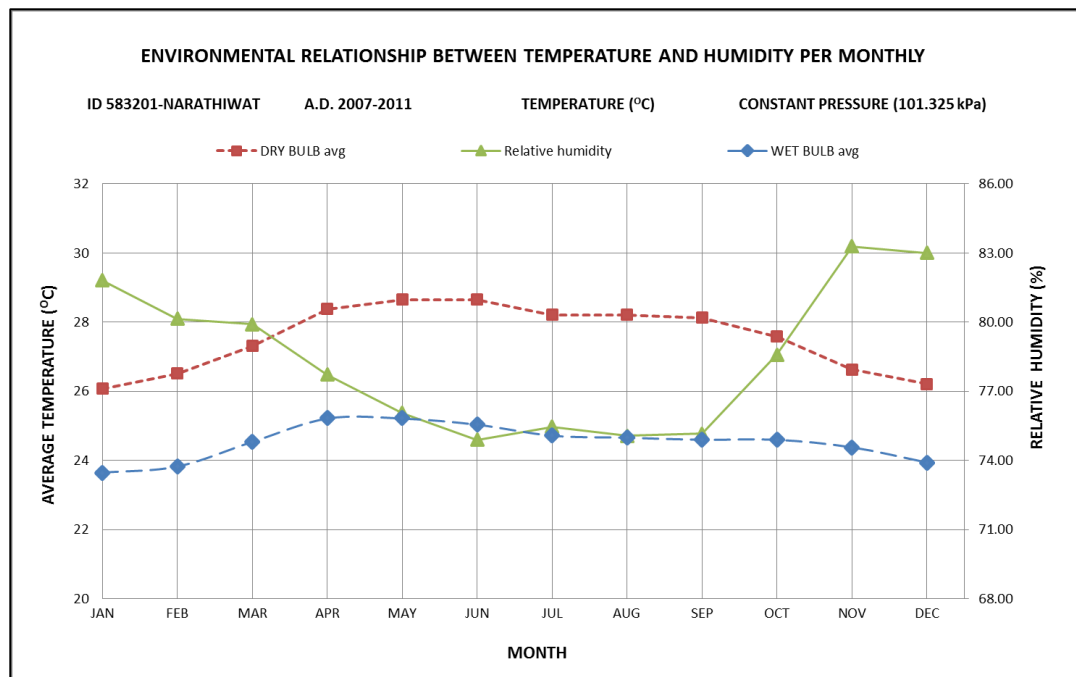
ภาพที่ ก- 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานอำเภอหาดใหญ่จังหวัดสงขลา



ภาพที่ ก- 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานจังหวัดปัตตานี



ภาพที่ ก- 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดยะลา



ภาพที่ ก- 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส

ก.2 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปี แต่ละเดือนจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดที่คัดเลือกในภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Wet bulb temperature
- Dry bulb temperature
- Relative Humidity
- Humidity ratio
- Specific enthalpy of moles air
- Specific volume
- Area weight
- Vapor pressure

ตารางที่ ก- 1 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดชุมพร

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
517201- Chumphon	2007	22.9	23.4	24.8	25.8	25.4	25.5	25.1	25	24.8	24.6	23.2	23.3
517201- Chumphon	2008	23.6	24	24.7	25.4	24.9	24.9	24.8	24.8	24.6	25.1	23.5	21.7
517201- Chumphon	2009	21.4	23.6	24.8	25.5	25.3	25.2	24.8	25.2	24.8	24.8	23.9	24.1
517201- Chumphon	2010	24.2	24.5	25.2	26	26.4	25.7	25	24.9	25.1	24.6	24.1	23.9
517201- Chumphon	2011	23.3	24.1	24.2	25.4	25.5	25.4	24.7	24.8	24.6	24.7	24.5	22.7
	WET BULB avg	23.08	23.92	24.74	25.62	25.5	25.34	24.88	24.94	24.78	24.76	23.84	23.14
517201- Chumphon	2007	26.4	26.85	29.05	29.7	28.7	29.15	27.85	28.4	28.15	26.85	26.1	26.4
517201- Chumphon	2008	26.75	26.95	27.8	28.9	28.15	28.15	27.95	28.7	28	28	26.15	25.15
517201- Chumphon	2009	24.45	27.2	28.2	29	28.65	28.75	28.15	28.9	27.8	27.8	27.05	26.6
517201- Chumphon	2010	26.75	27.45	28.55	29.9	30.2	29.35	28.8	28.3	28.6	27.5	26.25	26.45
517201- Chumphon	2011	26.1	27.15	26.65	28.35	28.95	28.6	28	28.35	27.8	27.45	27.35	25.85
	DRY BULB avg	26.09	27.12	28.05	29.17	28.93	28.8	28.15	28.53	28.07	27.52	26.58	26.09
Relative humidity	RH%	77.72	76.32	76.58	75.52	76.19	75.94	76.89	74.97	76.72	80.06	79.82	78.14
Humidity ratio	W g/Kg	16.63	17.47	18.44	19.44	19.33	19.12	18.63	18.56	18.50	18.70	17.61	16.72
Specific enthalpy of moist air	h kJ/kg	68.62	71.92	75.26	78.97	78.46	77.78	75.85	76.08	75.43	75.37	71.62	68.86
Specific volume	v m ³ /kg	0.870	0.874	0.878	0.883	0.882	0.881	0.879	0.880	0.878	0.877	0.873	0.870
Area wight	AW kg/m ³	0.019	0.020	0.021	0.022	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.020	0.019
vaper pressure	vp Pa	2638.97	2768.12	2917.26	3070.34	3054.67	3021.70	2946.24	2936.66	2926.11	2956.95	2789.75	2653.18

ตารางที่ ก-2 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุมิวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดสุราษฎร์ธานี

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
551201- Surat Thani	2007	23.9	23.4	24.5	25.4	25.5	25.8	25.1	25	25	24.6	24	24.2
551201- Surat Thani	2008	24.1	23.5	24.4	25.1	25.2	25.2	25.1	24.9	24.5	25	24.3	23.5
551201- Surat Thani	2009	22.7	23.6	24.8	25.5	25.5	25.2	25	25.1	25	25	24.7	24.1
551201- Surat Thani	2010	24.1	24.1	24.8	25.7	26.3	25.7	25.1	25.2	25.2	24.8	24.5	24.3
551201- Surat Thani	2011	23.9	24.2	24.3	25.2	25.5	25.4	24.9	25	24.8	24.8	24.7	23.8
WET BULB avg		23.74	23.76	24.56	25.38	25.6	25.46	25.04	25.04	24.9	24.84	24.44	23.98
551201- Surat Thani	2007	26.6	27.3	29	29.75	29.05	29.1	28.05	28.6	28.5	27.2	26.4	26.55
551201- Surat Thani	2008	26.75	26.85	28.2	29.3	28.5	28.45	28.45	28.9	28.2	28.25	26.4	25.85
551201- Surat Thani	2009	25.4	27.5	28.95	29.1	29.05	29.15	28.6	28.65	28.3	28.1	27.4	26.85
551201- Surat Thani	2010	26.85	28	29.3	30.7	30.9	29.5	28.6	28.8	28.7	27.9	26.3	26.65
551201- Surat Thani	2011	26.35	27.45	27.2	28.6	29.3	29.15	28.25	28.65	28.25	27.6	27.45	26.05
DRY BULB avg		26.39	27.42	28.53	29.49	29.36	29.07	28.39	28.72	28.39	27.81	26.79	26.39
Relative humidity		80.37	73.95	72.51	72.13	74.27	75.09	76.47	74.48	75.55	78.51	82.64	82.07
Humidity ratio		17.53	17.13	17.94	18.89	19.32	19.21	18.79	18.65	18.56	18.71	18.48	17.91
Specific enthalpy of moist air		71.23	71.26	74.49	77.92	78.88	78.29	76.51	76.50	75.92	75.69	74.07	72.20
Specific volume		0.872	0.875	0.879	0.883	0.883	0.882	0.880	0.881	0.879	0.878	0.875	0.873
Area wight		0.020	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
vaper pressure		2777.80	2715.39	2840.61	2987.06	3052.69	3035.21	2971.32	2949.77	2935.57	2958.25	2924.18	2836.46

ตารางที่ ก- 3 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนครศรีธรรมราช

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
552201- Nakhon Si Thammarat	2007	23.9	23.5	24.5	25.5	25.5	25.6	25	24.7	24.9	24.5	23.8	23.8
552201- Nakhon Si Thammarat	2008	24	23.7	24.6	25	25.2	25.1	24.9	24.8	24.7	25	24.4	23.7
552201- Nakhon Si Thammarat	2009	22.9	23.7	24.8	25.3	25.6	25.2	25	25	25	24.8	24.6	24.1
552201- Nakhon Si Thammarat	2010	24.3	23.9	24.7	25.8	26.3	25.7	25.1	25.1	25.1	24.8	24.4	24.1
552201- Nakhon Si Thammarat	2011	23.7	24	24.5	25	25.6	25.5	25	24.8	24.9	24.8	24.6	23.9
WET BULB avg		23.76	23.76	24.62	25.32	25.64	25.42	25	24.88	24.92	24.78	24.36	23.92
552201- Nakhon Si Thammarat	2007	26.15	26.3	27.8	28.65	28.75	29.05	28.45	28.75	28.55	26.95	25.9	26.25
552201- Nakhon Si Thammarat	2008	26.1	26.45	27.4	28.05	28.9	28.8	28.8	28.5	28.4	27.85	26.1	25.8
552201- Nakhon Si Thammarat	2009	25.4	26.85	27.8	28.55	28.85	29.65	29	28.85	28.7	27.95	27.05	26.4
552201- Nakhon Si Thammarat	2010	26.8	27.35	28.15	29.3	30.2	29.4	28.9	28.7	28.35	27.7	26.05	26.1
552201- Nakhon Si Thammarat	2011	25.7	26.9	26.8	27.7	28.95	29.05	28.6	28.3	28.35	27.25	26.8	25.95
DRY BULB avg		26.03	26.77	27.59	28.45	29.13	29.19	28.75	28.62	28.47	27.54	26.38	26.1
Relative humidity	RH%	82.94	78.03	78.57	77.95	75.89	74.12	74.04	74.04	75.20	80.07	84.86	83.62
Humidity ratio	W g/Kg	17.72	17.40	18.44	19.23	19.49	19.09	18.57	18.43	18.56	18.72	18.53	17.94
Specific enthalpy of moist air	h kj/kg	71.32	71.29	74.78	77.71	79.06	78.11	76.33	75.83	76.00	75.45	73.75	71.97
Specific volume	v m3/kg	0.871	0.873	0.877	0.881	0.883	0.882	0.880	0.880	0.880	0.877	0.874	0.872
Area wight	AW kg/m3	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
vaper pressure	vp Pa	2806.21	2757.86	2917.02	3039.35	3078.20	3016.94	2937.55	2915.56	2935.46	2960.72	2931.03	2840.65

ตารางที่ ก- 4 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดพัทลุง

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
560301- Phatthalung	2007	25	24.5	25.3	26.2	25.7	25.9	25.2	25.1	25.4	25	24.8	25
560301- Phatthalung	2008	24.8	24.7	25.2	25.8	25.3	25.2	25.1	25.1	24.9	25.3	24.8	24.4
560301- Phatthalung	2009	23.8	24.6	25.3	25.8	25.7	25.2	25	25.1	25	24.8	25.3	25
560301- Phatthalung	2010	25.1	25.3	25.8	26.7	26.5	25.6	25.1	25.3	25.2	24.9	24.9	24.4
560301- Phatthalung	2011	24.4	24.8	25.2	25.8	25.8	25.3	24.9	24.6	24.7	24.8	24.9	24.6
WET BULB avg		24.62	24.78	25.36	26.06	25.8	25.44	25.06	25.04	25.04	24.96	24.94	24.68
560301- Phatthalung	2007	26.85	27.3	28.4	28.9	28.6	28.8	28.75	28.45	28.55	27.4	26.8	27
560301- Phatthalung	2008	27.05	27.35	27.95	28.9	28.6	28.15	28.2	28.35	28.35	28.2	26.65	26.25
560301- Phatthalung	2009	26	27.9	28.15	29	29.05	29.75	29	29.4	29.1	28.8	27.4	27.45
560301- Phatthalung	2010	27.7	28.25	29.3	30.45	30.75	29.35	28.7	28.8	28.75	28.3	26.7	26.3
560301- Phatthalung	2011	26.9	27.6	27.5	28.75	29.6	29.4	28.45	28.2	28.15	27.55	27.25	26.45
DRY BULB avg		26.9	27.68	28.26	29.2	29.32	29.09	28.62	28.64	28.58	28.05	26.96	26.69
Relative humidity		83.17	79.17	79.40	78.20	75.79	74.84	75.20	74.95	75.31	78.05	85.03	85.02
Humidity ratio		18.73	18.66	19.38	20.18	19.68	19.16	18.73	18.68	18.71	18.80	19.23	18.92
Specific enthalpy of moist air		74.81	75.45	77.89	80.91	79.75	78.20	76.59	76.50	76.51	76.19	76.15	75.07
Specific volume		0.875	0.877	0.880	0.884	0.884	0.882	0.880	0.880	0.880	0.879	0.876	0.875
Area wight		0.021	0.021	0.022	0.023	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022	0.022
vaper pressure		2962.09	2951.57	3062.14	3184.45	3107.75	3028.68	2961.44	2955.00	2958.91	2973.11	3039.17	2990.97

ตารางที่ ก- 5 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานอำเภอหาดใหญ่

จังหวัดสงขลา

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
568502- Hat Yai Airport	2007	23.4	23	23.9	24.6	25	24.8	24.4	24.2	24.3	24	23.8	23.7
568502- Hat Yai Airport	2008	23.4	22.8	23.7	24.4	24.3	24.3	24.1	24.1	23.9	24.2	23.9	23.3
568502- Hat Yai Airport	2009	22.4	23.1	24	24.6	24.7	24.4	24.2	24.1	24.1	24	24.2	23.5
568502- Hat Yai Airport	2010	23.5	23.7	24.1	25	25.1	24.6	24.1	24.5	24.3	24.3	24.2	23.6
568502- Hat Yai Airport	2011	23.1	23.3	23.9	24.4	24.8	24.8	24.1	24	24.2	24.2	24.2	23.5
WET BULB avg		23.16	23.18	23.92	24.6	24.78	24.58	24.18	24.18	24.16	24.14	24.06	23.52
568502- Hat Yai Airport	2007	26.55	27.35	28.85	28.75	29	28.55	28.3	28.55	28.4	27.35	26.75	26.5
568502- Hat Yai Airport	2008	26.8	26.85	27.85	28.7	28.6	28.25	28.3	28.45	28.35	28.35	26.6	26
568502- Hat Yai Airport	2009	25.85	27.7	28.25	28.75	28.7	29.3	28.7	28.55	28.4	28.2	27	27.1
568502- Hat Yai Airport	2010	27.35	28.45	29.6	30.15	30.3	28.95	28.35	28.55	28.25	27.95	26.9	26.15
568502- Hat Yai Airport	2011	26.7	27.6	27.65	28.45	28.85	28.7	28.3	28	27.75	27.65	27.15	26.45
DRY BULB avg		26.65	27.59	28.44	28.96	29.09	28.75	28.39	28.42	28.23	27.9	26.88	26.44
Relative humidity	RH%	74.69	69.16	68.97	70.28	70.66	71.36	70.90	70.73	71.71	73.54	79.39	78.51
Humidity ratio	W g/Kg	16.52	16.15	16.95	17.82	18.06	17.88	17.38	17.37	17.42	17.53	17.83	17.17
Specific enthalpy of moist air	h kj/kg	68.91	68.95	71.87	74.64	75.39	74.56	72.93	72.93	72.85	72.78	72.51	70.34
Specific volume	v m3/kg	0.872	0.874	0.877	0.880	0.881	0.880	0.878	0.878	0.877	0.877	0.874	0.872
Area wight	AW kg/m3	0.019	0.018	0.019	0.020	0.021	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
vaper pressure	vp Pa	2621.35	2564.69	2687.77	2822.51	2859.51	2831.28	2755.09	2753.13	2760.58	2777.17	2824.10	2721.24

ตารางที่ ก- 6 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของท่าอากาศยานจังหวัดปัตตานี

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
580201- Pattani Airport	2007	24	23.8	24.8	25.4	25.6	25.5	25.1	24.8	24.9	24.7	24.6	24.3
580201- Pattani Airport	2008	24.1	23.6	24.7	25.1	25.1	25	24.9	25	24.9	25.1	24.7	23.9
580201- Pattani Airport	2009	23	23.9	24.8	25.3	25.3	25.4	24.9	24.9	25	24.8	24.8	24.1
580201- Pattani Airport	2010	24.3	24.4	25	25.8	26	25.3	24.7	25.1	25.1	25.2	25.1	24.4
580201- Pattani Airport	2011	24	24.1	24.7	25.2	25.6	25.2	25.1	24.6	24.8	24.9	24.8	24.3
WET BULB avg		23.88	23.96	24.8	25.36	25.52	25.28	24.94	24.88	24.94	24.94	24.8	24.2
580201- Pattani Airport	2007	26.75	27.2	28.45	28.85	29.15	28.9	28.65	28.8	28.65	27.45	27.15	26.95
580201- Pattani Airport	2008	27	26.85	28.05	28.8	29.05	28.55	28.45	28.65	28.45	28.4	26.8	26.15
580201- Pattani Airport	2009	26.15	27.7	28.15	29.15	29	29.6	28.75	28.7	28.75	28.6	27.55	27.45
580201- Pattani Airport	2010	27.6	28.7	29.1	30.1	30.45	29.6	28.9	28.65	28.6	28.35	27.3	26.5
580201- Pattani Airport	2011	26.75	27.55	27.55	28.55	29.3	29.1	28.9	28.5	28.5	28	27.7	26.85
DRY BULB avg		26.85	27.6	28.26	29.09	29.39	29.15	28.73	28.66	28.59	28.16	27.3	26.78
Relative humidity		78.34	74.18	75.68	74.33	73.59	73.47	73.77	73.80	74.06	77.23	81.77	81.07
Humidity ratio		17.56	17.37	18.45	19.03	19.17	18.87	18.48	18.41	18.54	18.72	18.86	18.10
Specific enthalpy of moist air		71.77	72.06	75.50	77.85	78.53	77.51	76.07	75.83	76.08	76.10	75.55	73.08
Specific volume		0.874	0.875	0.879	0.882	0.883	0.882	0.880	0.880	0.880	0.879	0.877	0.874
Area wight		0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022	0.021
vaper pressure		2781.91	2752.49	2918.68	3007.97	3029.89	2983.39	2923.60	2912.95	2932.74	2960.82	2981.37	2865.11

ตารางที่ ก- 7 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดยะลา

stn_name and stn code	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
581301- Yala	2007	23.8	23.6	24.4	25.2	25.7	25.3	25.1	24.8	24.5	24.4	24.3	23.7
581301- Yala	2008	23.8	23	24.1	24.7	24.8	24.7	24.5	24.5	24.2	24.6	24.3	23.5
581301- Yala	2009	22.5	23.3	24.3	25.1	25	25	24.6	24.6	24.6	24.3	24.4	23.7
581301- Yala	2010	23.8	23.9	24.6	25.2	25.5	25	24.6	24.8	24.7	24.8	24.5	23.8
581301- Yala	2011	23.2	23.5	24.1	24.8	25.3	24.9	24.9	24.4	24.7	24.6	24.4	23.9
WET BULB avg		23.42	23.46	24.3	25	25.26	24.98	24.74	24.62	24.54	24.54	24.38	23.72
581301- Yala	2007	26.7	27.8	29.25	29.2	29.15	28.85	28.35	28.4	28.45	27.45	27.15	26.3
581301- Yala	2008	26.75	26.9	27.95	28.9	28.8	28.6	28.55	28.6	28.2	28.4	26.75	26.1
581301- Yala	2009	25.7	27.95	28.2	29.15	29	29.55	28.8	28.9	28.6	28.15	27.05	26.7
581301- Yala	2010	27.1	28.4	29.15	29.95	30.3	29.2	28.65	28.65	28.45	28.15	27.1	26.1
581301- Yala	2011	26.2	27.4	27.35	28.55	29.3	28.85	28.55	28.3	28.3	27.85	27.2	26.6
DRY BULB avg		26.49	27.69	28.38	29.15	29.31	29.01	28.58	28.57	28.4	28	27.05	26.36
Relative humidity	RH%	77.49	70.37	71.73	71.70	72.41	72.39	73.37	72.66	73.15	75.56	80.50	80.43
Humidity ratio	W g/Kg	16.99	16.54	17.58	18.40	18.77	18.43	18.21	18.02	17.96	18.13	18.28	17.51
Specific enthalpy of moist air	h kj/kg	69.94	70.05	73.42	76.31	77.41	76.23	75.24	74.74	74.41	74.43	73.81	71.15
Specific volume	v m3/kg	0.872	0.875	0.878	0.881	0.882	0.881	0.880	0.879	0.879	0.878	0.875	0.872
Area wight	AW kg/m3	0.019	0.019	0.020	0.021	0.021	0.021	0.021	0.020	0.020	0.021	0.021	0.020
vaper pressure	vp Pa	2693.91	2625.15	2785.40	2911.43	2967.77	2915.56	2882.66	2853.03	2844.06	2870.18	2892.26	2774.88

ตารางที่ ก- 8 ผลการเก็บตัวอย่างอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของจังหวัดนราธิวาส

stn_name and stncode	YEAR	MONTH											
		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
583201- Narathiwat	2007	23.6	23.6	24.6	25.2	25	25.1	24.9	24.3	24.4	24.2	24	24
583201- Narathiwat	2008	23.7	23.3	24.2	24.9	24.8	24.6	24.3	24.3	24.3	24.6	24.2	23.6
583201- Narathiwat	2009	23	23.9	24.5	25.2	25	25.2	24.6	24.9	24.6	24.5	24.5	24.1
583201- Narathiwat	2010	24.1	24.4	25.1	25.9	26.1	25.3	24.8	25	24.9	24.9	24.6	23.9
583201- Narathiwat	2011	23.8	23.9	24.3	24.9	25.2	25	25	24.8	24.8	24.8	24.6	24.1
WET BULB avg		23.64	23.82	24.54	25.22	25.22	25.04	24.72	24.66	24.6	24.6	24.38	23.94
583201- Narathiwat	2007	26.25	26.15	27.4	28.3	28.35	28.6	28.3	28.05	27.95	26.95	26.55	26.4
583201- Narathiwat	2008	26.1	26.05	27.05	28	28.45	28.2	27.85	27.65	28.15	27.85	26.35	25.6
583201- Narathiwat	2009	25.2	26.55	27.1	28.6	28.3	28.65	28.15	28.7	28.4	27.6	26.65	26.6
583201- Narathiwat	2010	26.6	27.15	28.1	29.2	29.4	29.1	28.4	28.35	28	27.95	26.7	26.05
583201- Narathiwat	2011	26.2	26.65	26.9	27.8	28.75	28.7	28.35	28.3	28.15	27.55	26.9	26.4
DRY BULB avg		26.07	26.51	27.31	28.38	28.65	28.65	28.21	28.21	28.13	27.58	26.63	26.21
Relative humidity	RH%	81.81	80.14	79.91	77.72	76.06	74.89	75.47	75.07	75.16	78.58	83.29	83.01
Humidity ratio	W g/Kg	17.51	17.61	18.43	19.10	18.98	18.68	18.34	18.24	18.17	18.41	18.45	17.93
Specific enthalpy of moist air	h kj/kg	70.84	71.54	74.46	77.28	77.27	76.50	75.17	74.92	74.67	74.70	73.83	72.04
Specific volume	v m3/kg	0.871	0.873	0.876	0.880	0.881	0.880	0.879	0.878	0.878	0.877	0.874	0.872
Area wight	AW kg/m3	0.021	0.020	0.021	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
vaper pressure	vp Pa	2774.45	2789.42	2915.24	3018.12	3000.50	2954.34	2901.74	2886.65	2876.71	2912.62	2919.70	2838.38

สรุปผล

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี ในช่วงปี พ.ศ. 2550-2554 ของแต่ละจังหวัด สันเกตว่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปีจากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยาของจังหวัดนราธิวาส พบว่าค่าต่ำสุดอยู่ระหว่างเดือน พฤษภาคม-กรกฎาคม และค่าสูงสุดอยู่ระหว่างเดือน ตุลาคม-ธันวาคม

ซึ่งจากผลของตัวอย่างข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเฉลี่ย 5 ปี สำหรับค่าต่ำสุด-สูงสุดของจังหวัดนราธิวาสจะนำช่วงเดือนนี้ไปใช้ในการเก็บตัวอย่างของปริมาณความชื้น (moisture content) ของเศษไม้ที่ความลึกของกองไม้ 2cm 5cm 10cm 15cm และ 20cm เพื่อศึกษาความแปรปรวนของคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเศษไม้ต่อไป

ภาคผนวก ข
การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของกองเศษไม้

ตารางที่ ข- 1 การเปลี่ยนแปลง Moisture Content ของกองเศษไม้ภายใน Solar Greenhouse Drying

วันที่	วันที่	MC% กองไม้เล็ก 2cm	MC% กองไม้เล็ก 5cm	MC% กองไม้เล็ก 10cm	MC% กองไม้เล็ก 15cm	MC% กองไม้เล็ก 20cm
8/05/2556	2	66.68	59.19	59.17	60.37	56.01
15/05/2556	9	51.83	55.21	58.29	58.7	59.38
17/05/2556	11	42.45	55.42	51.6	58.33	58.13
20/05/2556	14	50.79	52.04	53.81	57.65	57.01
21/05/2556	15	49.97	50.32	54.48	56.12	58.84
23/05/2556	17	49.28	51.32	51.98	55.46	57.57
24/05/2556	18	50.06	50.87	49.51	53.76	56.34
27/05/2556	21	47.25	47.97	50.42	51.35	54.16
28/05/2556	22	48.96	50.03	51.27	53.11	54.46
29/05/2556	23	47.85	48.07	50.66	52.73	53.11
30/05/2556	24	47.51	48.17	48.99	51.24	52.38

ตารางที่ ข- 2 การเปลี่ยนแปลง Relative humidity ของกองเศษไม้ภายใน Solar Green Drying

วันที่	วันที่	Relative Humidity %@8.00	Relative Humidity %@10.00	Relative Humidity %@12.00	Relative Humidity %@14.00	Relative Humidity %@16.00	Average Relative Humidity (5 years)
8/05/2556	2	83.1	57.6	49.1	55.1	55.4	76.06
13/05/2556	7	86.9	55	40.2	56.6	62.4	76.06
15/05/2556	9	84.2	60.6	52.8	43.3	62.3	76.06
17/05/2556	11	86.7	72	48.7	67.3	96.9	76.06
20/05/2556	14	80	61.6	45.8	48.5	45.9	76.06
21/05/2556	15	78.1	45	42.4	36	35.6	76.06
23/05/2556	17	83.8	85.1	53.1	76.2	62.3	76.06
24/05/2556	18	66.4	61.8	78.3	78.3	78.3	76.06
27/05/2556	21	53.3	55.5	50.4	44	66.8	76.06
28/05/2556	22	95.1	55.1	52	46.4	62.9	76.06
29/05/2556	23	78.7	58.7	60.4	49.2	63	76.06
30/05/2556	24	97	76.6	40.7	39.8	41	76.06
31/05/2556	25	61.8	69.3	66.9	69.6	74.3	76.06
1/06/2556	26	89.5	56.4	63.7	63.9	66.8	76.06
5/06/2556	30	83.4	51.9	51.6	53	52.6	76.06

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้

วิธีการทดสอบค่าความร้อนของเศษไม้ทำได้โดยเก็บตัวอย่าง Wood Chip (ไม้ยางพารา) ที่ได้จากกระบวนการย่อยไม้ด้วยเครื่อง Wood Chipper ไปทดสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ (Department of science service) ซึ่งพบว่าไม้ยางพาราสดหลังจากการย่อยแล้วของจังหวัดนราธิวาสดังแสดงในตารางที่ ค-1 มีความชื้นประมาณ 48% และมีค่าความร้อน Net Calorific Value 1980 cal/g หรือ 8.2843 MJ/kg ซึ่งยังน้อยมากดังนั้นจึงต้องมีการลดปริมาณความชื้นของเศษไม้เพื่อให้ได้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอีกตามความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นของไม้กับค่า Heating value ซึ่งวิธีการลดปริมาณความชื้นได้นำเสนอในบทที่ 6

ตารางที่ ค- 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนของเชื้อเพลิงเศษไม้ Ultimate Analysis

กรมวิทยาศาสตร์บริการ DEPARTMENT OF SCIENCE SERVICE

แบบวศ. 7

Sample's name
WOOD CHIP

Ref: 26-Dec-11

Laboratory No.
L54/10205.1

NO.	Elements	As received basis	Air - dry basis	Dry basis
1	Moisture, %	48.8 %	10.4 %	- %
2	Ash, %	1.9 %	3.4 %	3.8 %
3	Volatile matter, %	39.5 %	69.2 %	19 %
4	Fixed Carbon, %	9.8 %	17 %	77.2 %
5	Carbon(C), %	26.6 %	46.5 %	51.9 %
6	Hydrogen(H), %	8.3 %	6.2 %	5.6 %
7	Nitrogen(N), %	0.14 %	0.24 %	0.27 %
8	Sulfur(S), %	0.02 %	0.03 %	0.03 %
9	Oxygen(O), %	63 %	43.6 %	38.4 %
10	Gross Calorific Value, cal/g	2414 cal/g	4224 cal/g	4714 cal/g
11	Net Calorific Value, cal/g	1980 cal/g	3902 cal/g	4423 cal/g

Total percentage	99.96 %	99.97 %	100 %
------------------	---------	---------	-------

EQUATION OF COMPOSITION IN BIOMASS
The woodchip have moistured compound

$C+H+N+S+O+Cl+Ash=100\%$

dry basis

$C+H+N+O+Ash+S+MC=100\%$

ภาคผนวก ง
การคำนวณ Adiabatic Flame Temperature

Calculation the adiabatic flame temperature of syngas

Syngas is a mixture of CH₄, O₂, N₂, CO₂, H₂, CO with the mole proportion From Sample MgO-2 as follow:

Fuel mixture

CH ₄	0.019414	moles
O ₂	0.04803	moles
N ₂	0.517065	moles
CO ₂	0.078028	moles
H ₂	0.143256	moles
CO	0.194207	moles
Total	1	moles

This mixture will be burned with 30% excess air. The initial temperature is 25 degree Celsius

Notation

- T = Theoretical Temperature (°F)
C_p = Constant pressure heat capacity (Btu/mole °F)
Y_i = Feed vapor phase mole fraction
LHV = Heat of combustion, Lower Heating Value (Btu/mole)
m = # of carbon atoms in molecule
n = # of hydrogen atoms in molecule

Outline of Solution

1. Balance Combustion Equations
2. Mass balance to get moles each component in and out
3. Develop mean heat capacity, C_p, as a function of temperature using average value of a polynomial function
4. Find the temperature of the combustion process where

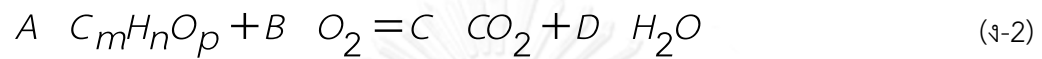
$$\Delta T = T - 90^\circ F = LHV \sum_i Y_i C_p \quad (3-1)$$

5. Solve iteratively for temperature

Use 1 mole of fuel mixture as basis

Balance Equation

Generally for the equation



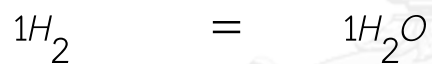
$$A = 1$$

$$B = (4m + n - 2p) / 4 \quad (3-3)$$

$$C = m$$

$$D = n / 2$$

With syngas the oxidation reaction are:



	m	n	p
CH ₄	1	4	0
CO	1	0	1
H ₂	0	2	0

Material balance

With 30% Excess air and 1 mole basis

IN

CH₄: 0.019414 moles

H₂: 0.143256 moles

CO:	0.194207 moles	
O ₂ :	0.269827 moles	(1.3*(2*CH ₄ +0.5*CO+0.5*H ₂) 30% about Stoichiometric for CH ₄ , CO and H ₂
N ₂ :	1.532127 moles	(N ₂ +(0.79/0.21)*O ₂) Fuel-mixture nitrogen plus nitrogen from combustion air

OUT

CO ₂ :	0.213621 moles	(1*CH ₄ +1*CO)
H ₂ O:	0.182084 moles	(2*CH ₄ +1*H ₂)
O ₂ :	0.062268 moles	0.3*(2*CH ₄ +0.5*CO+0.5*H ₂) 30% remaining
N ₂ :	1.532127 moles	inert component in=out
Combustion air=	461.275	(359std ft ³ /lb moles)(moles O ₂ + Std ft ³ /mole fuel moles N ₂)

Heat Capacity

Heat capacity Data From Smith and Van Ness, Introduction to Chemical Engineering Thermodynamic, 3th ed P106-107 Polysomic

Fuel Components

$$C_p = \alpha + \beta.T + \gamma.T^2 \quad (3-5)$$

Inorganic

$$C_p = \alpha + \beta.T + \gamma.T^{-2} \quad (3-6)$$

Find the average heat capacity over temperature range by using the average value of a function in Calculus

Fuel

$$C_{p,mean} = \frac{1}{T_{out} - T_{in}} \left(\alpha \cdot T + \frac{\beta}{2} \cdot T^2 + \frac{\gamma}{3} \cdot T^3 \right) \Bigg|_{T_{in}}^{T_{out}} \quad (จ-7)$$

Inorganics

$$C_{p,mean} = \frac{1}{T_{out} - T_{in}} \left(\alpha \cdot T + \frac{\beta}{2} \cdot T^2 + \frac{\gamma}{3} \cdot T^3 \right) \Bigg|_{T_{in}}^{T_{out}} \quad (จ-8)$$

ตารางที่ จ- 1 แสดงคุณสมบัติของเชื้อเพลิง GAS

		Heat Capacity Coefficients			Molecular Wt.	
		α	β	γ	(lb/lb _{mole})	(BTU/lb.)
Methane	CH ₄	3.381	1.804E-02	-4.300E-06	16.041	21520
Ethane	C ₂ H ₆	2.247	3.820E-02	-1.105E-05	30.067	20432
Propane	C ₃ H ₈	2.410	5.720E-02	-1.753E-05	44.042	19944
Ethylene	C ₂ H ₄	2.830	2.860E-02	-8.726E-06	28.051	20295
Propylene	C ₃ H ₆	3.253	4.512E-02	-1.374E-05	42.077	19691
Ethanol	C ₂ H ₆ O	6.990	3.974E-02	-1.193E-05	46.067	11929
Oxygen	O ₂	7.160	1.000E-03	-4.00E+04	32	0
Water	H ₂ O	7.300	2.460E-03	0	18.016	0
Carbon Dioxide	CO ₂	10.570	2.100E-03	-2.06E+05	44.01	0
Nitrogen	N ₂	6.830	9.000E-04	-1.20E+04	28.016	0

สรุปได้ดังต่อไปนี้

$T_{in} = 78^{\circ}\text{F}$

$T_{guess} = 2684^{\circ}\text{F}$

$T_{in} = 298.7056^{\circ}\text{K}$

$T_{guess} = 1746.483^{\circ}\text{F}$

ตารางที่ ๑- 2 การคำนวณค่าความร้อน(heating value)จากส่วนประกอบของ syngas

	Mass In (moles)	Mass out (moles)	α	β	γ	Heat Capacity Coefficients			Integral of Cp at 78°F	Integral of Cp at 2684°F	Cp,mean	LHV (BTU/mole)
CH4	0.01941	0	3.381	1.804E-02	-4.300E-06		1.78E+03	2.58E+04	1.66E+01	345202.32		
CO	0.19421	0	6.79	9.80E-04	-1.10E+04		2.11E+03	1.34E+04	7.77E+00	121744		
H2	0.14326	0	6.52	7.80E-04	1.20E+04		1.94E+03	1.26E+04	7.34E+00	104000		
N2	1.53213	1.53213	6.830	9.000E-04	-1.20E+04		2.12E+03	1.33E+04	7.73E+00	0		
O2	0.26983	0.06227	7.160	1.000E-03	-4.00E+04		2.32E+03	1.41E+04	8.11E+00	0		
CO2	0	0.21362	10.570	2.100E-03	-2.06E+05		3.94E+03	2.18E+04	1.23E+01	0		
H2O	0	0.18208	7.300	2.460E-03	0		2.29E+03	1.65E+04	9.82E+00	0		
									Total LHV=	43696.1812		

Calculate the flame temperature

$$T = T_{in} + LHV / \sum Y_i C_p \quad (\text{จ-9})$$

$$T_{\text{calc}} = 2684.61^\circ\text{F}$$

$$T_{\text{calc}} = 1746.82^\circ\text{K}$$

$$T_{\text{calc}} = 1473.68^\circ\text{C}$$

Note:

$$T_{\text{calc}} - T_{\text{guess}} = 0.61047 \quad \text{alter guess unit } T_{\text{guess}} = T_{\text{calc}} \text{ (or } T_{\text{guess}} - T_{\text{calc}} = 0)$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก จ

ผลการคำนวณมือของแบบจำลองวัฏจักรแรงคินอย่างง่าย

ในภาคผนวก จ นี้จะนำเสนอตัวอย่างการคำนวณมือของวัฏจักรแรงคินอย่างง่ายจากนั้นจะนำเงื่อนไขของการออกแบบโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำและวิธีการคำนวณนี้นำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำที่กำลังการผลิตไฟฟ้าค่าที่

จ.1 แสดงข้อมูลทางเทคนิคสำหรับการกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองของระบบโรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำ ที่มาจาก บริษัท PRIZE OF WOOD COMPANY

ตารางที่ จ- 1 ข้อมูลส่วนประกอบของระบบผลิตกระแสไฟฟ้า

NO	Description	Data A	Unit	Data B	Unit
1	Boiler Rate Capacity	33.23	t/hr	9.23	kg/s
2	Boiler rate work pressure absolute	59	kgf/cm ²	5.79	MPa
3	Feed water temperature	105	°C	378	°K
4	Feed water pressure absolute	66	kgf/cm ²	6.47	MPa
5	Outlet steam temperature	450	°C	723	°K
6	Outlet steam pressure absolute	54	kgf/cm ²	5.29	MPa
7	Natural air temperature	20	°C	293	°K
8	Blower down rate	2	%	-	-

จากนั้นทำการคำนวณโดยใช้วัฏจักรแรงคินอย่างง่ายซึ่งอุปกรณ์ประกอบด้วย Boiler Turbine Condenser และ Pump

วิธีการวิเคราะห์โดยสร้างแบบคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรแรงคิน เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวัฏจักร สมมุติที่โรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้าที่ 9.5 MW ซึ่งแบ่งเป็นใช้กับอุปกรณ์ต่างในโรงงาน 2 MW และส่งขาย 7.5 MW คอนเดนเซอร์ควบแน่นเป็นของเหลวอิมตัวที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส อัตราการผลิตไอน้ำของบอยเลอร์ที่ต้องการเพื่อขับเทอร์ไบน์ 33.23 ตัน/ชม. ที่ความดันไอน้ำของบอยเลอร์สมมุติที่เฉลี่ยประมาณ 50 บาร์

วิธีการคำนวณมือ

Common Assumptions:

- 1) Boiler and Condenser are constant pressure devices ($P_4=P_1$ & $P_3=P_2$)
- 2) Saturated liquid at condenser outlet (state 1) & incompressible
- 3) Steady operating conditions
- 4) $\Delta ke, \Delta pe = 0$
- 5) For Ideal Rankine Cycle: Isentropic compression ($s_2=s_1$) & expansion ($s_4=s_3$)
- 6) The pump is a constant temperature process

Analysis:

$$\text{Boiler} \rightarrow q_{in} = h_3 - h_2$$

$$\text{Turbine} \rightarrow W_{out} = h_3 - h_4$$

$$\text{Condenser} \rightarrow q_{out} = h_4 - h_1$$

$$\text{Pump} \rightarrow W_{in} = h_2 - h_1$$

By using the definition of enthalpy, $h = u + Pv$ we get by differentiation:

$$dh = du + Pdv + v dP$$

Since the fluid in the pump is incompressible, $dv = 0$ and the previous equation becomes

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta P$$

$$\Delta h = C_{v,avg} (\Delta T) + v \Delta P$$

With the pump being a constant temperature process, $\Delta T = 0$, and W_{in} can be expressed as:

$$W_{in} = v(P_2 - P_1)$$

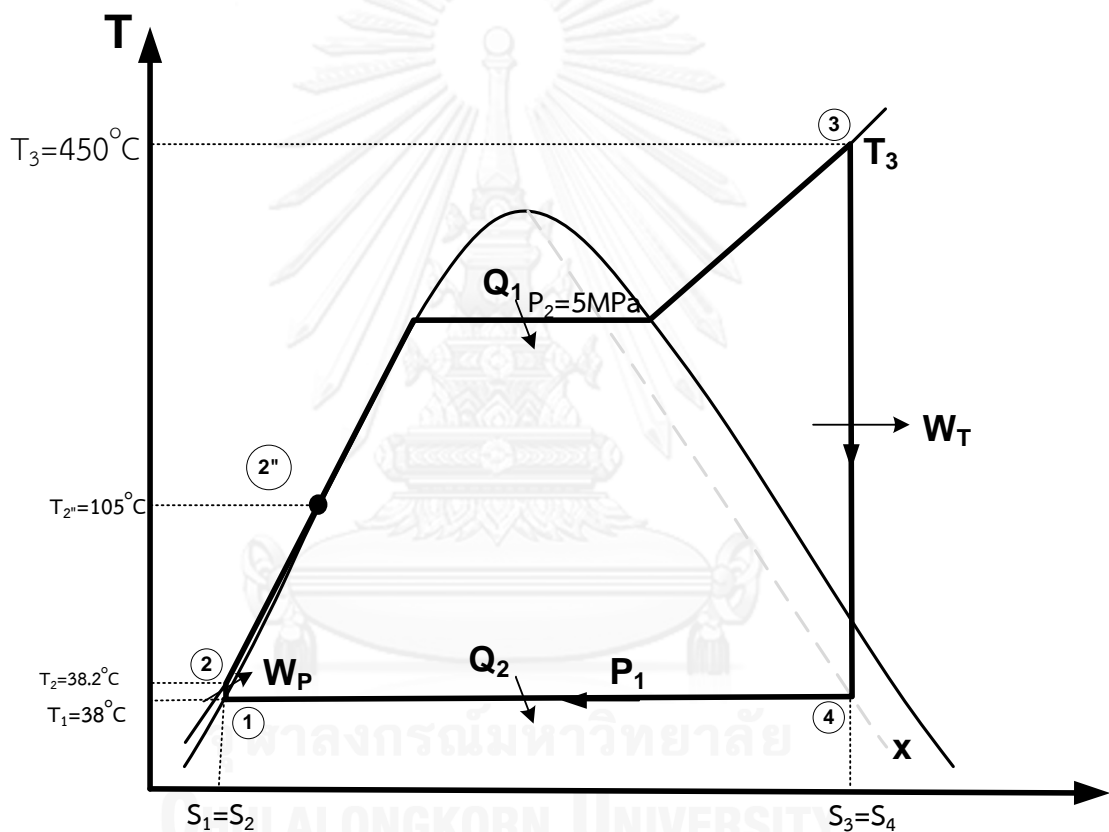
Thermal Efficiency η_{th}

$$\eta_{th} = \frac{W_{net,out}}{q_{in}}$$

The transmission has an efficiency of 89% and the electric generator has an efficiency of 95.5%

วิธีการคำนวณ

- อัตราการผลิตไอน้ำมีค่าคงที่เท่ากับ 9.23 kg/s;
- โรงไฟฟ้าพลังงานไอน้ำผลิตกระแสไฟฟ้าที่ 9.5 MW :ซึ่งแบ่งเป็นใช้กับอุปกรณ์ต่างในโรงงาน 2 MW และส่งขาย 7.5 MW
- ความดันที่เข้าเทอร์ไบน์ 50 bar อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส
- คอนเดนเซอร์ควบแน่นเป็นของเหลวอิมิตัวที่อุณหภูมิ 38°C



ภาพที่ จ- 1 T-s ไดอะแกรมของวัฏจักรแรงคินอย่างง่าย

Condition at 1 (liquid : Saturated steam temperature table)

Temperature $T_1 = 38^\circ\text{C}$

$$P_1 @ 38^\circ\text{C} = 5.628 + \left(\frac{38 - 35}{40 - 35} \right) (7.364 - 5.628) = 6.6696 \text{ kPa}$$

$$V_1 @ 38^\circ C = 0.0010067 + \left(\frac{38-35}{40-35} \right) (0.001008 - 0.0010067) = 1.00748 \times 10^{-3} \frac{m^3}{kg}$$

$$h_1 @ 38^\circ C = 146.68 + \left(\frac{38-35}{40-35} \right) (167.57 - 146.68) = 159.214 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 @ 38^\circ C = 0.5053 + \left(\frac{38-35}{40-35} \right) (0.5725 - 0.5053) = 0.54562 \frac{kJ}{kg^\circ K}$$

Condition at 2 liquid

$$P_2 = 5 \text{ MPa} \quad \text{or } 5,000 \text{ kPa}$$

$$s_2 = s_1 = 0.54562 \frac{kJ}{kg^\circ K}$$

$$W_{pump,in} = V_1 (P_2 - P_1) = 1.00748 \times 10^{-3} \frac{m^3}{kg} (5,000 - 6.6696) \frac{kN}{m^2} = 5.031 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = h_1 + W_{pump,in} = 159.214 + 5.031 = 164.245 \frac{kJ}{kg}$$

Condition at 3 Super heat (Superheated Steam table)

$$P_3 = 5 \text{ MPa}$$

$$T_3 = 450^\circ C$$

$$h_3 = 3,316.2 \frac{kJ}{kg}$$

$$s_3 = 6.8186 \frac{kJ}{kg^\circ K}$$

Condition at 4 (Saturated Steam pressure Table)

$$P_4 = P_1 = 6.6696 \text{ kPa} \quad \text{and} \quad T_4 = 38^\circ C$$

$$s_4 = s_3 = 6.8186 \frac{kJ}{kg^\circ K} \quad s_f @ 38^\circ C = s_1 = 0.54562 \frac{kJ}{kg^\circ K}$$

$$s_{fg} @ 38^\circ C = 7.8478 + \left(\frac{38-35}{40-35} \right) (7.6845 - 7.8478) = 7.74982 \frac{kJ}{kg^\circ K}$$

$$X_4 = \frac{s_4 - s_{f@38^{\circ}C}}{s_{fg@38^{\circ}C}} = \frac{6.8186 - 0.54562}{7.74982} = 0.8094$$

$$h_f = h_1 = 159.214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{fg@38^{\circ}C} = 2418.6 + \left(\frac{38 - 35}{40 - 35} \right) (2406.7 - 2418.6) = 2411.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

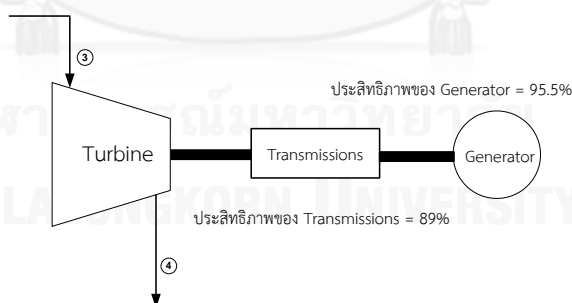
$$h_4 = h_f + X h_{fg} = 159.214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.8094 (2411.46) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2111.05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_1 = \dot{m}(h_3 - h_2) = 9.23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (3316.2 - 164.245) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 29092.54 \text{ kW}$$

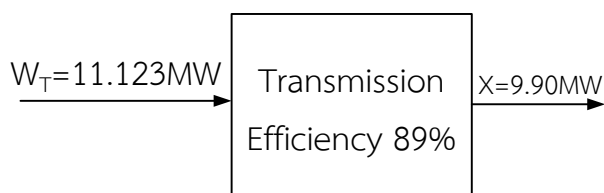
$$W_T = \dot{m}(h_3 - h_4) = 9.23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (3316.2 - 2111.05) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 11123.53 \text{ kW}$$

พบว่าอัตราการผลิตไอน้ำที่ต้องการขับเคลื่อน 33.23 ตันชม. หรือ 9.23 kg/s ที่ความดันไอน้ำของบอยเลอร์ 50 บาร์ ได้งานที่ผลิตได้จากเทอร์ไบน์ 11.123 MW

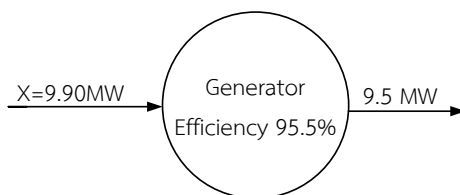
กำหนดให้ประสิทธิภาพของ transmission เท่ากับ 89% และประสิทธิภาพของ Generator เท่ากับ 95.5% ดังต่อไปนี้



เมื่อ $X = W_T * \text{ประสิทธิภาพ Transmission } 89\%$



$$\eta_G = X * \text{ประสิทธิภาพ Generator } 95.5\%$$



กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 9.5 MW :ซึ่งแบ่งเป็นใช้กับอุปกรณ์ต่างในโรงงาน 2 MW และส่งขาย 7.5 MW

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ The thermal efficiency of system

$$\eta_{th} = \frac{7500 \text{ kw}}{29092.54 \text{ kw}} \times 100 = 25.78\%$$

The rational efficiency of the work – producing steam circuit (turbine, condenser, and pump)

$$\eta_R = \frac{[W_{net}]_{actual}}{\hat{W}_{net}}$$

When

$$\hat{W}_{net} = (h_3 - h_2) - T_o (S_3 - S_2)$$

$$\hat{W}_{net} = (3316.2 - 164.245) - 311.15(6.8186 - 0.54562) = 1200.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Then

$$\hat{W}_{net} = 1200.12 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 9.23 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 11077.11 \text{ kw}$$

Therefore

$$\eta_R = \frac{7500 \text{ kw}}{11077.11 \text{ kw}} \times 100 = 67.71\%$$

จากการคำนวณมือพบว่าที่ Boiler Rate Capacity 33.2 t/hr หรือ 9.23 kg/s สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่กำลังการผลิต 7.5 MWe ภายใต้ประสิทธิภาพของ steam circuit 67.71% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ 25.78%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเมธวัฒน์ สงพัฒน์แก้ว เกิดเมื่อวันที่ 11 เดือน พฤษภาคม พุทธศักราช 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2551 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY