

การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับ
เครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง



นายกฤษกร รับสมบัติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2555

**COMBUSTION EFFICIENCY IMPROVEMENT OF
EUCALYPTUS BARK FUEL USED IN BOILER BY
DENSIFICATION PROCESS**



Kisakon Rubsombut

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Agricultural and Food Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การเพิ่มประสิทธิภาพเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับ
เครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. วีระศักดิ์ เลิศสิริ โยธิน)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร. วีรชัย อางหาญ)

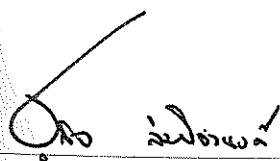
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. สามารถ บุญอาจ)

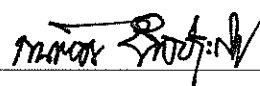
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร. ชุกิจ ลิ้มปานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กฤษกร รับสมบัติ : การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (COMBUSTION
EFFICIENCY IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS BARK FUEL USED IN BOILER
BY DENSIFICATION PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย
อาจหาญ, 103 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดท่อน้ำ ขนาดกำลังการผลิต $500 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{hr}$ ด้วยวิธีเพิ่มสมบัติความ
หนาแน่นของเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลังงานเชื้อเพลิง ใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่
ระดับความหนาแน่น 100, 200, 400 และ $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ในการทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยน
พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ ได้แก่ 6, 8, 10 และ 12 bar ผลการ
ทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ มีประสิทธิภาพการ
เปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำได้ 26.76, 24.00, 21.59 และ 18.13% ตามลำดับ
เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน
ความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำได้ 28.02, 25.58, 24.03 และ 22.33% ตามลำดับ เชื้อเพลิงเปลือกไม้
ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจาก
เชื้อเพลิงเป็นไอน้ำได้ 29.51, 27.47, 26.96 และ 27.30% ตามลำดับ และเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคา
ลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง
เป็นไอน้ำได้ 33.77, 34.25, 35.04 และ 40.82% ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่ระดับความ
หนาแน่นของเชื้อเพลิงต่ำประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผกผันกับระดับแรงดันไอน้ำ ที่ระดับ
ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงปานกลางประสิทธิภาพเชิงความร้อนคงที่เมื่อแรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้น และ
ที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิงสูงประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตามระดับแรงดันไอน้ำ
เนื่องจากค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงจะส่งผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบ,
ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และระยะเวลาการนำแก๊สออกจากห้องเผาไหม้

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา กฤษกร รับสมบัติ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Amr.

KISAKON RUBSOMBUT : COMBUSTION EFFICIENCY

IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS BARK FUEL USED IN BOILER BY
DENSIFICATION PROCESS. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 103 PP.

EUCALYPTUS BARK/BOILER/DENSIFICATION PROCESS

This research aimed to study the efficiency of fuel combustion, bark Eucalyptus steam generator tubes for water. Capacity 500 kg_{vapor}/hr by increase the density fuel. Fuel bark Eucalyptus at densities of 100, 200, 400 and 600 kg/m³ in the energy conversion efficiency of fuel to heat the water vapor pressure at 4 levels including 6, 8, 10 and 12 bar test results showed that fuel Eucalyptus bark at a density of 100 kg/m³ thermal energy conversion efficiency of fuel to steam at 26.76, 24.00, 21.59 and 18.13%, respectively. At a density of 200 kg/m³ thermal energy conversion efficiency of fuel to steam at 28.02, 25.58, 24.03 and 22.33%, respectively. Eucalyptus density 400 kg/m³ energy conversion efficiency of fuel to heat steam 29.51, 27.47, 26.96 and 27.30%, respectively, and fuel wood bark Eucalyptus level effective density 600 kg/m³, the thermal energy of the fuel into steam 33.77, 34.25, 35.04 and 40.82%, respectively, of the study showed that the density of the fuel level low thermal efficiency inversely proportional to the vapor pressure. The average density of the fuel thermal efficiency constant steam pressure increases. And the density of the fuel thermal efficiency varies with steam pressure. Because the energy density of the fuel will affect the rate of fuel, the combustion of fuel in the combustion chamber and duration of the ash from the combustion chamber.

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature Kisakon

Advisor's Signature W. Arjarn

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อางหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการช่วยแก้ไขปัญหาตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริ โยธิน และอาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบก้นกรองวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

บุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านและบุคคลเคียงข้างผู้วิจัยที่สนับสนุนการทำวิจัยและให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณกรรมิกา ประเสริฐสังข์ ผู้ให้คำแนะนำปรึกษาการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์และให้กำลังใจ

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้การเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

กฤษกร รัชสมบัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส.....	5
2.1.1 สถานภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทย	5
2.1.2 เทคโนโลยีการผลิตไม้สับ	6
2.1.3 ศักยภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	7
2.1.4 สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส.....	8
2.1.5 สถานภาพการใช้ประโยชน์เปลือกไม้ยูคาลิปตัส.....	11
2.2 เทคโนโลยีการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	20
2.3 การผลิตพลังงานจากชีวมวล	26
2.3.1 กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี	27
2.4	กระบวนการเผาโดยตรง	27
2.5	เทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไอน้ำ	30
2.6	ห้องเผาไหม้แบบต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ.....	32
2.7	การประเมินประสิทธิภาพการผลิตความร้อนและไอน้ำ	35
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1	ขั้นตอนและวิธีดำเนินการศึกษา.....	39
3.2	การพัฒนาระบบต้นแบบการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	41
3.3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	44
3.3.1	ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	45
3.3.2	ศึกษาการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิง เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	46
3.3.3	ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในเครื่องกำเนิดไอน้ำ ...	46
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล	52
4.1	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	52
4.1.1	คุณสมบัติทางกายภาพ (ขนาด ความหนาแน่น และความชื้น).....	52
4.1.2	คุณสมบัติทางเคมี.....	53
4.2	ผลการศึกษาการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือก ไม้ยูคาลิปตัส.....	55
4.2.1	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย.....	56
4.2.2	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด.....	56
4.3	ผลการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ.....	59
4.3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือก ไม้ยูคาลิปตัส	59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2	ศึกษาความสัมพันธ์ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส กับความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	61
4.3.3	การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน	62
4.4	สรุปผลการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน	70
4.5	การเปรียบเทียบด้านพลังงานที่ได้จากการทดสอบการประเมิน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ	72
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
5.1	คุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	75
5.2	การแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	76
5.3	ผลการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ	77
5.4	ข้อเสนอแนะและวิธีการดำเนินงานวิจัยต่อไป	77
รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ	80
ภาคผนวก ข.	ตัวอย่างการคำนวณ	88
ภาคผนวก ง.	บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	93
ประวัติผู้เขียน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ศักยภาพเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในการผลิตไฟฟ้าของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ8
2.2	สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 8
2.3	องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 9
2.4	องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 9
2.5	พฤติกรรมของเถา สำหรับ Initial Deformation Temperature (I.D.T.) 13
2.6	การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด 21
3.1	ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อย (Biomass Chipper) 41
3.2	ข้อมูล/ข้อกำหนดการออกแบบทางวิศวกรรมของเครื่องอบแห้ง 42
3.3	ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อยแบบละเอียด (Hammer mill) 43
3.4	ข้อมูล/ ข้อกำหนดของเครื่องอัดเม็ด 44
3.5	รายละเอียดการจัดเก็บข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไอน้ำ 47
3.6	รายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน 49
4.1	สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 53
4.2	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 54
4.3	ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 55
4.4	กระบวนการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 57
4.5	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดสอบ 58
4.6	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้นต่างๆ 59
4.7	แสดงค่า Energy Density ที่ค่าความหนาแน่นและค่าความชื้นต่างๆ ของ เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่นำมาทำการทดสอบ 61
4.8	การจัดการตัวแปรและวิธีการหาข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไอน้ำ 62
4.9	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิง เปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 100 kg/m^3 64
4.10	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือก ไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 200 kg/m^3 65

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 400 kg/m ³67
4.12	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 600 kg/m ³69
4.13	ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m ³71
4.14	ปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตไอน้ำที่ความดันต่างๆของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m ³73
4.15	ปริมาณพลังงานที่ลดลงในการผลิตไอน้ำที่ความดันต่างๆของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 200, 400 และ 600 kg/m ³ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100 kg/m ³74

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ปริมาณอัตราส่วนการใช้ไม้ยูคาลิปตัส ในประเทศไทย	5
2.2	ปริมาณอัตราส่วนการใช้ไม้ยูคาลิปตัส ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	6
2.3	กระบวนการผลิตไม้ยูคาลิปตัสสับ	7
2.4	อุณหภูมิในการศึกษาพฤติกรรมของเตา (Critical Temperature Point)	13
2.5	ตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบโรตารีขนาด 150 kg/h	21
2.6	เครื่อง Hammer Mill	22
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความหนาแน่น	23
2.8	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ	25
2.9	ลักษณะของเครื่องแท่งชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน	25
2.10	ระบบการเผาไหม้แบบตะกรับเคลื่อน	28
2.11	ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	29
2.12	ระบบการเผาไหม้แบบลอยตัว	30
2.13	หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire-tube boiler)	31
2.14	หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water-tube boiler)	32
2.15	ห้องเผาไหม้แบบตะกรับเอียง	33
2.16	ห้องเผาไหม้แบบตะกรับเคลื่อนที่	33
2.17	ห้องเผาไหม้แบบ Spreader stoker	33
2.18	ห้องเผาไหม้แบบชั้นบันได	34
2.19	ห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด	34
2.20	ห้องเผาไหม้แบบตะกรับสั้น	35
3.1	การศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	40
3.2	การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับ เครื่อง กำเนิดไอน้ำขนาด 500 kg/ชั่วโมง	40
3.3	เครื่องหั่นย่อยวัสดุชีวมวล (Biomass Chipper)	41
3.4	เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Flash Dryer)	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	เครื่องบดละเอียด (Hammer mill) 43
3.6	เครื่องอัดเม็ด (Pellet mill) 44
3.7	ระบบเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 45
3.8	เครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 500 kg ไอน้ำ/hr 45
3.9	เครื่องตรวจวัดความชื้น และเครื่อง Bomb Calorimeter 46
3.10	ระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำ 48
3.11	ต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ 49
3.12	ระบบผลิตพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ 50
3.13	ระบบการผลิตและใช้ไอน้ำ 51
4.1	ลักษณะของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 53
4.2	กระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 56
4.3	เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 56
4.4	เครื่องอัดเม็ด (Pellet Mill) 57
4.5	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย และแบบอัดเม็ด 58
4.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 60
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานและค่าหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ค่าความชื้นต่างๆ ที่นำมาทำการทดสอบ 62
4.8	การทับถมกันของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ 63
4.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 100 kg/m ³ 64
4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 200 kg/m ³ 66
4.11	การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ 67
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 400 kg/m ³ 68
4.13	การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ 69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 600 kg/m ³	70
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่าง ๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m ³	71
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังที่ใช้ในการผลิตไอน้ำที่แรงดันต่าง ๆ เมื่อใช้ เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m ³	73
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ลดลงในการผลิตไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 200, 400 และ 600 kg/m ³ เมื่อ เปรียบเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ ความหนาแน่น 100 kg/m ³	74



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BD	=	Bulk Density (ค่าความหนาแน่น)
ED	=	Energy Density (ค่าความหนาแน่นพลังงาน)
ktoe	=	พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ
HHV	=	High Heating Value (ค่าความร้อนสูง)
LHV	=	Low Heating Value (ค่าความร้อนต่ำ)
I.D.T.	=	Initial Deformation Temperature
S.T.	=	Spherical Temperature
H.T.	=	Hemispherical Temperature
F.T.	=	Flow Temperature
S.P.	=	Silica Percentage
Rf	=	Fouling Index
η_{th}	=	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
Q_f	=	ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ (kJ)
Q_{out}	=	ปริมาณความร้อนที่ออกจากระบบ (kJ)
m_{H_2O}	=	มวลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง (kg/hr)
$C_{p_{H_2O}}$	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg. ^o C)
η_{Boiler}	=	Boiler Efficiency %
\dot{m}_{Water}	=	อัตราการผลิตไอน้ำ
\dot{m}_{fuel}	=	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง
h_{water}	=	เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน
h_{Steam}	=	เอนทาลปีของไอน้ำ
w.b	=	Wet basis (มาตรฐานเปียก)
w.b	=	Wet basis (มาตรฐานเปียก)
w.b	=	Wet basis (มาตรฐานเปียก)
d.b.	=	Dry basis (มาตรฐานแห้ง)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานจัดว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการดำรงอยู่ของโลก ทั้งในระบบนิเวศวิทยาของสิ่งมีชีวิตทั้งสิ้น และในระบบที่มนุษย์สร้างขึ้น โดยดวงอาทิตย์เป็นต้นกำเนิดของพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นการสังเคราะห์แสงหรือการให้พลังงานความร้อนโดยตรงกับมนุษย์หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ซึ่งวิวัฒนาการด้านพลังงานมีอย่างต่อเนื่องมาตลอดเวลาหลายร้อยปี และจากผลการวิจัยคิดค้นและประดิษฐ์กรรมมากมายทำให้เรามีพลังงานใช้จากแหล่งกำเนิดต่างๆหลายรูปแบบ หนึ่งในแหล่งพลังงานที่สำคัญคือ แหล่งพลังงานใต้พิภพ ซึ่งได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติและผลิตภัณฑ์จากเชื้อเพลิงต้นกำเนิดเหล่านี้ โดยการนำเชื้อเพลิงจากแหล่งกำเนิดดังกล่าวมาใช้งานทำให้เกิดการปลดปล่อย CO₂ และก๊าซเรือนกระจก และจากการหมักสลายของเชื้อเพลิงจากแหล่งกำเนิดดังกล่าวซึ่งสวนทางกับความต้องการเชื้อเพลิงที่มากขึ้นตลอดเวลาทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้มีราคาที่สูงขึ้น จึงทำให้ในปัจจุบันการเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม เป็นที่สนใจและได้รับการยอมรับจากหลายประเทศทั่วโลกเนื่องจากเป็นพลังงานหมุนเวียนและช่วยลดการปลดปล่อย CO₂ และก๊าซเรือนกระจกจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม รวมถึงประเทศไทย ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ประเทศไทยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น แกลบ กะลาปาล์ม ชานอ้อย ฯลฯ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต ที่เกิดขึ้นในโรงงานเนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน เรียกเชื้อเพลิงชีวมวลกลุ่มนี้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (commercialized biomass) แต่เนื่องจากความต้องการใช้เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าวมีราคาที่สูงมากขึ้นและเกิดการขาดแคลน

อย่างไรก็ตามยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่น ๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ อันเนื่องมาจากเศษวัสดุดังกล่าวยังอยู่ในสภาพที่ไม่พร้อมใช้งาน เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม ทะลายปาล์ม และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เนื่องมาจากวัสดุดังกล่าวมีสมบัติทางกายภาพที่ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานเช่น ความสม่ำเสมอของขนาด ความชื้นสูง และค่า energy density ต่ำ เป็นต้น เรียกเชื้อเพลิงชีวมวลกลุ่มนี้ว่าเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (non-commercialized biomass) จากข้อมูลพบว่าในประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั่วประเทศทั้งสิ้น

ประมาณ 10 ล้านไร่ซึ่งมีกำลังการผลิตไผ่ยูคาลิปตัส 25 ล้านตัน/ปี โดยมีผลผลิตแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ไผ่ท่อน 21.5 ล้านตัน/ปี และปลายไผ่ 3.5 ล้านตัน/ปี หากพิจารณาเฉพาะไผ่ท่อน พบว่ามีสัดส่วนเปลือกไผ่ยูคาลิปตัสคิดเป็นร้อยละ 20 ต่อผลผลิตไผ่ท่อน ดังนั้นเปลือกไผ่ยูคาลิปตัสเกิดขึ้นจากกระบวนการทำไม้สับ มีผลผลิตประมาณ 4.3 ล้านตัน/ปี มีค่าความร้อนประมาณ 18 MJ/kg ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเปลือกไผ่ยูคาลิปตัส มีปริมาณเพียง 0.5 ล้านตัน ซึ่งยังคงเหลือเปลือกไผ่ยูคาลิปตัสอีกประมาณ 3.8 ล้านตัน ที่ยังไม่มีนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากเปลือกไผ่ยูคาลิปตัสมีสมบัติทางกายภาพที่ยังไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น ความชื้นสูง และ ค่า energy density ต่ำ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไผ่ยูคาลิปตัสเพื่อเพิ่มศักยภาพในการนำเชื้อเพลิงเปลือกไผ่ยูคาลิปตัสมาใช้ประโยชน์

ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยคือ เทคโนโลยีการเผาตรงโดยใช้ร่วมกับหม้อไอน้ำ และหนึ่งเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรงคือการเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะกรับซึ่งมีข้อดีคือสามารถใช้กับเชื้อเพลิง ได้หลายชนิดทั้งถ่านหินศักดิ์ต่างๆ เชื้อเพลิงชีวมวล และของเหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรม การควบคุมเตาทำได้ง่าย สามารถปิดเตา และเร่งเตาขึ้นใช้ได้ทันที แต่ก็มีข้อด้อย คือ มีส่วนประกอบที่ต้องเคลื่อนที่ขนาดใหญ่และต้องรับความร้อนตลอดเวลา ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา และ อัตราการปล่อยความร้อนต่อปริมาตรต่ำกว่าเตาเผาแบบอื่น และมีการสูญเสียความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดเนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กที่ยังไม่เกิดการเผาไหม้ จะตกลงครุฑะแกรงลงปะปนไปกับขี้เถ้า และเชื้อเพลิงที่มีน้ำหนักเบาถูกพัดพาไปกับไอเสียอีกด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องแปรรูปเชื้อเพลิงให้มีขนาด น้ำหนักที่เหมาะสมกับการใช้งาน และ energy density ที่สูงขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการปล่อยความร้อนต่อปริมาตร ซึ่งสามารถเพิ่มสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงเปลือกไผ่ยูคาลิปตัส การจัดการกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิง เช่น การอบแห้ง การสับย่อย และการอัดเม็ด เพื่อหาสภาพที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน รวมไปถึงการศึกษาเพิ่มสมรรถนะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตไอน้ำ โดยจะแสดงรายละเอียดในลำดับต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเปลือกไผ่ยูคาลิปตัส ขนาด ความชื้น และ Energy density
- 1.2.2 ศึกษากระบวนการเตรียมเชื้อเพลิง พลังงานที่ใช้ในกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิง ได้แก่ กระบวนสับย่อย กระบวนอบแห้ง และกระบวนการอัดเม็ด

1.2.3 การศึกษาเพิ่มสมรรถนะของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ ยูคาลิปตัส อัลดเม็ค

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การแปรรูปเชื้อเพลิงสามารถเพิ่มคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงให้สูงขึ้น

1.3.1 การใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันแต่ความหนาแน่นพลังงานต่างกันทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่างกัน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ทดสอบ ได้แก่ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่ทำได้ในเขตจังหวัด นครราชสีมา โดยไม่พิจารณาสายพันธุ์

1.4.2 ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ทำการศึกษามี 4 ระดับความหนาแน่น คือ

ก) ความหนาแน่นต่ำ 50-150 kg/m³

ข) ความหนาแน่นปานกลาง 151-300 kg/m³

ค) ความหนาแน่นสูง 301-450 kg/m³

ง) ความหนาแน่นสูงมาก 450 kg/m³ ขึ้นไป

1.4.3 เครื่องอัลดเม็คเชื้อเพลิงแบบ pellet mill ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1.4.4 เครื่องสับย่อยแบบ hammer mill ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1.4.5 ระบบอบแห้งชีวมวล แบบ flash dryers ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1.4.6 เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้ ขนาดกำลังการผลิต 500 kg_{vapor}/hr ความดันสูงสุด 22 bar เป็นหม้อต้มไอน้ำแบบท่อน้ำ เตาเผาแบบตะกรับแบบเฟลาตัน ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (ไม้สับ) เพื่อผลิตไอน้ำสำหรับเครื่องจักรกังหันไอน้ำ ตามการทำงานของวัฏจักรแรงคิน (Rankin cycle) มีระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกินแบบอัตโนมัติโดยสัมพันธ์กับการควบคุมอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมน้ำป้อนเป็นแบบอัตโนมัติ มีระบบการควบคุมความปลอดภัยแบบอัตโนมัติ ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

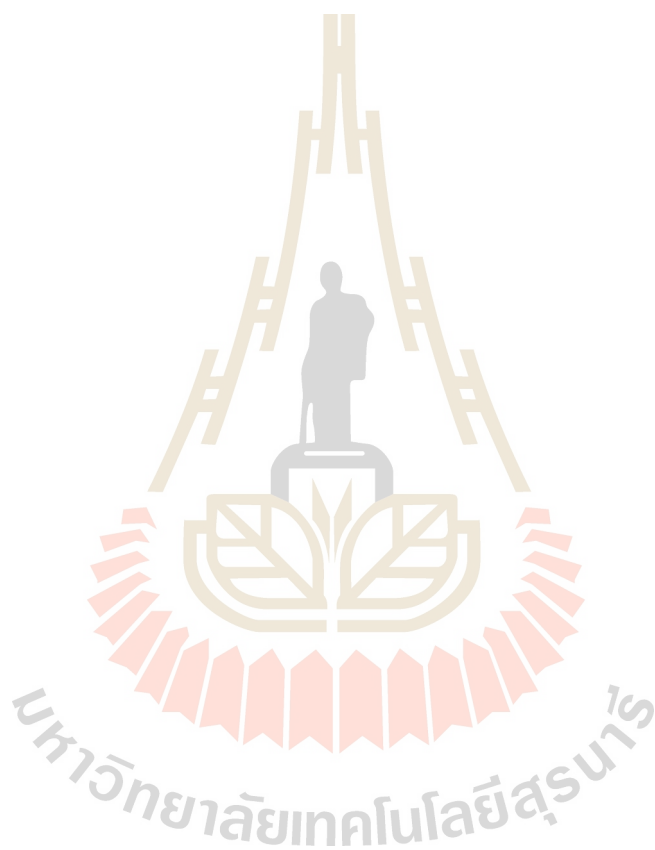
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจในสมบัติทางกายภาพของชีวมวลเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ขนาด ความชื้น ความหนาแน่น และ energy density

1.5.2 ทราบถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส การลดขนาด อบแห้ง อัดเม็ด เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม

1.5.3 ทราบถึงสมรรถนะการเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิง และความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

1.5.4 นำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ให้เป็นเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์



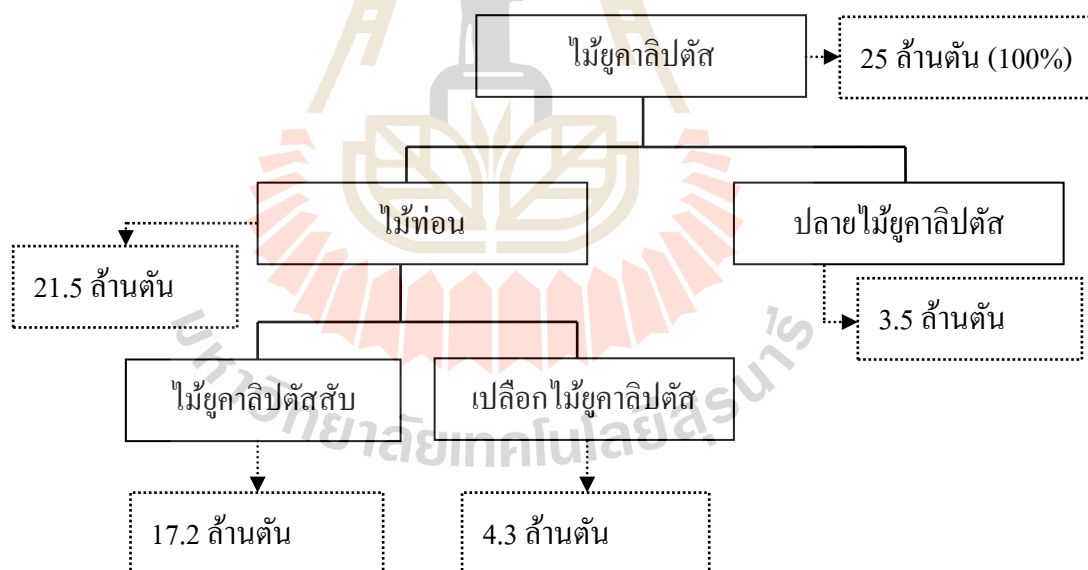
บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

2.1.1 สถานภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทย

ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั่วประเทศทั้งสิ้นประมาณ 10 ล้านไร่ (3% ของพื้นที่ประเทศ) โดยมีผลผลิตแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ไม้ท่อน ประมาณ 86% ของผลผลิตทั้งหมด (21.5 ล้านตัน/ปี) และปลายไม้ยูคาลิปตัส 14% ของผลผลิตทั้งหมด (3.5 ล้านตัน/ปี) หากพิจารณาเฉพาะไม้ท่อน พบว่า มีสัดส่วนเปลือกไม้ยูคาลิปตัสคิดเป็นร้อยละ 20 ต่อผลผลิตไม้ท่อน หรือคิดเป็นร้อยละ 17.2 ของผลผลิตทั้งหมด ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



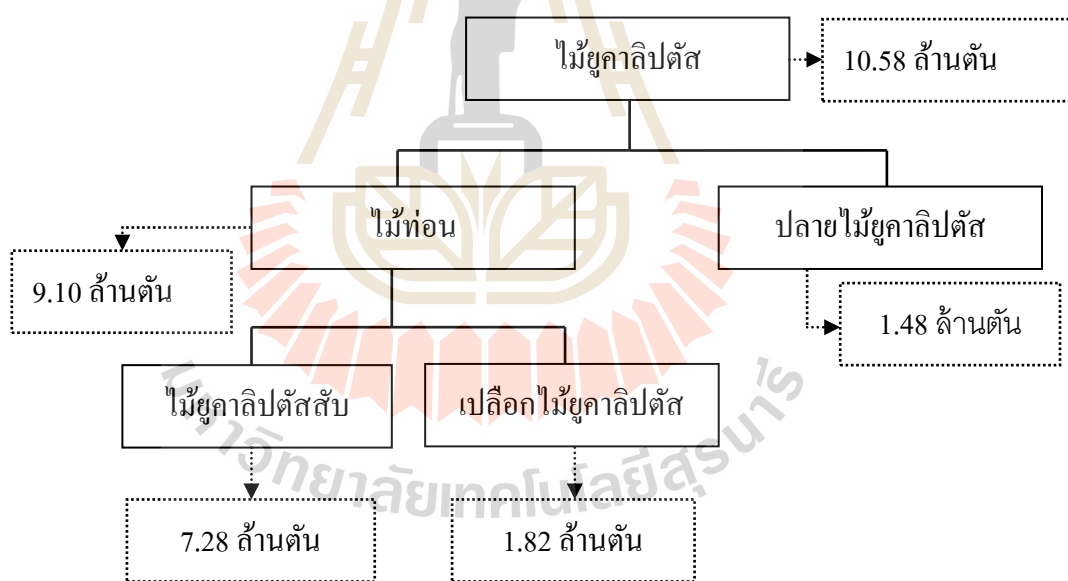
รูปที่ 2.1 ปริมาณอัตราส่วนการใช้ไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทย

เปลือกไม้ยูคาลิปตัส เกิดขึ้นจากกระบวนการทำไม้สับ มีผลผลิตประมาณ 4.3 ล้านตัน/ปี มีค่าความร้อนประมาณ 18 MJ/kg ปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสนั้นมีข้อจำกัดทางด้าน การขนส่ง การเกิดเชื้อรา การเกิดตะกรัน และการเกิดการสึกกร่อน ของระบบในการนำมาใช้จึงผสมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ประมาณ 10% โดยใช้ในกระบวนการผลิตความร้อน

ประมาณ 200,000 ตัน ในกลุ่มโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตไฟฟ้า ประมาณ 300,000 ตัน ซึ่งยังคงเหลือเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอีกประมาณ 3.8 ล้านตัน ที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์

จากการศึกษาพบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ปลูกไม้ยูคาลิปตัสสูงสุดในประเทศ เท่ากับ 6,767 km² หรือประมาณ 4.23 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 4.03 ของพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด ฉะนั้นคิดเป็นปริมาณเปลือกยูคาลิปตัสเท่ากับ 1.82 ล้านตันต่อปี ดังแสดงใน รูปที่ 2.2

จากการศึกษาโครงการพัฒนาการใช้ประโยชน์ชีวมวลในพื้นที่สวนป่าขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้พินุลมังสาหารและสวนป่าพลาญข่อย อ.สิรินทร จ.อุบลราชธานี คิดเป็นปริมาณไม้ยูคาลิปตัส 10.575 ล้านตันต่อปี ผลผลิตส่วนใหญ่ที่ได้จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือกว่าร้อยละ 95 ผลิตเป็นไม้สับเพื่อส่งเข้าโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ และอีก 5% จะขายเป็นไม้ท่อนในอุตสาหกรรมก่อสร้างในการเป็น ไม้เข็มและ ไม้ค้ำยัน (ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล, 2553)



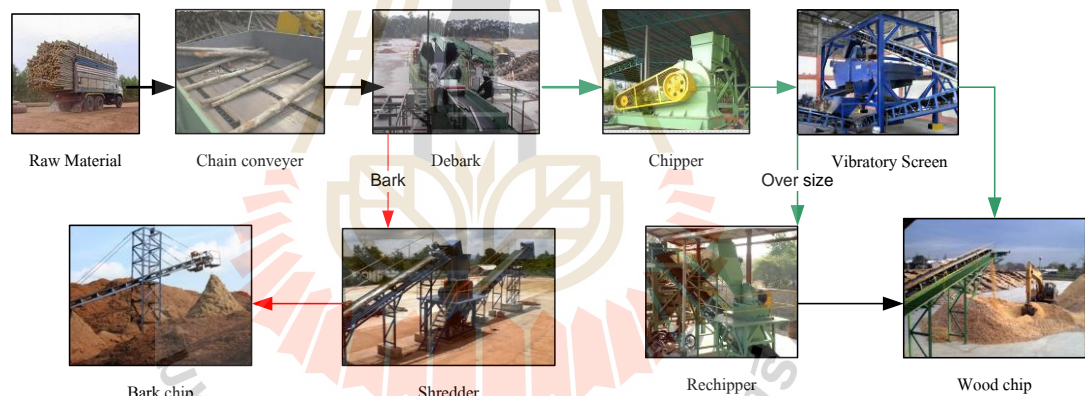
รูปที่ 2.2 ปริมาณอัตราส่วนการใช้ไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2.1.2 เทคโนโลยีการผลิตไม้สับ

ในกระบวนการผลิตเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของอุตสาหกรรมต่าง ๆ เริ่มจากกระบวนการลำเลียงไม้ยูคาลิปตัสด้วยสายพานลำเลียง (chain conveyer) ผ่านเครื่องลอกเปลือก (debarked)

ส่วนที่เป็นเนื้อไม้ก็จะผ่านเข้าเครื่องสับ (chipper) เพื่อลดขนาด หลังจากเข้าเครื่องคัดขนาด (vibratory screen) โดยจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีขนาดเหมาะสมจะถูกลำเลียงเพื่อรอจำหน่าย ส่วนไม้ขนาดเล็กหรือที่เครื่องสับไม่สามารถสับได้จะผ่านเครื่องสับขนาดเล็ก (rechipper) หรือบางแห่งอาจจะนำมาผ่านเครื่องสับอีกครั้ง เพื่อลดขนาดอีกครั้ง ส่วนเปลือกไม้ที่โดนแยกออกจากเครื่องแยกเปลือกก็จะผ่านเข้าเครื่องตีเปลือกไม้ (bark shredder) เพื่อลดขนาดก่อนจะเตรียมจำหน่ายเช่นเดียวกัน ดังแสดงใน รูปที่ 2.3

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะกระจายอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมสับข่อยไม้ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และอุตสาหกรรมไม้อัด เปลือกยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานจะมีความหนาแน่นต่อพื้นที่ต่ำ และความชื้นสูง การรวบรวมและขนส่งจึงทำได้ยาก จึงควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครื่องจักรในการแปรรูปเบื้องต้นในพื้นที่โรงงานที่มีเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้กับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส สำหรับการขนส่งต่อไป



รูปที่ 2.3 กระบวนการผลิตไม้ยูคาลิปตัสสับ

2.1.3 ศักยภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอยู่ทั้งสิ้น 1.82 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงาน 11,470 TJ เทียบเท่ากับน้ำมันดิบ 271.54 ktoe สามารถ นำมาผลิตไฟฟ้าได้ 637.2 GWh หรือป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าขนาด 90.9 MW ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในการผลิตไฟฟ้าของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ประเภท ชีวมวล	ปริมาณ คงเหลือ (ล้านตัน/ปี)	ความชื้น (%wb)	ค่าความร้อน MJ/kg	พลังงานทั้งสิ้น (TJ)	พลังงาน เทียบเท่า น้ำมันดิบ (ktoe) ¹⁾	ศักยภาพผลิต กระแสไฟฟ้า (GWh) ^{2)/} ขนาด โรงไฟฟ้า (MW) ³⁾
เปลือก ยูคาลิปตัส	1.82	61.9	6.3	11,470	271.54	637.2 / 90.9

หมายเหตุ:

- ¹⁾ พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1 ktoe เท่ากับ 42.24×10^6 MJ
- ²⁾ ค่า Net Plant Heat Rate เฉลี่ยสำหรับโรงไฟฟ้า 18 MJ/kWh หรือประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า 20%
- ³⁾ โรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า 7,008 ชั่วโมง/ปี หรือ Plant Factor 0.8

2.1.4 สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่จำเป็นในการพิจารณานำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อน ซึ่งสมบัติต่าง ๆ แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.3

2.1.4.1 สมบัติทางกายภาพ (ขนาด ความหนาแน่น และความชื้น)

เปลือกไม้ยูคาลิปตัสส่วนใหญ่มี 2 ขนาด คือ มีลักษณะเป็นชิ้น และฝอยขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป ซึ่งการที่เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีขนาดดังกล่าว ทำให้ความหนาแน่น (bulk density) ต่ำ นอกจากนี้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส หลังจากทำการแปรรูปแล้วจะมีความชื้นสูง (55-65%) ทำให้ไม่คุ้มค่าในการขนส่ง

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ประเภทชีวมวล	ความชื้น (%w.b.)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ลักษณะทั่วไป
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสชิ้น	56	118	ยาว 0.2 ม. หนา 5 มม.
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสฝอย	60	261	เส้นใย

2.1.4.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate value)

เป็นสมบัติเฉพาะตัวของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น (moisture content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (volatile matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และ ปริมาณเถ้า (ash content) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เป็นสมบัติที่นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม ในส่วน ของปริมาณเถ้า ซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate value) ของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัส

ชนิดชีวมวล	Moisture Content (%)	Proximate Value			High Heating Value, HHV (kJ/kg)
		Volatile Matter (%)	Ash Content (%)	Fixed Carbon (%)	
เปลือกยูคาลิปตัส	61.9	79.9	6.39	13.72	18,821

2.1.4.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

เป็นสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อัน ประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ ได้โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932) ทั้งนี้ธาตุ องค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลต่อค่าความร้อน คือคาร์บอนและไฮโดรเจน เนื่องจากคาร์บอนและ ไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานใน กระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม หากมีปริมาณไฮโดรเจนมาก ในปฏิกิริยาการ เผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะเกิดน้ำมากเช่นกัน ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำส่วนนี้ดูดซับพลังงานไว้บางส่วน พลังงานที่ระบบปลดปล่อยออกมาจึงลดลง

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัส

ชนิดชีวมวล	สัดส่วนของธาตุ (ร้อยละ)				
	C	H	N	S	O
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	45.4	5.66	0.33	0.11	48.50

2.1.4.4 ค่าความร้อน (heating value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนักในรูปของความร้อน ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยพบว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการเปลี่ยนคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้น และสมบัติแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้มีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของชีวมวลแต่ละชนิด (Senelwa และ Sims, 1999) สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Demirbas (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษากับวัสดุชีวมวลถึง 16 ชนิด นอกจากนี้ Demirbas (2007) ยังได้ทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความชื้น กับค่าความร้อน โดยพบว่าค่าความชื้นในวัสดุชีวมวลเป็นผลทำให้ค่าความร้อนลดลง เพราะความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวลจะอยู่ระหว่างช่องว่างในเซลล์ที่ตาย และผนังเซลล์ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลถูกเผาไหม้ความชื้นจะเป็นตัวดูดซับความร้อนบางส่วน ทำให้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมามีค่าลดลง

- ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อน

นิยามของค่าความร้อนสูง (high heating value; HHV) หมายถึงพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบสมบูรณ์ (gross calorific value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C และผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 25°C ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่รวมถึงพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (latent heat of vaporization) ส่วนค่าความร้อนต่ำ (low heating value; LHV) หมายถึงพลังงานความร้อนสุทธิที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (net calorific value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C และผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 150°C ซึ่งไม่รวมถึงพลังงานที่ได้จากการควบแน่น (condensate) ไอน้ำมาใช้งาน โดยปกติค่าความร้อนใช้งานของเชื้อเพลิง จะไม่รวมถึงพลังงานที่ได้จากการควบแน่นดังกล่าวนี้ด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่าง LHV และ HHV แสดงไว้เป็นสมการที่ (2.1)

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 2.395 (9\text{H} + \text{W}) \quad (2.1)$$

เมื่อ H และ W เป็น สัดส่วนของไฮโดรเจน และ ความชื้น ตามลำดับ

จากนิยามของค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำข้างต้น เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้ โดยใช้ เครื่อง bomb calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้สำหรับการหาค่าความร้อน ภายใต้สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ตามมาตรฐาน ASTM D2015 โดยค่า

ความร้อนของเชื้อเพลิงแห้ง (ความชื้น 0%) ถือได้ว่าเป็นค่าความร้อนสูง (HHV) ส่วนค่าความร้อนที่วัดได้เมื่อเชื้อเพลิงมีค่าความชื้นต่างๆ จากเครื่อง bomb calorimeter จะเป็นค่าความร้อนต่ำ (LHV)

2.1.5 สถานภาพการใช้ประโยชน์เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากข้อมูลที่ผ่านมา แสดงให้เห็นได้ถึงศักยภาพของการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตพลังงาน ในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะนำชีวมวลมาใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) ทั้งนี้ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย เช่น การกระจายตัวของแหล่งชีวมวล ขนาด ความชื้น ลังเจือปน ปริมาณขี้เถ้า/องค์ประกอบในเถ้า ดังนั้น ถ้านำชีวมวลใดมาผลิตพลังงานไฟฟ้าความร้อน จำเป็นต้องพิจารณา ความยาก/ง่าย ของการเข้าถึงเชื้อเพลิง คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทางด้านกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ตลอดจน กระบวนการแปรรูปของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นๆ เพื่อประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุด

2.1.5.1 คุณสมบัติและผลของการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีคุณสมบัติบางอย่างที่บ่งชี้ได้ว่า มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ อาทิ ส่วนใหญ่เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะอยู่รวมเป็นกลุ่ม มีความง่ายต่อการเข้าถึงเชื้อเพลิง เนื่องจากการรวบรวมเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถทำได้ง่าย มีค่าความร้อนค่อนข้างสูง หากผ่านกระบวนการลดความชื้น มีองค์ประกอบธาตุหลัก (คาร์บอน ไฮโดรเจน) สูง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานในตัวเชื้อเพลิง ให้เป็นพลังงานความร้อนได้โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

อย่างไรก็ดี คุณสมบัติที่เป็นจุดด้อยของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ก็ยังปรากฏอยู่เช่นกัน ซึ่งสามารถแบ่งเป็น ประเด็นต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

- ความชื้น (moisture content) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการนำมาเป็นเชื้อเพลิง กรณีที่ชีวมวลมีความชื้นสูงมาก จะไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้ ต้องนำมาผ่านกระบวนการอบแห้ง (drying) เพื่อลดความชื้นก่อนนำไปใช้ ในกรณีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นประมาณ 55-65% ถ้านำมาเก็บไว้ล่วงหน้าระยะหนึ่ง ความชื้นจะลดลงโดยธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ เสียพื้นที่ในการจัดเก็บ และถ้าเก็บไว้นานไปไม่มีโอกาสย่อยสลาย ผุพัง เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ตามสภาพธรรมชาติ

- ขนาด (size/shape) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีลักษณะไม่คงตัว (มีลักษณะเป็นชิ้น และเป็นเส้นฝอยปะปนกัน) ซึ่งการที่มีขนาดใหญ่เกินไป จะไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้เป็น เชื้อเพลิงโดยตรง เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำ ดังนั้นควรนำมาย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น แต่ก็จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการย่อย/บดละเอียดเพิ่มขึ้นเช่นกัน เชื้อเพลิงที่ถูกย่อย/บดละเอียด จะถูกนำไปใช้สำหรับเตาพลังงานบางประเภท (fluidize bed furnace, pulverized furnace, spreader fired stoker) แต่สำหรับเตาเผาบางระบบ ก็สามารถใช้เชื้อเพลิง ที่ไม่จำเป็นต้องมีขนาดเล็กละเอียดได้ เช่น stoker และ rotary kiln furnace อย่างไรก็ตาม การที่เชื้อเพลิงมีขนาดเล็กละเอียด จะมีปัญหาในขั้นตอน และต้นทุนการขนส่ง ดังนั้นขนาดจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา เชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิด จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการอัดเม็ด หรืออัดแท่งเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มความหนาแน่น

2) สมบัติทางเคมี (chemical properties)

องค์ประกอบทางเคมีในเปลือกไม้ยูคาลิปตัส สำหรับบางสารถือว่าเป็นสิ่งเจือปนที่ต้องระมัดระวังให้มาก อาทิ สารอัลคาไลน์ (Be, Mg, Ca, Sr, Ba และ Ra) ส่วนประกอบทางเคมีของ ash oxide ต่างๆ เหล่านี้จะก่อให้เกิดตะกรัน (fouling), การเกาะตัวของเถ้า (agglomeration หรือ slagging) ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อเตาเผาและระบบการถ่ายเทความร้อน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าที่เกิดจากกระบวนการเผาไม้ จะสามารถทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้ เช่น การเกิด slagging, fouling, การจับตัวเป็นก้อน เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ทราบว่าเชื้อเพลิงนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะใช้ในเตาเผา (furnace) หรือไม่

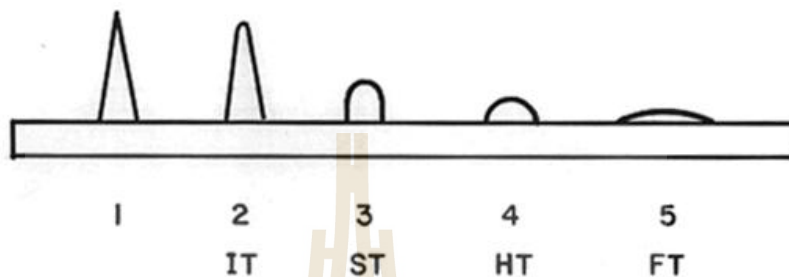
3) Ash fusion temperature

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่เถ้าเริ่มหลอมละลาย จะเกิดขึ้นภายใต้ reducing หรือ oxidizing atmosphere โดยเริ่มจาก 900°C จนถึง 1600°C หรือมากกว่า โดยอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของเถ้าจะมี 4 ระดับ คือ

- Initial deformation temperature (I.D.T.) เป็นอุณหภูมิที่เถ้าเริ่มหลอมตัว โดยเริ่มจากปลายยอด
- Spherical temperature (S.T.) เป็นอุณหภูมิที่เถ้าหลอมละลายจนความสูงของแท่งตัวอย่างเถ้าลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่าง เริ่มต้น
- Hemispherical temperature (H.T.) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเถ้าหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความสูง

- Flow temperature (F.T.) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเถ้าหลอมละลายจนไหล ซึ่ง ณ จุดนี้ ความสูงของตัวอย่างเถ้าจะมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของความกว้าง ของฐาน

อุณหภูมิในการศึกษาพฤติกรรมของเถ้า ดังแสดงใน รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อุณหภูมิในการศึกษาพฤติกรรมของเถ้า (critical temperature point)

ทั้งนี้ Initial deformation temperature (I.D.T.) จะเป็นอุณหภูมิที่ใช้พิจารณาพฤติกรรมของเถ้าใน เตาเผา สำหรับที่ reducing atmosphere ซึ่งสามารถแปรผลพฤติกรรมของเถ้าได้ ดัง ตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 พฤติกรรมของเถ้า สำหรับ initial deformation temperature (I.D.T.)

อุณหภูมิ	พฤติกรรมของเถ้า
> 1450 ^o C	เถ้าไม่หลอมละลาย (refractory)
1350 -1450 ^o C	เถ้าไม่หลอมละลายและไม่ทำให้เกิดปัญหาในการ จับเป็นก้อน (clinkering)
1250 -1350 ^o C	ต้องมีการดูแลเรื่องการออกแบบ furnace
<1250 ^o C	เถ้ามักจะเกิดปัญหาการหลอมจับตัวเป็นก้อน

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่า ค่า ash fusion temperature ที่ต่ำ มักจะมีแนวโน้มของการเกิด slagging สูง โดยสัมพันธ์กับอุณหภูมิในเตา โดยสังเกตจากค่า initial deformation temperature ทั้งนี้ สามารถหาแนวโน้มของการเกิด slagging factor (Rs) ได้จากสูตร

$$\text{Slagging Factor (Rs)} = (\text{Max H.T} + 4 * \text{Min IDT}) / 5$$

ถ้าค่า Rs ต่ำ แสดงว่าปัญหาการเกิด slagging จะยิ่งสูงมาก

4) Ash Composition Analysis

เป็นการวิเคราะห์ทางเคมี หาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเถ้าในรูป Oxides ซึ่งจะอยู่ในรูป SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , K_2O และ Na_2O ซึ่งส่วนประกอบของเถ้า จะแบ่งตามคุณสมบัติทางเคมีเป็น 2 ส่วนคือ

- Acidic oxides ประกอบด้วย SiO_2 , Al_2O_3 และ TiO_2 โดยทั่วไป Acidic oxides ในเถ้าจะเป็นตัวที่ทำให้อุณหภูมิหลอมตัวสูง และอุณหภูมิหลอมตัวจะลดลงตามปริมาณของ Basic Oxides ที่เพิ่มขึ้น
- Basic oxides ประกอบด้วย Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O และ K_2O

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้า ที่ทำให้เกิด Slagging

1) Basic/Acid ratio หรือ (B/A ratio)

B/A ratio จะบอกแนวโน้มของเถ้าซึ่งประกอบด้วยโลหะต่าง ๆ จะรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นเกลือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ B/A Ratio จะบอกถึง ลักษณะการหลอมตัวและแนวโน้มการเกิด Slag

$$\text{B/A ratio} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$$

2) Slagging index (Rs)

ratio นี้จะบอกถึงแนวโน้มในการเกิด slag เช่นเดียวกับ Basic/Acid ratio ถ้ายิ่งค่า Rs มีค่าสูง โอกาสที่จะเกิด slagging ก็เพิ่มขึ้น

$$\text{Rs} = (\text{Basic/Acid}) \times \% \text{ Sulphur in biomass (dry basis)}$$

3) Silica/Alumina Ratio

Silica สามารถรวมตัวกับสารประกอบที่เป็นเบสแล้วเกิดเป็น Silicates ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้ มากกว่าโอกาสที่ Alumina จะรวมตัวเกิดเป็น Aluminate ดังนั้นเถ้า ที่มีค่า B/A Ratio เท่ากัน แต่เถ้าที่มีค่า Silica/Alumina Ratio สูงกว่าจะมีลักษณะหลอมตัวได้ง่ายกว่า โดยทั่วไปจะมีค่า อยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 4.0 ratio นี้ ใช้เป็นข้อมูลพิจารณาเกี่ยวกับการหลอมตัวของ ash เนื่องจากส่วนประกอบทั้งสองเป็น Acidic Oxides ซึ่งถือว่า มีจุดหลอมเหลวสูง

$$\text{Silica/Alumina ratio} = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$$

4) Iron/Calcium ratio

ถ้าในถ้ำมีปริมาณ Iron และ Calcium มาก จะทำให้เกิด fluxing action เหล็ก และแคลเซียมจะรวมตัวเป็น eutectic ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ถ้าผสมกันในสัดส่วนเหมาะสม อัตราส่วนที่มีผลต่อ fluxing effect มากที่สุด คือ ระหว่าง 0.3 ถึง 3.0 ความสัมพันธ์ของ Iron และ Calcium ต่อความยากง่ายในการหลอมตัวของถ้ำ คือ

- ถ้าไม่มี CaO เลย Iron oxide จะไม่ทำให้เกิด slag ที่หลอมเหลวง่ายที่สุด
- ถ้ามีปริมาณ Ferric oxide สูงถึง 20% ในถ้ำจะทำให้มี fluxing effect เพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ Fe_2O_3 แต่ถ้ำเปอร์เซ็นต์ Fe_2O_3 มากกว่า 20% จนถึง 40% Fe_2O_3 จะไม่มีผลในการเพิ่มความสามารถในการหลอมตัว (fusibility) ของ ash ที่มีเปอร์เซ็นต์ Fe_2O_3 มากกว่า 14% การเพิ่มของเปอร์เซ็นต์ CaO จะทำให้ fusion temperature ลดลงได้มากกว่าการเพิ่ม Fe_2O_3 ในปริมาณที่เท่ากัน
- ปริมาณ MgO ซึ่งปกติจะมีค่าน้อยกว่า CaO fluxing effect ของการที่ MgO รวมกับ CaO จะมากกว่าการเพิ่มปริมาณ CaO อย่างเดียวเป็นปริมาณเท่ากับ 3:2 เท่า

$$\text{Iron/Calcium Ratio} = Fe_2O_3 / CaO$$

5) Iron/Dolomite ratio

Dolomite percentage (D.P.) คือเปอร์เซ็นต์ของ Dolomite ใน Basic oxides ทั้งหมด parameter นี้ใช้กับถ้ำที่ปริมาณ Basic oxides มากกว่า 40% เนื่องจากปริมาณ Basic oxides มากกว่า 40% จะมีความสัมพันธ์กับค่า viscosity ของถ้ำช่วงที่ใช้พิจารณาคือ Basic oxides เท่ากับ 40-98% ถ้า Dolomite percentage เพิ่มขึ้น ค่า fusion temperature และ viscosity จะสูงขึ้นด้วย

$$\text{Iron/Dolomite ratio} = Fe_2O_3 / CaO + MgO$$

6) Equivalent Fe_2O_3 และ Ferric percentage (F.P.)

Ferric percentage จะบอกถึง degree ที่เหล็กถูก oxidised ใน slag ของถ้ำ ค่าทั้งสองค่านี้จะถูกนำมาใช้เมื่อพบว่า ash fusion temperature และอุณหภูมิที่เริ่มแข็งตัว (crystallization temperature) ใน reducing atmosphere ต่ำกว่าในบรรยากาศของ oxidizing ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากรูปแบบที่ต่างกันของ Iron oxide ที่เกิดในบรรยากาศ reducing และ oxidizing FeO และ Fe

เป็น fluxing agent ที่มีผลมากกว่า Fe_2O_3 และให้ผลในการลด fusion และ crystallization temperature ลง ค่า F.P. ที่น้อยลง แสดงว่า ash มีลักษณะที่หลอมเหลวง่ายขึ้น ค่า equivalent Fe_2O_3 และ F.P. จะขึ้นกับภาวะในการเผาไหม้ใน furnace

$$\text{Equivalent Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11\text{FeO} + 1.43 \text{ Fe}$$

$$\text{F.P.} = (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Equi. Fe}_2\text{O}_3) * 100$$

7) Silica percentage (S.P.)

ค่า S.P. ที่มีค่าประมาณ 35-90% จะมีความสัมพันธ์กับ viscosity ของ ash slag โดยค่า S.P. เพิ่มขึ้นจะทำให้ slag viscosity เพิ่มขึ้น

ส่วนประกอบทางเคมีของ Ash ที่ทำให้เกิด Fouling

1) Fouling index (Rf)

ใช้ในกรณีของเถ้า ที่มีค่า $\text{CaO} + \text{MgO} < \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่านั้น

$$\text{Rf} = (\text{Basic/ Acid}) * \% \text{Na}_2\text{O} \text{ ในเถ้า}$$

โดยที่

Rf	แนวโน้มการเกิด Fouling
น้อยกว่า 0.2	ต่ำ
0.2-0.5	ปานกลาง
0.5-1.0	สูง
มากกว่า 1.0	รุนแรงมาก

2) ปริมาณ Sodium oxide ในเถ้า

ใช้ในกรณีเถ้าที่มีค่า $\text{CaO} + \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ ซึ่งปริมาณร้อยละของ Na_2O ใน เถ้า จะบอกถึงแนวโน้มการเกิด Fouling

โดยที่

Na_2O	แนวโน้มการเกิด Fouling
น้อยกว่า 3%	ต่ำ/ปานกลาง
3 - 6%	สูง
มากกว่า 6%	รุนแรงมาก

3) Active alkali

เป็นตัวบอกแนวโน้มของการเกิด fouling เพราะ Sodium (Na) และ Potassium (K) เมื่อถูกความร้อนจะระเหยกลายเป็นไอ และไปกลั่นตัวบนท่อ steam และจะทำปฏิกิริยากับ Sulphur oxide ใน flue gas เกิดเป็น complex sulphate ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมาก และหลอมตัวเป็นคราบเหนียวตามผิวท่อคอยจับอนุภาคเถ้าที่มาสัมผัส ปริมาณ Na, K เป็นตัวบอกแนวโน้มการเกิด Fouling ได้ดี ซึ่งสามารถคำนวณการเกิด fouling ได้ว่า

Modified Rf = (Basic/Acid) x Water soluble sodium ในเชื้อเพลิง

โดยที่ Modified fouling factor หาได้โดยการเตรียมเถ้าโดยใช้ low temperature method เพื่อไม่ให้ Na, K กลายเป็นไอ เนื่องจากอุณหภูมิสูง

โดยที่

Rf	แนวโน้มการเกิด Fouling
น้อยกว่า 0.1	ต่ำ
0.1-0.25	ปานกลาง
0.25-0.7	สูง
มากกว่า 0.7	รุนแรงมาก

ทั้งนี้ เปอร์เซ็นต์ของ Active alkali ในถ่านหิน มีผลต่อการเกิด fouling ดังนี้

% Active	แนวโน้มการเกิด Fouling
น้อยกว่า 0.7%	ต่ำ
0.7-1.5 %	ปานกลาง
1.5-5.5%	สูง
มากกว่า 5.5%	รุนแรงมาก

4) ปริมาณคลอรีน (chlorine)

ถ่านหินบางแหล่ง active alkali (Na, K) พบอยู่ในรูป NaCl และ KCl ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ของการเกิด fouling กับปริมาณ chlorine ในถ่านหินได้ ซึ่งปริมาณคลอรีนจะเป็นตัวบอกแนวโน้มการเกิด fouling ได้

% Chlorine	แนวโน้มการเกิด Fouling
น้อยกว่า 0.2 %	ต่ำ
0.2-0.3 %	ปานกลาง
0.3-0.5%	สูง
มากกว่า 0.5%	รุนแรงมาก

จากผลการศึกษาของ Barisic et al. (2009) พบว่าการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสในอัตราส่วนร้อยละ 5 ร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น แกลบและถ่านหินพบว่าการเกิดตะกรันและกัดกร่อนไม่รุนแรงมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม สารประกอบประเภทหินปูนหรือดินขาว (kaolionite) ผสมลงไปเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงยังสามารถลดการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซคลอรีนได้อีกทางหนึ่งด้วย

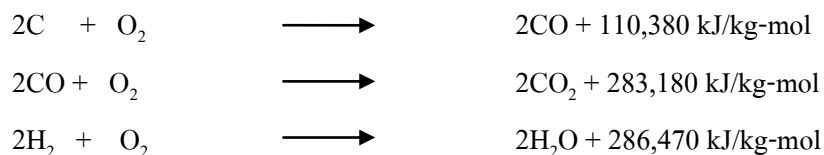
ปัจจุบัน มีการนำเอาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน แต่อาจจะมีสัดส่วนที่น้อยมากหากเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์อื่นๆ เนื่องจากปัญหาตามที่กล่าวมาในข้างต้น ทั้งนี้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ถือเป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพ ดังนั้นการที่จะพัฒนากระบวนการ หรือวิธีการเพื่อที่จะนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมผลิตพลังงานความร้อน ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นถือเป็นประเด็นที่ต้องศึกษา

2.1.5.2 มลพิษอากาศที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

การเผาไหม้หรือการสันดาปเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วน ๆ แต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาตร หรือ 23% โดยน้ำหนัก

เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน (C) ออกซิเจน (O₂) ไฮโดรเจน (H₂) และธาตุอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาวะที่ใช้ ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ จะทำให้ปลดปล่อยแก๊สไอเสียในรูปแก๊ส

ออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเป็นแก๊สที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปฏิกริยาอุนเคมี เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้จะมีขั้นตอน การเกิดปฏิกิริยาดังนี้



กลไกการเกิด SO₂ คือ เมื่อนำเชื้อเพลิงที่มีธาตุ S เป็นองค์ประกอบไปเผาไหม้จะเกิดเป็น SO₂ โดยการเผาเชื้อเพลิงประมาณ 94-95% ของสารประกอบซัลเฟอร์จะเป็นเปลี่ยน SO₂ และเพียง 0.5-2.0% จะถูกเปลี่ยนเป็น SO₃ และในกรณีที่อุณหภูมิของไอเสียดลดลงต่ำกว่า 316 °C SO₃ จะรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็น ไอกรดซัลฟูริก



กลไกการเกิด Thermal NO_x เมื่อนำเชื้อเพลิงการเผาในอากาศ ออกซิเจน และไนโตรเจนในอากาศบางส่วนจะรวมตัวกันเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂)



นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อย อนุภาคมลสาร (ฝุ่น) เป็น จี๊ด้าลอยที่ปนเปื้อนไปกับแก๊สไอเสีย ในกรณีที่เชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของธาตุหมู่ฮาโลเจน จะทำให้เกิดมลพิษในรูปของ HCl, HF ได้เช่นเดียวกัน เหล่านี้สามารถนำออกมาจากแก๊สไอเสียได้ทั้งหมดด้วยเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษทางเคมีที่มีความก้าวหน้าและมีต้นทุนสูงการเลือกใช้ระบบควบคุมมลพิษอากาศโดยหลักแล้วขึ้นอยู่กับมาตรฐานการปลดปล่อยมลพิษของแต่ละประเทศและขึ้นอยู่กับระดับการควบคุมที่ต้องการ

อย่างไรก็ดี เชื้อเพลิงชีวมวลก็ยังถือว่ามีความชื้นต่ำกว่าถ่านหิน จึงมีการนำชีวมวลมาใช้เป็นส่วนผสมกับถ่านหินคุณภาพต่ำ หรือใช้งานในลักษณะที่เรียกว่า co-firing combustion (X. Jian-jun et al., 2007)

2.2 เทคโนโลยีการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

1) การลดความชื้นเชื้อเพลิง (biomass drying)

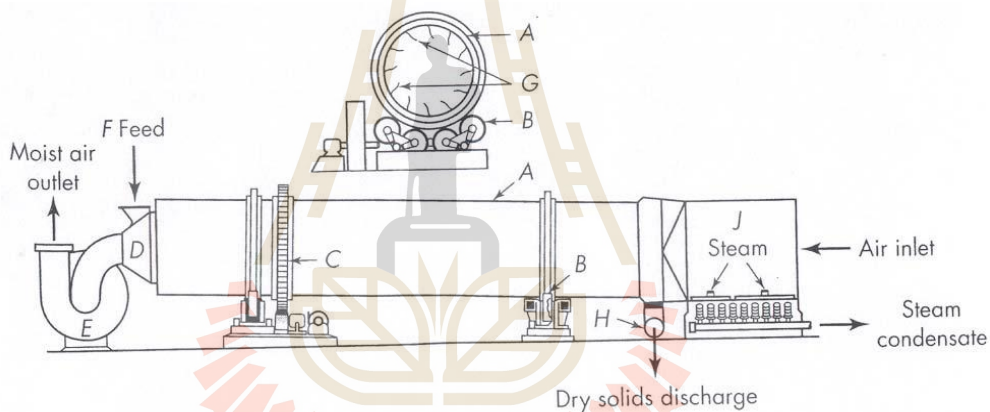
การลดความชื้นเป็นขั้นตอนหนึ่งในการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่ผ่านกระบวนการแปรรูป จะมีความชื้นค่อนข้างสูง ความชื้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะมีแนวโน้มเสื่อมคุณภาพ ถูกทำให้ย่อยสลายได้ โดยเชื้อราและเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่จะคงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลสั้นลง ส่งผลต่อการวางแผนการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลของโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการลดความชื้นโดยใช้เครื่องอบแห้งจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล มีอยู่หลายประเภทจำแนกตามวิธีการและชนิดของถังอบแห้ง ได้ 5 ประเภท (National renewable energy laboratory, 1998)

1. Rotary dryers
2. Flash dryers
3. Disk dryers
4. Cascade dryers
5. Superheated steam dryers

การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ดังแสดงใน ตารางที่ 2.6 และตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงใน รูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด (Wade A. Amos, 1998)

ชนิดเครื่องอบแห้ง	ต้องการวัสดุขนาดเล็ก	ต้องการขนาดวัสดุใกล้เคียงกัน	ความสะดวกในการนำความร้อนกลับมาใช้	เสี่ยงต่อประกายไฟ	ใช้น้ำ	ต้นทุน
Rotary dryer	ไม่	ไม่	ยาก	สูง	ใช้ได้	ต่ำ
Flash dryer	ใช่	ไม่	ยาก	ปานกลาง	ใช้ไม่ได้	ปานกลาง
Disk dryer	ไม่	ไม่	ง่าย	ต่ำ	ใช้ได้	สูง
Cascade dryer	ไม่	ใช่	ยาก	ปานกลาง	ใช้ไม่ได้	สูง
Superheated steam dryer	ใช่	ไม่	ง่าย	ต่ำ	ใช้ได้	สูง

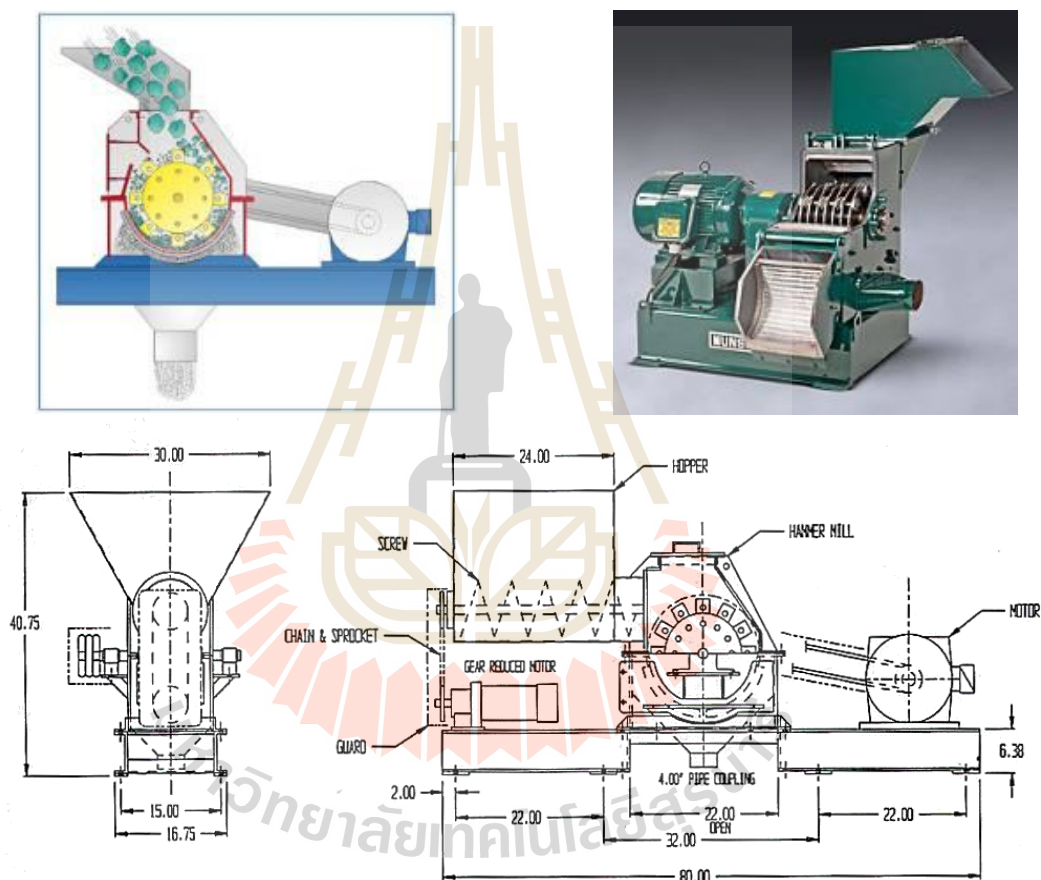


รูปที่ 2.5 ภาพลายเส้นแสดงเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบโรตารีขนาด 150 kg/h

2) การบด/ย่อยลดขนาด (size reduction)

กระบวนการบด/ย่อย ลดขนาด มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กเป็นผงละเอียด ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในเตาเผาบางประเภท โดยทั่วไป ขั้นที่ 1 จะเป็นการลดขนาดโดยการสับ/ย่อย ให้มีขนาดเล็กนิยมใช้เครื่อง chipper/chopper หากต้องการ บด/ย่อย ละเอียด จะมีขั้นตอนที่ 2 โดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องบด grinder หรือ hammer mills ซึ่งหลักการที่ใช้ในการบด/ย่อยลดของเครื่องจักรทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกัน กล่าวคือ grinder จะใช้แรงบีบอัด (compression forces) และแรงเฉือน (shearing forces) ส่วน hammer mill จะใช้แรงกระแทก (impact forces) และแรงเฉือน โดยลักษณะวัสดุที่จะทำการบด/ย่อย ขั้นที่ 2 นั้นแตกต่างกัน โดยที่ grinder จะเหมาะสมกับการบด/ย่อยวัสดุที่อ่อนนุ่ม มีความชื้นสูง ส่วน hammer mill จะเหมาะกับวัสดุที่แข็งและมีความชื้นต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งผ่านการสับ/ย่อย ขั้นที่ 1 มาแล้ว จะมีความแข็งและ

ความชื้นต่ำ การบด/ย่อยขั้นที่ 2 จึงเหมาะสมที่จะใช้เครื่องบด/ย่อยลดขนาดแบบ hammer mill มากกว่า ส่วน grinder จะเหมาะกับการหีบน้ำมันออกจากเมล็ด เช่น เมล็ดสบู่ดำ เมล็ดทานตะวัน เป็นต้น รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของ เครื่อง hammer mill โดยเครื่องจักรจะทำงานที่ความเร็วสูง 1500-4000 rpm ทำการตีเชื้อเพลิงชีวมวลจนกว่าจะได้ขนาดที่เล็กลงตามต้องการที่กำหนดโดยขนาดของรูตะแกรง ลงสู่ส่วนล่างของตัวเครื่อง โดยที่ตัวใบมีดตี จะยึดติดกับแกน เฟลา มีทั้งแบบ หมุนได้ (swing type) และแบบอยู่กับที่ (fixed type)



รูปที่ 2.6 เครื่อง hammer mill

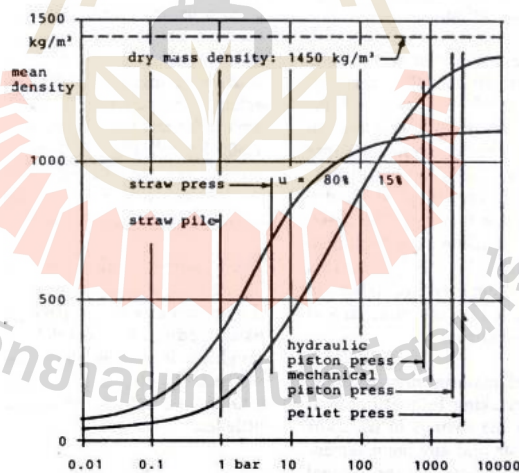
3) การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (biomass densification)

การอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นการลดปริมาตรและเป็นการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการกระจายตัวกันอย่างหลวมๆ การอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น อัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆ (pelleting or briquette) อัดเป็นลูกบาศก์ (cubing) อัดเป็นแท่ง (extruded log) อัดเป็นฟ่อน (baling) ในที่นี้ จะอธิบายในส่วนของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล

อัดแท่ง โดยวิธีการอัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆ เนื่องจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยที่ผ่านกระบวนการสับ/ย่อย หรือ บด/ย่อย เมื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงโดยวิธีการอัดเม็ดหรืออัดแท่ง จะช่วยเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งสะดวก เหมาะแก่การขนส่ง และการนำไปใช้ผลิตพลังงานในเตาเผาหลาย ๆ ประเภทด้วย

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า แรงดันที่ใช้มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งชีวมวล โดยเราสามารถอัดแท่งได้โดยถ้าทำการอัดภายใต้แรงดันที่ต่ำ 0.2 – 5 MPa ซึ่งจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มแรงกดให้สูงมากกว่า 100 MPa จะทำให้ผนังเซลล์ของเซลล์ulosolสลายตัวและจับตัวกันมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเลือกใช้วิธีการอัดภายใต้แรงดันต่ำหรือสูงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งชีวมวล ขึ้นอยู่กับ 1) ประเภทของชีวมวล และ 2) เครื่องมือและอุปกรณ์การอัด สำหรับการอัดที่แรงดันสูงสุดจะได้ความหนาแน่นสูงสุดของชีวมวลอัดคือ 1,200-1,400 kg/m³ โดยวิธีการอัดที่มีความหนาแน่นสูงสุดคือ วิธีการอัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆ (Pelleting) จะมีความหนาแน่นที่ 1,450-1,500 kg/m³ และวิธีที่น้อยที่สุดคือวิธีอัดแบบใช้สกรูอัด ดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความหนาแน่น

ความหนาแน่นปรากฏ (appearance density) ของแท่งชีวมวลจะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นบรรจุ (bulk density) เนื่องมาจากการเรียงตัวบรรจุอย่างไม่ชิดติดกันของวัสดุชีวมวล โดยขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ ขนาดและรูปร่างของวัสดุชีวมวล โดยความหนาแน่นบรรจุส่วนใหญ่จะอยู่

ประมาณ $600 - 700 \text{ kg/m}^3$ หรือน้อยกว่านั้น (น้อยที่สุดคือ ชานอ้อยและฟางข้าวจะมีค่าประมาณ 40 kg/m^3)

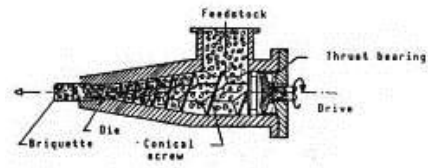
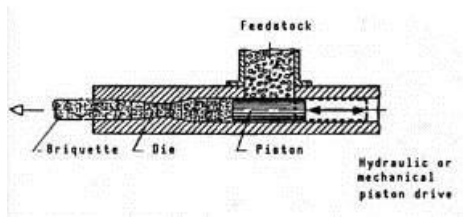
ลักษณะการจับตัวกันของชีวมวลในขณะที่ถูกอัดสามารถอธิบายได้โดยขึ้นกับระดับแรงดันที่ใช้ในการอัด และความร้อนที่ให้หรือที่เกิดขึ้นขณะทำการอัด กรณีระดับแรงดันที่ใช้สูง ๆ ซึ่งเกิดความร้อนและมีผลต่อการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมี ที่มีอยู่ในผนังเซลล์ของชีวมวลไปเป็นตัวประสานธรรมชาติ และพบว่า lignin เป็นตัวประสานธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะให้ความร้อน $130-190^\circ\text{C}$ ซึ่งนักวิจัยบางท่านก็ไม่เห็นด้วยโดยพบว่าอิทธิพลที่มีผลต่อการรวมตัวของชีวมวลก็คือ pectin ส่วนกรณีระดับแรงดันต่ำ ๆ จะมีการผสมตัวประสานเข้าไปในชีวมวลขณะอัด เช่น แป้งมันหรือ โมลาส เป็นต้น

โดยทั่วไปเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

ก) เครื่องอัดแบบลูกสูบ (piston presses) ลูกสูบจะทำหน้าที่อัดชีวมวลเข้าสู่กระบอกอัดและถูกอัดออกมาทางหัวคาย (die) โดยส่งกำลังด้วยฟลายวีลและคัปปลิง ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.8 (ก)

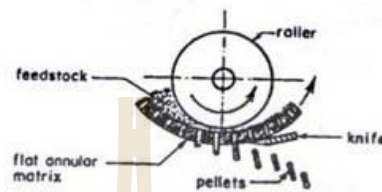
ข) เครื่องอัดแบบสกรู (screw presses) การลำเลียงวัสดุเข้าสู่เกลียวอัดจะทำให้วัสดุถูกกดอัดอย่างต่อเนื่องให้มีปริมาตรเล็กลงโดยใช้สกรูแบบกรวย และจะใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกเพื่อสลายลิกนินหรือไม่ก็ได้ ดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.8 (ข)

ค) เครื่องอัดแบบเม็ด (pellet presses) การอัดลักษณะนี้จะใช้ลูกกลิ้งหมุนกดทับวัสดุชีวมวลผ่านหน้าแปลนที่ถูกเจาะเป็นรูเล็กๆเอาไว้ โดยวัสดุจะถูกอัดออกมาผ่านรูเหล่านั้นเมื่อลูกกลิ้งวิ่งกดทับผ่าน ซึ่งหัวคายจะมีลักษณะเป็นแผ่นงานหรือแผ่นวงแหวน ดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.8 (ค)



ก. เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston Presses)

ข. เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Presses)



ค. เครื่องอัดแบบเม็ด (Pellet Presses)

รูปที่ 2.8 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ

ลักษณะของเครื่องแท่งและอัดเม็ดชีวมวลที่ใช้ในปัจจุบัน ดังแสดงใน รูปที่ 2.9



ก) Flat Die Pellet Presses



ข) Pellet Mill



ค) Briquetting Machine

รูปที่ 2.9 ลักษณะของเครื่องแท่งชีวมวลที่ใช้ในปัจจุบัน

2.3 การผลิตพลังงานจากชีวมวล

เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล คือ กระบวนการที่จะนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยทำให้เกิดการแตกตัวของอินทรีย์สารที่มีอยู่ในชีวมวล และผลิตพลังงานออกมา เทคโนโลยีที่ใช้เพื่อผลิตพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน และกระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี โดยแต่ละกระบวนการจะมีวิธีการหลายรูปแบบ และให้ผลผลิตออกมาในรูปแบบที่แตกต่างกัน

2.3.1 กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพสูงขึ้น โดยมีวิธีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่นการเผาไหม้โดยตรง การย่อยสลายด้วยความร้อน การแปรรูปเป็นแก๊สชีวมวล โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจะมีทั้ง ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป

2.3.1.1 กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (direct combustion)

ระบบการเผาไหม้โดยตรงได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานกว่าศตวรรษ และในปัจจุบันระบบการเผาไหม้โดยตรงเพื่อทำงานร่วมกับเทคโนโลยีกังหันไอน้ำ หรือนำเอาแก๊สร้อนไปใช้ในการอบแห้ง ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเป็นระบบที่มีการใช้มากที่สุดในโลก ระบบการเผาไหม้โดยตรงมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะกรับ (stoker firing) การเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed combustion) และการเผาไหม้ในแบบลอยตัว (suspension firing)

2.3.1.2 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis)

เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ผันกลับ (irreversible chemical) โดยการกระทำของความร้อนในที่ไม่มีแก๊สออกซิเจนแยกสลายชีวมวล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่อไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ อีกเล็กน้อยนอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมัน (oil) น้ำ (H_2O) และน้ำมันดิน (tar) ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการ ได้แก่ ถ่าน (coal) และ ขี้เถ้า (ash) ตามกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อนตามระดับอุณหภูมิในการเผาไหม้

2.3.1.3 กระบวนการผลิตแก๊สชีวมวล (gasification process)

กระบวนการแก๊สชีวมวล เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (thermo-chemical reaction) ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย CO H_2 และ CH_4 ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดแก๊สดังกล่าวเป็นสภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เป็นสภาวะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือแก๊สออกซิเจน

เพราะหากมีแก๊สออกซิเจนเพียงพอหรือมากเกินไปจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และมีการปลดปล่อย CO_2 และไอน้ำออกมา ซึ่งไม่คิดไฟ

2.3.2 กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี (biochemical conversion)

การผลิตแก๊สชีวภาพแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion, AD) เป็นกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวลและเพื่อทำให้วัสดุอินทรีย์มีลักษณะคงสภาพ (stable) เป็นการกำจัดกลิ่นเหม็นและสภาพน่ารังเกียจรวมทั้งให้ผลผลิตเป็นวัสดุปรับปรุงดินที่ปราศจากเชื้อโรคและเมล็ดวัชพืช ทั้งยังได้ผลพลอยได้คือแก๊สชีวภาพที่สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ขั้นตอนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้เราสามารถจัดแบ่งประเภทของระบบในเชิงวิศวกรรมได้เป็น 2 ระบบคือ Dry digestion process และ Wet digestion process

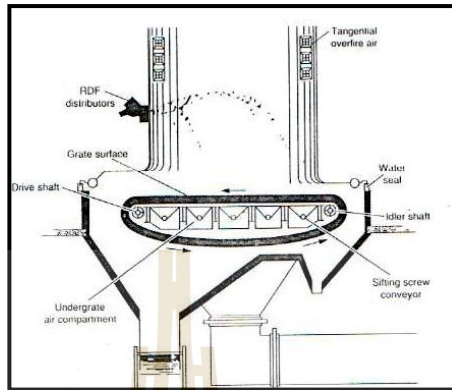
2.4 กระบวนการเผาโดยตรง (direct combustion)

ระบบการเผาไหม้โดยตรงได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานกว่าร้อยปี และในปัจจุบันระบบการเผาไหม้โดยตรงเพื่อทำงานร่วมกับเทคโนโลยีกังหันไอน้ำ หรือนำเอาแก๊สร้อนไปใช้ในการอบแห้ง ในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเป็นระบบที่มีการใช้มากที่สุดในโลก ระบบการเผาไหม้โดยตรงมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะกรับ (stoker firing) การเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed combustion) และการเผาไหม้ในแบบลอยตัว (suspension firing)

1) การเผาไหม้แบบตะกรับ (stoker firing)

เป็นระบบแรกที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาโดยอาศัยเครื่องกลแทนแรงคน เชื้อเพลิงถูกป้อนกองอยู่บนตะแกรง แล้วอากาศส่วนแรกถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของตะแกรง ผ่านขึ้นมาเผาไหม้เชื้อเพลิงบนตะแกรง อากาศอีกส่วนหนึ่งจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของตะแกรง เพื่อช่วยในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ แก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะนำไปผ่านส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำและนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบแบบตะกรับ แบ่งออกได้ตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิง คือ ระบบแบบตะกรับที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (overfeed stoker) และระบบแบบตะกรับที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (underfeed stoker) ระบบแบบตะกรับที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบนก็ยังมีหลายประเภท ได้แก่ ซึ่งเป็นแบบตะกรับเอียง (stationary sloping grate stoker) แบบตะกรับเลื่อน (travelling grate stoker) ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.10 และแบบตะกรับสั่น (vibrating grate stoker) ข้อดีคือสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้ทุกขนาดและไม่จำกัดความชื้น การทำงานไม่ยุ่งยาก การเผาไหม้หมด เพราะสามารถควบคุมความเร็วของตะแกรงได้ ข้อเสียคือการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าได้ตะแกรงได้ยาก เพราะจะขึ้นอยู่กับความสูงและความหนาของ

เชื้อเพลิงที่กองอยู่บนตะแกรงและนอกจากนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากผนังเตาเพื่อให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าคงที่



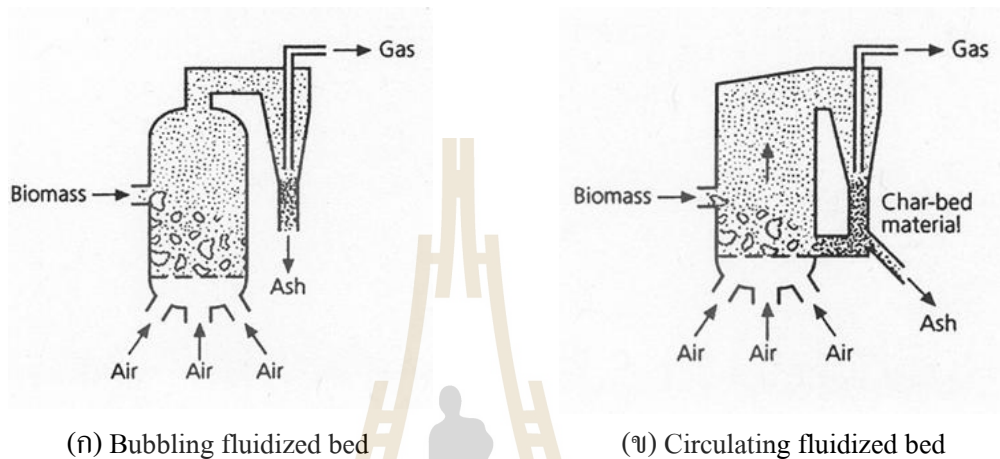
รูปที่ 2.10 ระบบการเผาไหม้แบบตะแกรงเคลื่อน

2) ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed system)

เป็นระบบที่อากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงและเมื่อเพิ่มค่าความเร็วของอากาศถึงค่าหนึ่งเชื้อเพลิงที่วางอยู่จะลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของเหลว ในตอนเริ่มติดเตาเบดจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นทั่ว ๆ บริเวณเตา โดยปกติจะใส่สารเฉื่อย (inert material) เช่น ทราย หรือสารที่ทำปฏิกิริยา (reaction material) เช่น หินปูน (limestone) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ซึ่งจะช่วยในด้านการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดภายในเตา ข้อดีคือมีสารเฉื่อยเป็นเบดทำให้เกิดการผสมของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว นอกจากนี้ตัวเบดยังช่วยเก็บความร้อนทำให้เตามีความเสถียร (stable) ไม่ดับง่ายและเกิดการเผาไหม้ในตัวเตาได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าเท่ากันสม่ำเสมอสามารถใช้ในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ (ประมาณ 850°C) จึงช่วยแก้ปัญหามลพิษของอากาศเนื่องจากเกิดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) น้อย นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบดจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่เกิน 5 s ก็จะทำปฏิกิริยาหมด ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงใช้อยู่ในเตาเผาที่ทำให้เกิดการเผาไหม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์

ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบบ Bubbling fluidized bed และแบบ Circulating fluidized bed ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.11 ซึ่งลักษณะหลักที่แตกต่างกันคือ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Circulating fluidized bed ความเร็วของลมที่ป้อนเข้าสู่

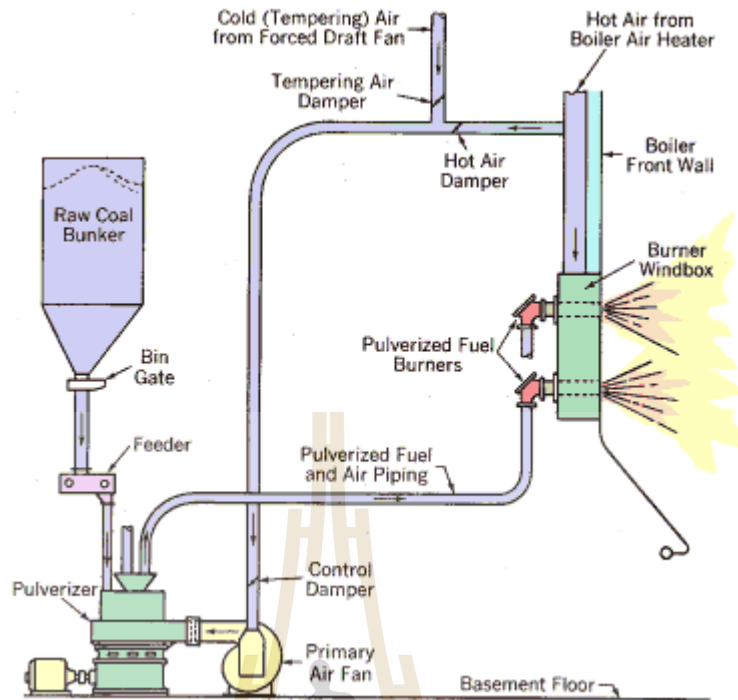
ระบบมีค่าสูงมากทำให้มีความแตกต่างจาก bubbling fluidized bed แบ่งแยกของส่วนที่หนาแน่นกว่า ซึ่งเป็นชั้นของทราย และส่วนที่เบาบางกว่าซึ่งเป็นชั้นของแก๊สนั้นหมดไป ทรายที่ใช้เป็นตัวกระจายความร้อนและถ่านชาร์จะถูกนำกลับเข้าสู่ระบบโดยผ่านการดักจับด้วยไซโคลนซึ่งอาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกระบบ ระบบนี้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณขี้เถ้าสูง



รูปที่ 2.11 ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

3) ระบบการเผาไหม้แบบลอยตัว (pulverised system)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบนี้ใช้หลักการเดียวกับการเผาไหม้ในเตาเผาเชื้อเพลิงบดละเอียด (pulverised fuel combustor) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กับถ่านหินและเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด ในโรงไฟฟ้า การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่เชื้อเพลิงถูกแขวนลอย ดัง รูปที่ 2.12 ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะต้องมีขนาดเล็กสามารถแขวนลอยอยู่ในอากาศ ส่วนแรกที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะถูกอุ่นก่อนเพื่อช่วยในการอบแห้งเชื้อเพลิง อากาศส่วนที่สองจะถูกส่งเข้าสู่เตาโดยตรงเพื่อช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกมาด้วยไอเสีย ข้อได้เปรียบของการเผาไหม้คือ ไม่จำเป็นต้องมีระบบตะแกรงที่จะต้องให้ความร้อนในการเผาไหม้สูง เพราะ stoker system ที่กล่าวมาข้างต้นจะออกแบบให้เตาเผาที่มีขนาดเล็กเพียงพอที่จะให้ความร้อนภายในเตาเผาที่มีค่าสูงพอแก่เชื้อเพลิงที่จะเผาไหม้ต่อไป ดังนั้นเตาเผา ระบบ pulverised system นี้ จึงให้ความร้อนในการเผาไหม้สูงกว่า สำหรับข้อเสียคือการควบคุมถ้าทำได้ยากจึงต้องมีระบบกำจัดเถ้า เชื้อเพลิงต้องมีขนาดเล็กจึงต้องเพิ่มอุปกรณ์บดเชื้อเพลิง การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาทำได้ยากเพราะถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไปจะทำให้เกิดการหลอมตัวของเถ้าเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ซึ่งจะทำให้เตาเผาเสียหายได้



รูปที่ 2.12 ระบบการเผาไหม้แบบลอยตัว

2.5 เทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไอน้ำ

หม้อไอน้ำ (boiler) คือ เครื่องหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไอน้ำโดยการถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้แก่ น้ำ ซึ่งอยู่ในภาวะปิดมิดชิดให้ได้ไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์ เช่น ขับเครื่องกังหันไอน้ำ (steam turbine) ขับเครื่องจักรไอน้ำ (steam engine) และยังสามารถนำเอาความร้อนจากไอน้ำมาใช้ในหม้อหุงต้มอาหาร หม้ออบแห้ง หม้อต้มน้ำอ้อย หม้อเคี้ยวน้ำตาล เป็นต้น

ปัจจุบันในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีการนำเอาหม้อไอน้ำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจากข้อมูลพบว่าในประเทศไทยมีการใช้อยู่ประมาณ 10,000 เครื่อง แบ่งเป็นหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำและหม้อไอน้ำไฟฟ้า ในสัดส่วน 80 15 และ 5% ตามลำดับ

โดยทั่วไปหม้อไอน้ำจะใช้งานร่วมกับเครื่องผลิตความร้อนไม่ว่าจะเป็นหัวเผา (burner) ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวในการให้ความร้อน และใช้กับเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง (direct combustion technology) ที่ใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน และเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งในปัจจุบันมีหม้อไอน้ำหลายประเภทและสามารถจำแนกได้ตามลักษณะต่าง ๆ กันไป แต่ในที่นี้เราสามารถจำแนกตามตำแหน่งของน้ำหรือแก๊สร้อนที่อยู่ในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ คือ

ก) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (fire-tube boiler)

รูปที่ 2.13 แสดงหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ที่มีแก๊สไหลอยู่ในท่อ และมีน้ำรับความร้อนจากแก๊สร้อนแล้วกลายเป็นไอน้ำอยู่ภายนอกท่อไฟนั้น โดยมีเปลือกหม้อไอน้ำรูปทรงกระบอกนอนหรือตั้งเป็นภาชนะรับความดันและเก็บกักน้ำไว้ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะใช้แก๊สไอน้ำอึดตัวที่ความดันต่ำ หม้อไอน้ำแบบนี้มีราคาถูก ไม่เน้นเรื่องคุณภาพน้ำและการดูแลรักษามาก หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนี้มีหลายแบบ ได้แก่ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนอน (horizontal fire-tube boiler), หม้อไอน้ำแบบท่อไฟตั้ง (vertical fire-tube boiler) และหม้อไอน้ำแบบไม่มีท่อ (tubeless boiler)



รูปที่ 2.13 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ

ข) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (water-tube boiler)

หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำนี้มีน้ำอยู่ภายในท่อ รูปที่ 2.14 แสดงการรับความร้อนของน้ำจากแก๊สร้อนที่ไหลอยู่ภายนอกท่อกลายเป็นไอน้ำ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำมีหลายประเภท หม้อไอน้ำมีราคาสูง ต้องการคุณภาพน้ำและการดูแลที่มากกว่าหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำนี้มีหลายแบบ ได้แก่ หม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า (power plant boiler) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำความร้อนทิ้ง (waste heat boiler, heat recovery steam generator, HRSG) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำรูปตัว A,D,O (A,D,O type water tube boiler) หม้อไอน้ำแบบไหลผ่านทางเดียว (once-through boiler) และหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำตั้ง (vertical water-tube boiler)



รูปที่ 2.14 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ

โดยทั่วไปแก๊สร้อนที่ได้จากระบบการเผาไหม้โดยตรงผ่านไปยังหม้อไอน้ำ (water heat boiler) เพื่อผลิตไอน้ำที่ใช้ในการเดินกังหันไอน้ำและผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป นอกจากนี้การผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนร่วมก็ยังสามารถทำได้ซึ่งแนวทางนี้นอกจากจะเป็นการตอบสนองต่อความต้องการในการใช้ไฟฟ้าและความร้อนเพื่อการผลิตน้ำร้อนหรือการใช้ไอน้ำความดันสูงแล้ว ยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอีกด้วย โดยมีการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่เหลือ (waste heat) จากการใช้ผลิตไฟฟ้า

2.6 ห้องเผาไหม้แบบต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ

เทคโนโลยีนี้ใช้หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำเพื่อผลิตไอน้ำ จากนั้นส่งไอน้ำเข้ากังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานของโรงไฟฟ้าทั่วไป ราคาต่อก่อสร้างแปรผกผันตามกำลังการผลิต กล่าวคือยิ่งใหญ่มิมีราคาต่อเมกะวัตต์น้อยลง โครงสร้างห้องเผาไหม้หม้อไอน้ำมีหลากหลายแบบ ขึ้นกับประเภทของเชื้อเพลิงและประสิทธิภาพการเผาไหม้ ตัวอย่างที่ใช้ในประเทศไทย

1. Incline/Fixed grate stoker มีโครงสร้างแบบง่ายๆ ตะกรับจะยึดติดอยู่กับที่ ต้นทุนค่าก่อสร้างค่อนข้างถูก ข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำ นำเชื้อถ่านออกยาก และบางครั้งเชื้อเพลิงค้างอยู่กลางตะกรับ ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง โครงสร้างนี้ส่วนใหญ่ใช้ในโรงงานน้ำตาล โรงงานน้ำมันปาล์ม และโรงสีข้าวเช่น โรงไฟฟ้าปทุมไรซ์มิลล์



รูปที่ 2.15 ห้องเผาไหม้แบบตะกรับเอียง

2. Traveling grate stoker โครงสร้างของตะกรับจะเคลื่อนที่ตลอดเวลา คล้ายดินตะขามารถถึงเหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีขนาดใกล้เคียงกันและมีสัดส่วนเชื้อเพลิงมาก เช่น แกลบ โรงไฟฟ้าที่ใช้ระบบนี้มีหลายแห่งเช่น ร้อยเอ็ดกรีน อุทองไบโอแมส บัวสมหมาย กัลฟิยะลากรีน และโรงงานน้ำตาลบางแห่ง อย่างไรก็ตามโครงสร้างนี้ไม่เหมาะกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงหลายชนิดพร้อมกัน เพราะเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้หมดไม่พร้อมกัน



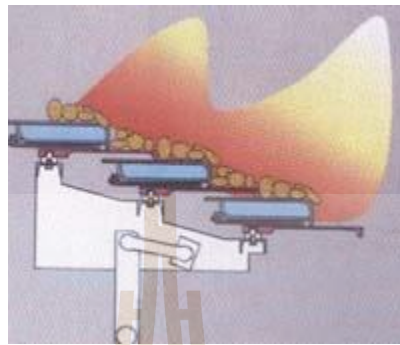
รูปที่ 2.16 ห้องเผาไหม้แบบตะกรับเคลื่อนที่

3. Spreader fired stoker โครงสร้างนี้พัฒนามาจาก Traveling grate stoker โดยนำเชื้อเพลิงมาบดให้ละเอียดและพ่นเข้าเตา มีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นเพราะเชื้อเพลิงสัมผัสอากาศทั่วถึง แต่ต้นทุนค่าก่อสร้างสูงเช่นกัน ระบบนี้มีเชื้ออยู่ที่เดียวคือ บ.เอทีไบโอพาวเวอร์ จ.พิจิตร



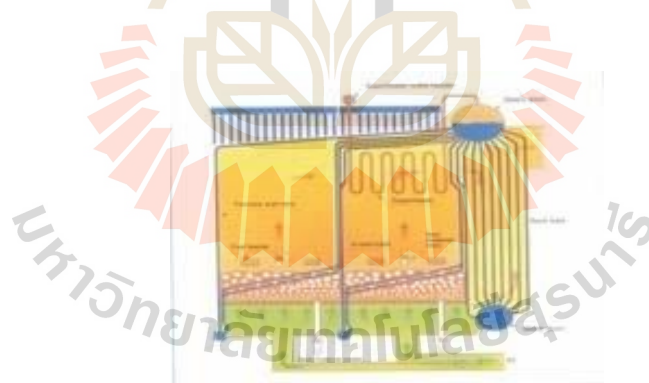
รูปที่ 2.17 ห้องเผาไหม้แบบ Spreader stoker

4. Step grate stoker มีโครงสร้างคล้ายกับขั้นบันได เชื้อเพลิงจะถูกผลักลงทีละขั้นทำให้มีโอกาสพลิกไปมา ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น เหมาะกับการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิด ติดตั้งในโรงไฟฟ้ามุ่งเจริญพร และบัวใหญ่ไบโอพาวเวอร์



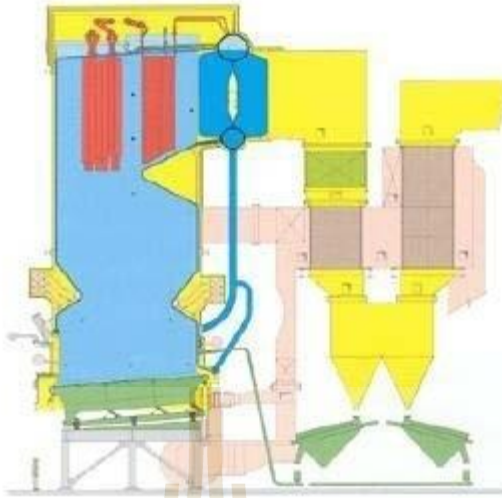
รูปที่ 2.18 ห้องเผาไหม้แบบขั้นบันได

5. Fluidized bed ใช้ทรายเป็นตัวช่วยในการเผาไหม้ เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิดพร้อมกัน ดังนั้นราคาก่อสร้างค่อนข้างสูง ติดตั้งในโรงไฟฟ้าไบโอแมสพาวเวอร์ บริษัทแอดวานซ์ อะโกร และไทยพาวเวอร์ซัพพลาย



รูปที่ 2.19 ห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

6. Vibrating grate stoker ตะกรับจะสั่นเพื่อให้เชื้อเพลิงไหลลงสะดวก เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ระบบนี้มีใช้อยู่ 3 โรงคือ บ.ภูเขียวไบโอ-เอ็นเนอร์ยี บ.ด่านช้างไบโอ-เอ็นเนอร์ยี และโรงงานน้ำตาลขอนแก่น ซึ่งทั้งสามโรงเป็นโรงงานน้ำตาลทั้งหมด



รูปที่ 2.20 ห้องเผาไหม้แบบตะกรับสั้น

2.7 การประเมินประสิทธิภาพการผลิตความร้อนและไอน้ำ

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ (thermal efficiency %) การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการวิจัยนี้ อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน DIN EN 2032 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหาได้จาก ค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำได้รับ วัตถุประสงค์หลักที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำและอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง แล้วนำมาคำนวณหาดังสมการที่ (2) - (4)

$$\eta_{th} = \frac{Q_{out}}{Q_f} \times 100 \quad (2.2)$$

$$Q_f = (m_f (HHV)) \quad (2.3)$$

$$Q_{out} = (m_{H_2O} \cdot C_{p_{H_2O}} (T_2 - T_1)) \quad (2.4)$$

η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
HHV	คือ	ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (High heating value, kJ/kg)
Q_f	คือ	ปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าระบบ (kJ)
Q_{out}	คือ	ปริมาณความร้อนที่ออกจากระบบ (kJ)
m_{H_2O}	คือ	มวลของน้ำที่ใช้ในการทดลอง (kg/hr)
$C_{p_{H_2O}}$	คือ	ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg. $^{\circ}$ C)

ประสิทธิภาพของ Boiler (Boiler Efficiency %)

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{Water} (h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel} (HHV)} \quad (2.5)$$

\dot{m}_{Water}	คือ	อัตราการผลิตไอน้ำ
\dot{m}_{fuel}	คือ	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง
h_{water}	คือ	เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน
h_{Steam}	คือ	เอนทาลปีของไอน้ำ
HHV	คือ	ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (High Heating Value, kJ/kg)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนมีหลายรูปแบบทั้งทางด้านความร้อนโดยการเผาตรง การผลิตไปเป็นน้ำมัน และการนำผลิตเป็นแก๊สชีวภาพจากกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งส่วนใหญ่การใช้ประโยชน์จากชีวมวลจะเป็นการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน โดยส่วนใหญ่จะเป็น เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้กับเครื่องกำเนิดไอน้ำ

ทั้งนี้ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย เช่น การกระจายตัวของแหล่งชีวมวล ขนาด ความชื้น ความหนาแน่น ลังเจ็บบน ปริมาณขี้เถ้า/องค์ประกอบในเถ้า ดังนั้น การนำชีวมวลมาผลิตพลังงานไฟฟ้าความร้อน อาทิเช่น ชานอ้อย ขอด/ใบอ้อย เปลือกไม้ยูคาลิปตัส เหง้ามันสำปะหลัง จำเป็นต้องพิจารณา ความยาก/ง่าย ของการเข้าถึงเชื้อเพลิง คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทางด้านกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ตลอดจน กระบวนการแปรรูปของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการใช้งาน โดยรวมที่ดีที่สุด จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลและการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาใช้ประโยชน์สามารถสรุปได้ดังนี้

วีรัชย์ อาหาญ และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (ระดับชุมชน) ซึ่งวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาหาแนวทางการบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลที่กระจายอยู่ตาม ไร่ นา สวนเกษตรที่เหมาะสม สำหรับรองรับการขยายตัวของความต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลในอนาคต โดยพัฒนาระบบการจัดการห่วงโซ่อุปทานของเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass supply chain management system) ที่เหมาะสมกับประเทศไทย ซึ่งประกอบไปด้วยรูปแบบ และเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลดังกล่าว พร้อมทั้งจัดทำนโยบาย และแผนการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลระดับชุมชน โดยเน้นการมีส่วนร่วมของผู้ผลิต และผู้ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล รวมถึงศึกษาผลกระทบของการ

กำหนดนโยบาย และทำการเสนอรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับประเทศ การศึกษาแนวทางบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (ระดับชุมชน) จะเน้นเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ที่กระจัดกระจายอยู่ในไร่ นา สวนเกษตร ที่จำเป็นต้องมีการจัดการรวบรวมและแปรรูปให้เหมาะสมก่อนที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในเชิงอุตสาหกรรม โดยเน้นเชื้อเพลิงชีวมวล 5 ชนิด คือ ฟางข้าว ใบอ้อย/ยอดอ้อย เหว้งมันสำปะหลัง ทางปาล์ม และทะลายปาล์ม ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลคงเหลือที่มีปริมาณมาก 5 อันดับแรก จากข้อมูลการศึกษาปริมาณชีวมวล คือ ฟางข้าว ใบอ้อย เหว้งมันสำปะหลัง ทางปาล์ม และทะลายปาล์ม

วีรชัย อาหาญ และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาการทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ โดยการทดสอบสมรรถนะของการผลิตไอน้ำ ในการทดสอบได้หาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสต่อปริมาณของไอน้ำที่สามารถผลิตได้ โดยศึกษาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 75,100 และ 125 kg/hr พบว่าสามารถผลิตไอน้ำได้ 235, 330 และ 445 kg-steam/hr ซึ่งที่สภาวะของการเดินระบบที่สามารถผลิตไอน้ำสูงสุด คือการป้อนเชื้อเพลิงในระบบเท่ากับ 125 kg/hr สามารถผลิตไอน้ำ 445 kg-steam/hr ซึ่ง Boiler จะมีประสิทธิภาพประมาณ 50.52% ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสภาวะอื่นๆ การวิเคราะห์มลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ แก๊สไอเสียที่เกิดจากการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีค่า CO เท่ากับ 2,027 (ppm), SO₂ เท่ากับ 28 (ppm), NO_x เท่ากับ 24 (ppm), CO₂ เท่ากับ 1.8 (%), O₂ เท่ากับ 18.18 (%) และ อุณหภูมิปล่องไอเสีย 150 องศาเซลเซียส ผลคือค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานจึงสรุปได้ว่าแก๊สไอเสียที่ได้ออกมามีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย อัตราการเกิดของเสียจากเถ้า คิดเป็น 6% ของปริมาณเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่ใช้ในกระบวนการ คือ ที่การป้อนเชื้อเพลิง 125 kg/hr จะเกิดเถ้าประมาณ 7.5 kg/hr

ณัฐ วรรษ และคณะ (2549) ได้ทำศึกษาว่าในการศึกษาการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชน โดยใช้พลังงานจากไม้โตเร็ว นั้น เพียงต้องการกำลังไฟฟ้าขนาด 50 kWe ถือว่าขนาดเล็กมากจึงเลือกพิจารณา เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง โดยเลือกระบบหม้อต้มไอน้ำขนาด 500 kg/hr พิกัดความดันที่ 22 bar ประกอบชุดกำเนิดไฟฟ้า โดยประสิทธิภาพ เชิงความร้อนโดยรวมของระบบ 12%-15% ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ 2.71-3.31 บาท/kWh

พิริยะ ทองเขียว ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หาปัจจัยทางด้านการเผาไหม้ที่มีผลต่อการทำงานของหม้อไอน้ำโรงไฟฟ้าแม่เหาะซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์บดละเอียดเป็นเชื้อเพลิงเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของหม้อไอน้ำที่คุณสมบัติถ่านหินต่างๆ เก็บ โดยการเก็บข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำจากระบบฐานข้อมูลโรงไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาสมรรถนะของหม้อไอน้ำ จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยทางด้านการเผาไหม้ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ คือ อัตราส่วน

ระหว่าง Primary/Secondary Air, อุณหภูมิอากาศช่วงเผาไหม้, อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง, อุณหภูมิเชื้อเพลิง และแรงดันต่างระหว่างห้องลมกับห้องเผาไหม้.

John Carroll and John Finnan. (2013) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาดเล็กที่ใช้ในครัวเรือน โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 6 ชนิด ได้แก่ Wood Willow Miscanthus Wheat straw Barley straw และ Rape straw ที่สภาวะโหลดการใช้งานเดียวกัน ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 94.45, 93.96, 92.08, 82.98, 85.37 และ 68.46 % ตามลำดับ

Dais et al. (2003) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 4 ชนิด ที่มีค่าความหนาแน่นและค่าความร้อนใกล้เคียงกัน ที่สภาวะโหลดการใช้งานต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำ พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดทั้ง 4 ชนิดให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดที่สภาวะโหลดการใช้งานต่างๆใกล้เคียงกัน และพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำแปรผันตรงกับโหลดการใช้งาน โดยพบว่าประสิทธิภาพสูงสุด 77% ที่โหลดการใช้งาน 13 kW และประสิทธิภาพต่ำสุด 65% ที่โหลดการใช้งาน 3 kW

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาเบื้องต้นพบว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลบางประเภทที่มีความหนาแน่นต่ำและความชื้นสูงควรแปรรูปให้มีความชื้นน้อยลงและมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยการอัดแท่งหรืออัดเม็ด เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงขึ้น

บทที่ 3

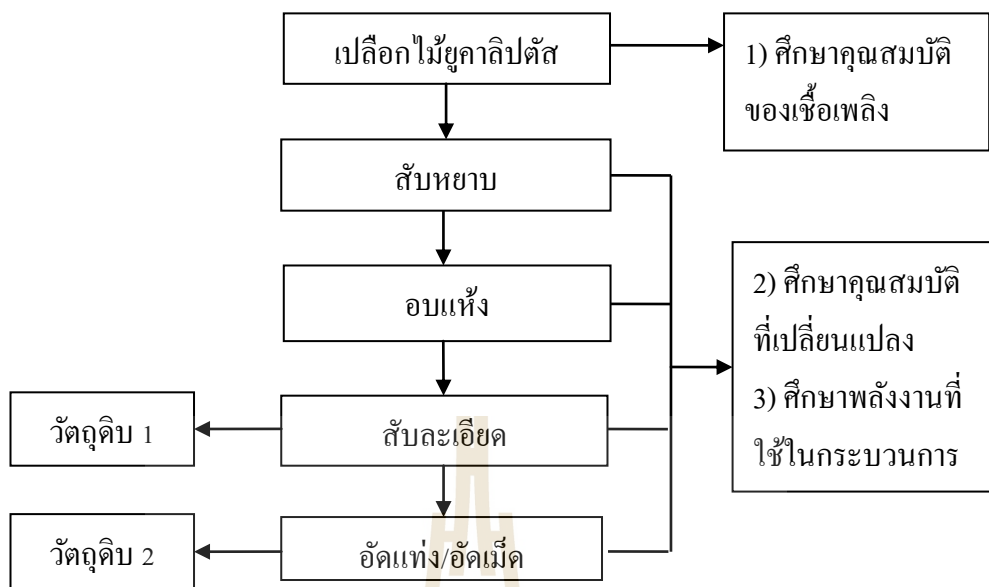
วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง โดยมีขั้นตอนการศึกษาโดยสรุปดังนี้ 1) ศึกษาคุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 2) ศึกษากระบวนการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 3) ศึกษาผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เกิดเมื่อนำเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด $500 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{hr}$

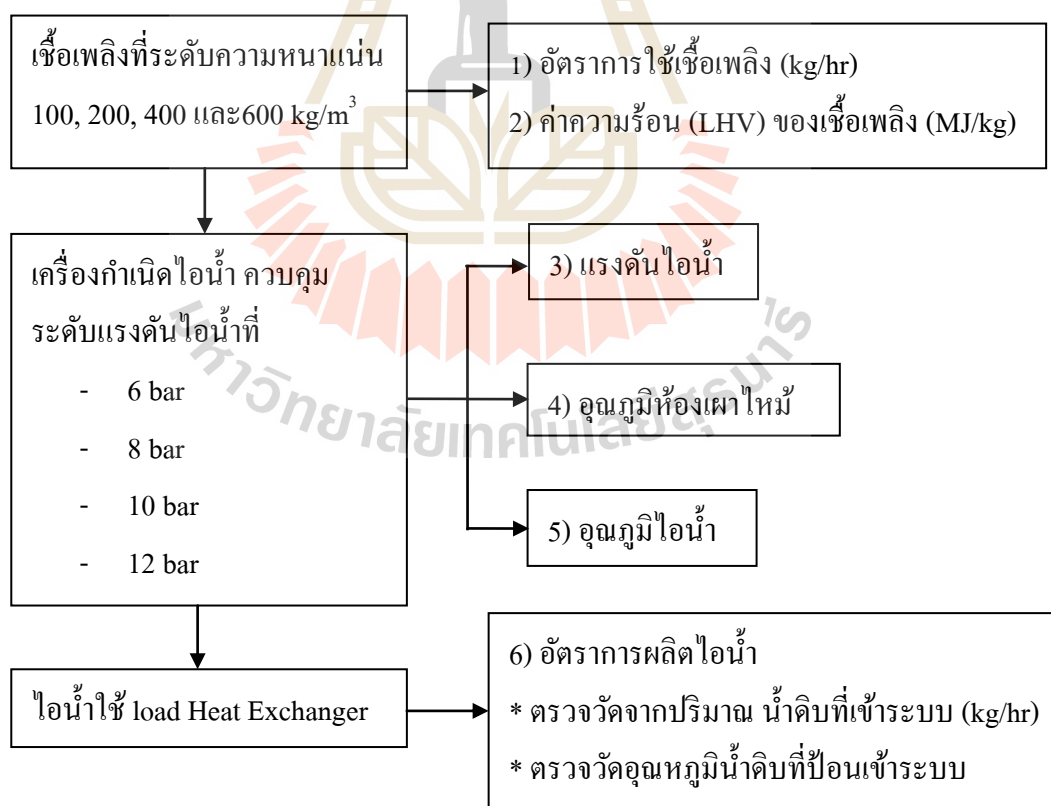
3.1 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการศึกษา

ภาพรวมในการศึกษานี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงจากกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิง ซึ่งประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้จากประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำเมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่นต่างๆ โดยแบ่งการศึกษออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

- 1) การศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ
- 2) การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด $500 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{hr}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การศึกษาการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 3.2 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

สำหรับเครื่อง กำเนิดไอน้ำขนาด 500 kg_{vapor}/hr

3.2 การพัฒนาระบบต้นแบบการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

เปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และมีความชื้นสูง จึงจำเป็นต้องทำการแปรรูปก่อนนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงซึ่งจากการศึกษาพบว่า ต้องทำการแปรรูปขนาดให้มีความสม่ำเสมอ โดยเลือกใช้เครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass chipper)

โดยคุณลักษณะสำคัญของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบเครื่องสับย่อยก่อนทำการอบแห้ง (biomass chipper) ดังแสดงใน ตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อย (biomass chipper)

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
ขนาดเครื่อง (มม.)	660 mm x 640 mm x 1800 mm (กว้างxยาวxสูง)
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 30 Hp (22 kw)
ความเร็วรอบ	900 rpm
กำลังการผลิต	1.4 ton/hr



รูปที่ 3.3 เครื่องหั่นย่อยวัสดุชีวมวล (biomass chipper)

หลังจากการแปรรูปลดขนาดของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสให้มีขนาดที่สม่ำเสมอ จึงทำการอบแห้งเพื่อลดความชื้นเป็นลำดับต่อไปโดยเลือกใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (flash dryer)

โดยคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบพาหะลมเป็นแบบ 2 ห้องอบต่อเนื่องกัน แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ส่วนคุณลักษณะจำเพาะของเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งในส่วนนี้จะทำการศึกษาความชื้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสหลังการอบแห้งผ่านเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม และความสามารถในการอบแห้ง

ตารางที่ 3.2 ข้อมูล/ข้อกำหนดการออกแบบทางวิศวกรรมของเครื่องอบแห้ง

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
จำนวนห้องอบ	2 ห้อง
ขนาดห้องอบ 1	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m สูง 4.6 m
ขนาดห้องอบ 2	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m สูง 4.6 m
ระบบอากาศหมุนเวียน	ต้นกำลัง 3 Hp ความเร็วลม 8.2 m/s
อัตราไหลของอากาศ	0.43 m ³ /s
แหล่งความร้อน	ไอเสียจากเครื่องผลิตไอน้ำ



รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

หลังจากลดความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจนมีความชื้นต่ำ จากนั้นทำการสับย่อยลดขนาดเพื่อให้มีขนาดเหมาะสมกับการอัดเม็ด โดยเลือกใช้เครื่องบดละเอียด (hammer mill)

โดยคุณลักษณะสำคัญของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบเครื่องบดละเอียดดังแสดงใน ตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อยแบบละเอียด

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
ขนาดเครื่อง	660 mm x 640 mm x 800 mm (กว้างxยาวxสูง)
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 40 Hp (30 kw)
ความเร็วรอบ	2,000 – 2,400 rpm
ลักษณะชุดใบมีด	ชุดใบมีด 4 แถว แถวละ 5 ใบ ขนาดลูกดีเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm



รูปที่ 3.5 เครื่องบดละเอียด

หลังจากการลดขนาดของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากเครื่องบดละเอียดแล้ว การอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะใช้เครื่องอัดเม็ด (pellet mill)

โดยคุณลักษณะสำคัญของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบเครื่องบดละเอียดดังแสดงใน ตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 ข้อมูล/ ข้อกำหนดของเครื่องอัดเม็ด

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
ขนาดเครื่อง	1200 mm x 1250 mm x 2000 mm (กว้างxยาวxสูง)
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 40 Hp (30 kw)
ความเร็วรอบ	900 rpm
ลักษณะวงแหวนอัดเม็ด	ขนาดวงแหวนเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 mm ความลึกของวงแหวน 100 mm ความหนาวงแหวน 50 mm ขนาดรูเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 mm



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดเม็ด

3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงจากระบบต้นแบบการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่พัฒนาขึ้นดังรูปที่ 3.7 โดยศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้จากประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด $500 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{hr}$ ที่มีเตาเผาแบบตะกรับยึดติดอยู่กับที่ดังรูปที่ 3.8 ที่ระดับแรงดันไอน้ำต่าง ๆ โดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่นต่าง ๆ ของเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงแบ่งอุปกรณ์และวิธีการทดลองดังนี้



รูปที่ 3.7 ระบบเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 3.8 เครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 500 kg_{vapor}/hr

3.3.1 ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่นและความชื้น และศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate value) ซึ่งเป็นสมบัติที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารที่ระเหยได้ ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 และองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate value) ซึ่งเป็นสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล อันประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932)

3.3.2 ศึกษาการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด ความหนาแน่นและ ความชื้น ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปและ พลังงานที่ใช้ในการแปรรูปในกระบวนการต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย การลดขนาด การลดความชื้น และการเพิ่มความหนาแน่น จากระบบต้นแบบการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่พัฒนาขึ้น ดังรูปที่ 3.7

3.3.3 ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในเครื่องกำเนิดไอน้ำ

มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ ยูคาลิปตัสหลังจากผ่านการแปรรูปจากการลดความชื้นจากการอบแห้ง และการเพิ่มความหนาแน่น จากการอัดเม็ด โดยแบ่งการศึกษาดังนี้

1) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ ยูคาลิปตัส

การศึกษาค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิง เปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อน จากตัวอย่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับ ความชื้นต่าง ๆ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดวิเคราะห์ได้แก่ ตู้อบแห้งแบบลมร้อน, เครื่องชั่ง ทศนิยมสองตำแหน่ง และเครื่อง Bomb calorimeter ดังแสดงในรูปที่ 3.9



ก) ตู้อบแห้งแบบลมร้อน ข) เครื่องชั่งสองตำแหน่ง ค) เครื่อง Bomb calorimeter

รูปที่ 3.9 เครื่องตรวจวัดความชื้น และเครื่อง Bomb calorimeter

2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ ยูคาลิปตัสกับความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

การศึกษาค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ ยูคาลิปตัสกับค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยวิเคราะห์หาค่าความ

ร้อน จากตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ความหนาแน่นต่างๆ แล้วมาคำนวณกับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ตัวอย่างแล้วนำค่ามาวิเคราะห์ความสัมพันธ์

3) การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

โดยประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการทดสอบตามมาตรฐาน อ้างอิง การทดสอบตามมาตรฐาน ASME PTC-4-1 Power test code for steam generating direct method หรือ Input-output method ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหาได้จากค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำได้รับ โดย วัตถุประสงค์ของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ อัตราการผลิตไอน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง แล้วนำมา คำนวณหาตามสมการที่ (3.1) พารามิเตอร์ที่ควบคุมและตรวจวัดในกระบวนการทดสอบการประเมิน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{Water} (h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel} (LHV)} \quad (3.1)$$

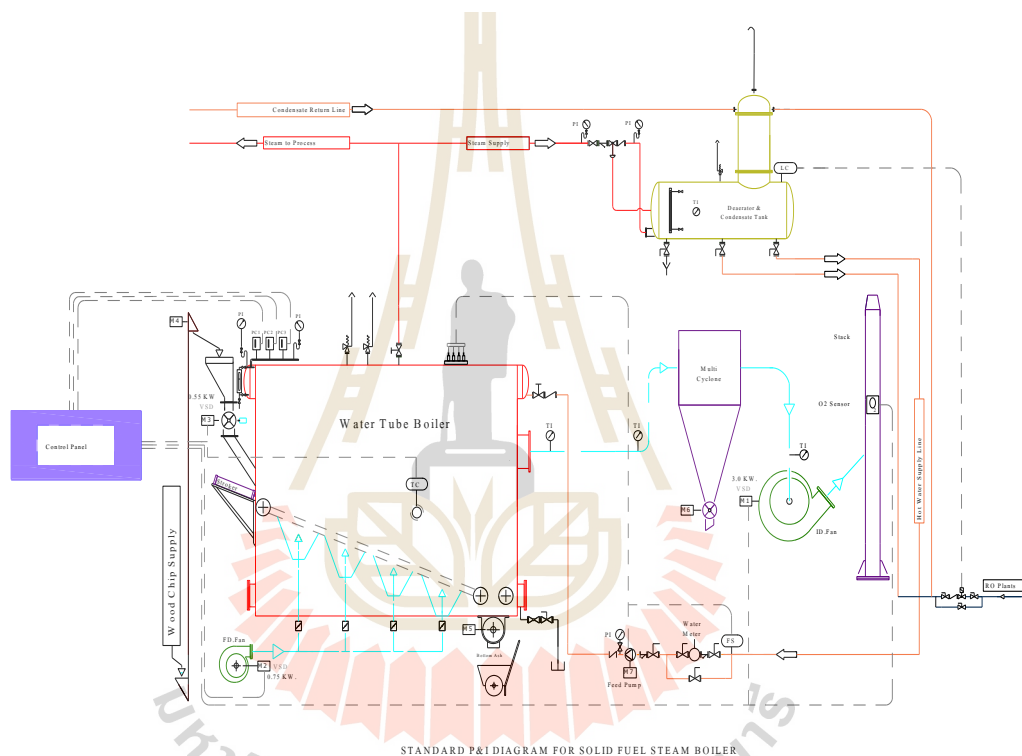
\dot{m}_{Water}	คือ อัตราการผลิตไอน้ำ มีหน่วยเป็น kg/h
\dot{m}_{fuel}	คือ อัตราการการใช้เชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น kg/h
h_{water}	คือ เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน มีหน่วยเป็น kJ/kg
h_{Steam}	คือ เอนทาลปีของไอน้ำ มีหน่วยเป็น kJ/kg
LHV	คือ ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีหน่วยเป็น kJ/kg

โดยการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนทำการทดสอบโดยการนำ เชื้อเพลิงเปลือกไม้ ยูคาลิปตัสทั้ง 4 ระดับความหนาแน่น คือ 100, 200, 400 และ 600 kg/m³ ตามลำดับมาทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง โดยทำการทดสอบที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำคือ 6, 8, 10 และ 12 bar ตามลำดับ โดยทำการจัดเก็บข้อมูลตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดการจัดเก็บข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไอน้ำ

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
น้ำหนักเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ	ชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงทั้งหมดที่ป้อนเข้าระบบ	อัตราการใช้เชื้อเพลิง
น้ำหนักน้ำที่ป้อนเข้าระบบ	ชั่งน้ำหนักของน้ำทั้งหมดที่ป้อนเข้าระบบ	อัตราการผลิตไอน้ำ
อุณหภูมิน้ำที่ป้อนเข้าระบบ	วัดอุณหภูมิของน้ำดิบ	เอนทาลปีของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ
แรงดันไอน้ำ	ตรวจวัดแรงดันไอน้ำในระบบ	เอนทาลปีของไอน้ำ
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	วัดค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb calorimeter	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตความร้อนและไอน้ำ จะใช้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ ซึ่งเป็นระบบผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของชีวมวล เพื่อผลิตไอน้ำสำหรับเครื่องจักรกังหันไอน้ำ ตามการทำงานของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) ได้ถูกออกแบบเพื่อผลิตไอน้ำที่มีสภาวะการทำงานที่ ความดันสูงสุด 22 bar สามารถผลิตไอน้ำได้สูงสุด 500 kg/hr มีระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกินแบบอัตโนมัติโดยสัมพันธ์กับการควบคุมอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมน้ำป้อนเป็นแบบอัตโนมัติ มีระบบการควบคุมความปลอดภัยแบบอัตโนมัติ ดังแสดงใน รูปที่ 3.10-3.11 และแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.10 ระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำ



รูปที่ 3.11 ต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำ

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน

รายการ	รายละเอียด
ชนิดของเครื่องกำเนิดไอน้ำ	ชนิด water-tube boiler
แรงดันใช้งานสูงสุด	22 bar
กำลังการผลิตไอน้ำสูงสุด	500 kg/hr
ระบบเตาเผาและระบบป้อนเชื้อเพลิง	แบบตะกรับ

ทั้งนี้ส่วนประกอบของ ต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

■ ระบบการผลิตพลังงานความร้อน

- ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบตะกรับ
- ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบ screw conveyor พร้อมถังพักเชื้อเพลิง
- ระบบลำเลียงขี้เถ้าแบบอัตโนมัติ (automatic screw conveyor)
- ระบบวัด-ควบคุม เช่น เซอร์อุณหภูมิจึง เซนเซอร์แรงดัน เซนเซอร์ออกซิเจน
- ระบบทำความสะอาดแก๊สไอเสีย ระบบดักเขม่า ไซโคลน



ก. ห้องเผาไหม้แบบตะกรับ



ข. ระบบทำความสะอาดแก๊สไอเสีย



ค. ระบบตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิและแรงดัน ง. ระบบป้อนเชื้อเพลิงพร้อมเครื่องชั่ง



รูปที่ 3.12 ระบบผลิตพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ

■ ระบบการผลิตและใช้ไอน้ำ

- ชุดผลิตน้ำสะอาดด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (reverse osmosis)
- ชุดเครื่องกำเนิดไอน้ำ
- ชุดระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบวัด เซนเซอร์อุณหภูมิ เซนเซอร์แรงดัน อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำ
- ชุดเติมและควบคุมปริมาณสารเคมีเพื่อป้องกันตะกรัน



ก. ชุดผลิตน้ำสะอาด



ข. ชุดควบคุม และวัดปริมาณน้ำอัตโนมัติ



ค. ชุดตรวจวัดปริมาณน้ำและอุณหภูมิน้ำที่ป้อนเข้าระบบ

รูปที่ 3.13 ระบบการผลิตและใช้น้ำ

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส และศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยการลดขนาด การลดความชื้น และการอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ดังนี้ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงเมื่อผ่านกระบวนการลดความชื้น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นพลังงานกับค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่นต่างๆ และศึกษาผลของประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เกิดเมื่อนำเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่นต่างๆ ไปทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ระดับแรงดันต่าง ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (ขนาด ความหนาแน่น และความชื้น)

เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส จะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือมีลักษณะเป็นชิ้น และลักษณะเป็นเส้นใยดังแสดงใน รูปที่ 4.1 ซึ่งลักษณะทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในแต่ละโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะใกล้เคียงกันทุกโรงงาน โดยพบว่าค่าความหนาแน่นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นชิ้นมีค่า 127.45 kg/m^3 และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีค่า 215.4 kg/m^3 ซึ่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นจะมีความหนาแน่น (bulk density) มากกว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่มีลักษณะเป็นชิ้น เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กกว่า จึงทำให้มีความหนาแน่นมากกว่า แต่โดยภาพรวมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 2 ประเภทก็ยังมีค่าความหนาแน่นน้อย นอกจากนี้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีความชื้นค่อนข้างสูง (59-63% w.b.) ดังแสดงข้อมูลใน ตารางที่ 4.1



(ก) เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นชิ้น

(ข) เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใย

รูปที่ 4.1 ลักษณะของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ประเภทเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ความชื้น (%wb)	ความหนาแน่น (kg /m ³)	ลักษณะทั่วไป(ขนาด)
ประเภทชิ้น	59.53	127.45	ยาว 20-40 ซม. หนา 4-7 มม.
ประเภทเส้นใย	62.97	215.40	มีลักษณะเป็นเส้นใย

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมี

4.1.2.1 องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate value)

เป็นสมบัติเฉพาะตัวของเชื้อเพลิงชีวมวล ที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารที่ระเหยได้ ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 มีค่าร้อยละ 61.45, 69.79, 8.94 และ 21.27 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสมบัติที่นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนในปริมาณของเถ้า เป็นค่าที่แสดงถึงของเสียที่เกิดขึ้นจากการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงดังแสดงค่าใน ตารางที่ 4.2

4.1.2.2 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate value)

เป็นสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932) ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน โดยมีผลการวิเคราะห์ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน มีค่าเฉลี่ยที่ร้อยละ 38.57, 3.86, 0.51, 0.31 และ 47.81 ตามลำดับ ดังแสดงค่าใน ตารางที่ 4.2 ทั้งนี้ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลต่อค่าความร้อน คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน

เนื่องจากคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในกระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม หากมีปริมาณไฮโดรเจนมาก ในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะเกิดน้ำมากเช่นกัน ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำส่วนนี้ดูดซับพลังงาน ใบบางส่วน พลังงานที่ระบบปลดปล่อยออกมาจึงลดลง

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง		การทดลองนี้	อ้างอิง ¹⁾	อ้างอิง ²⁾	อ้างอิง ³⁾
ร้อยละของความชื้นเริ่มต้น(wet basis)		61.45	-	-	-
องค์ประกอบ แบบประมาณ (dry basis)	ร้อยละของสารระเหย (%VM)	69.79	78.00	58.68	65.70
	ร้อยละของเถ้า (%Ash)	8.94	4.80	8.20	19.00
ร้อยละของคาร์บอนคงตัว (%FC)		21.27	17.20	27.77	15.30
ร้อยละของคาร์บอน (%C)		38.57	48.70	43.40	43.68
ร้อยละของไฮโดรเจน (%H)		3.86	5.70	5.34	8.14
ร้อยละของไนโตรเจน (%N)		0.51	0.30	0.00	0.43
ร้อยละของซัลเฟอร์(%S)		0.31	0.05	1.07	-
ร้อยละของออกซิเจน (%O)		47.81	45.3	50.19	47.75

หมายเหตุ ¹⁾ จากงานวิจัยของ Stanislav V. Vassilev ,David Baxter, Lars K. Andersen, Christina G.

Vassileva a (2010)

²⁾ จากผลการวิเคราะห์ของ บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน)

³⁾ จากงานวิจัยของ Vikrant Sarin,K.K. Plant (2006)

4.1.2.3 ค่าความร้อน (heating value) และความหนาแน่นพลังงาน (energy density)

จากการทดสอบหาค่าความร้อน (LHV) ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่า เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีค่าความร้อน 8,159.20 kJ/kg และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบชิ้น ค่าความร้อน 8,966.52 kJ/kg เนื่องจากค่าความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบชิ้นมีค่าต่ำกว่าแบบเส้นใย ส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าแบบชิ้น เนื่องมาจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชิ้น โดยมีค่า 1,766.28 MJ /m³ และ 1,147.05 MJ /m³ ตามลำดับดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.3

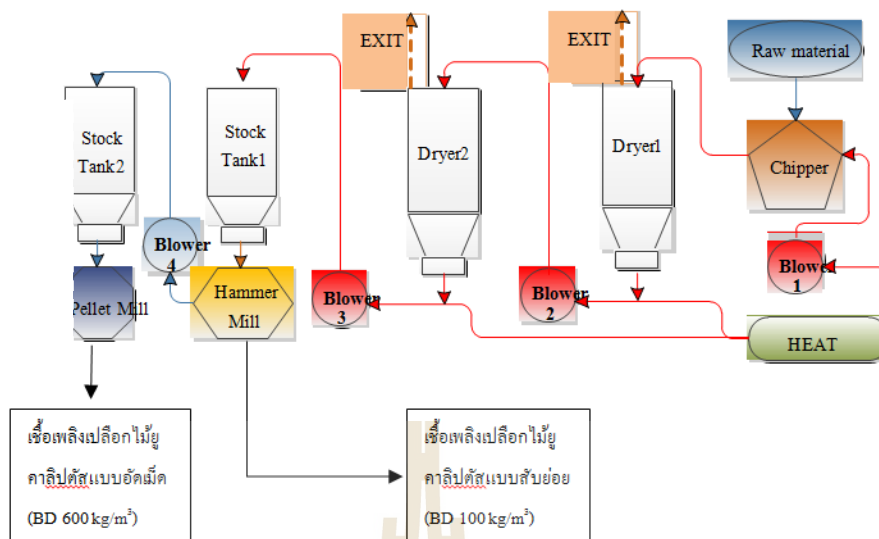
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและความหนาแน่นพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ประเภทชีวมวล	ความชื้น (%wb)	ค่าความร้อน (kJ/kg)	ความหนาแน่น (kg /m ³)	ความหนาแน่นพลังงาน (MJ /m ³)
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบชื้น	56	8,966.52	127.45	1,147.05
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใย	60	8,159.20	215.40	1,766.28

ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่น (bulk density) และความหนาแน่นพลังงาน (energy density) แล้ว เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมากกว่าแบบชื้น เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง และมีขนาดเล็กกว่าแบบชื้นจึงทำการสับย่อยได้ง่ายและมีความหนาแน่นสูงจึงทำให้มีคูล์ค่าต่อการขนส่ง

4.2 ผลการศึกษาการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากการศึกษาคุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดเส้นใยมีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาเพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล แต่เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีความชื้นสูง และความหนาแน่นต่ำ จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแปรรูปก่อน ซึ่งกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสนั้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ 1) การลดขนาดและลดความชื้น 2) การอัดเม็ด ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.2 ซึ่งจากการศึกษาพบว่าในแต่ละขั้นตอนของการแปรรูปส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทำให้ได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 2 ประเภทคือ 1) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย และ 2) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด



รูปที่ 4.2 กระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

4.2.1 เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย

นำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมาทำการลดขนาดด้วยเครื่องสับย่อยวัสดุชีวมวล (Biomass chipper) ด้วยอัตราการสับย่อย 150 kg/hr จากนั้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพลาสมา (Flash Dryer) ด้วยอัตราการป้อนเดียวกัน หลังจากการอบแห้งเพื่อลดความชื้นแล้วเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะถูกสับย่อยอีกครั้งโดยเครื่องสับละเอียด (Hammer Mill) ดังรูปที่ 4.3 จากกระบวนการดังกล่าวจะได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีความหนาแน่น 100 kg/m³ ความชื้น 13% w.b. โดยกระบวนการนี้ใช้พลังงานในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 2.30 MJ/kg ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

4.2.2 เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด

นำเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อยจากกระบวนการข้างต้นมาทำการเพิ่มความหนาแน่นด้วยเครื่องอัดเม็ด (pellet mill) ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด ที่มีลักษณะเป็นเม็ดที่มีความหนาแน่น 600 kg/m^3 ความชื้น $11\% \text{ w.b.}$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vermu et al. (2011) และ Obernberger and Thek. (2004) จะมีค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในช่วง $480\text{-}700 \text{ kg/m}^3$ โดยกระบวนการนี้ใช้พลังงานในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 0.68 MJ/kg ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 เครื่องอัดเม็ด

ตารางที่ 4.4 กระบวนการแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ขั้นตอนการแปรรูป	ประเภท	ลักษณะทางกายภาพ		พลังงานที่ใช้ (MJ/kg)
		ความชื้น (%w.b.)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	
1) การลดขนาดและลดความชื้น	สับย่อย	13%	100	2.30
2) การอัดเม็ด	อัดเม็ด	11%	600	2.98



(ก) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย (ข) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด

รูปที่ 4.5 เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย และแบบอัดเม็ด

ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ได้ทำการแบ่งความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบออกเป็น 4 ระดับ คือ 100, 200, 400 และ 600 kg/m³

ซึ่งจากกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงทำให้ได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสคือ 2 ชนิดคือ 1) เชื้อเพลิงแบบสับย่อย ซึ่งมีระดับความหนาแน่นอยู่ที่ 100 kg/m³ และ 2) เชื้อเพลิงแบบอัดเม็ด ซึ่งมีระดับความหนาแน่นอยู่ที่ 600 kg/m³ ดังนั้นในการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอีก 2 ระดับความหนาแน่น คือ 200 และ 400 kg/m³ จึงทำการเตรียมโดยการผสมเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ดและแบบสับย่อยเข้าด้วยกัน โดยมีอัตราส่วนการผสมคือ เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น 200 kg/m³ ได้จากการผสมเชื้อเพลิงแบบสับย่อย 80% กับเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ด 20% และเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น 400 kg/m³ ได้จากการผสมเชื้อเพลิงแบบสับย่อย 40% กับเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ด 60% ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดสอบ

ระดับความหนาแน่น	ประเภทเชื้อเพลิงที่ได้	ความชื้น (%w.b.)
BD 100 kg/m ³	เชื้อเพลิงแบบสับย่อย	13
BD 200 kg/m ³	เชื้อเพลิงแบบผสม (สับย่อย 80% : อัดเม็ด 20%)	12.6
BD 400 kg/m ³	เชื้อเพลิงแบบผสม (สับย่อย 40% : อัดเม็ด 60%)	11.8
BD 600 kg/m ³	เชื้อเพลิงแบบอัดเม็ด	11

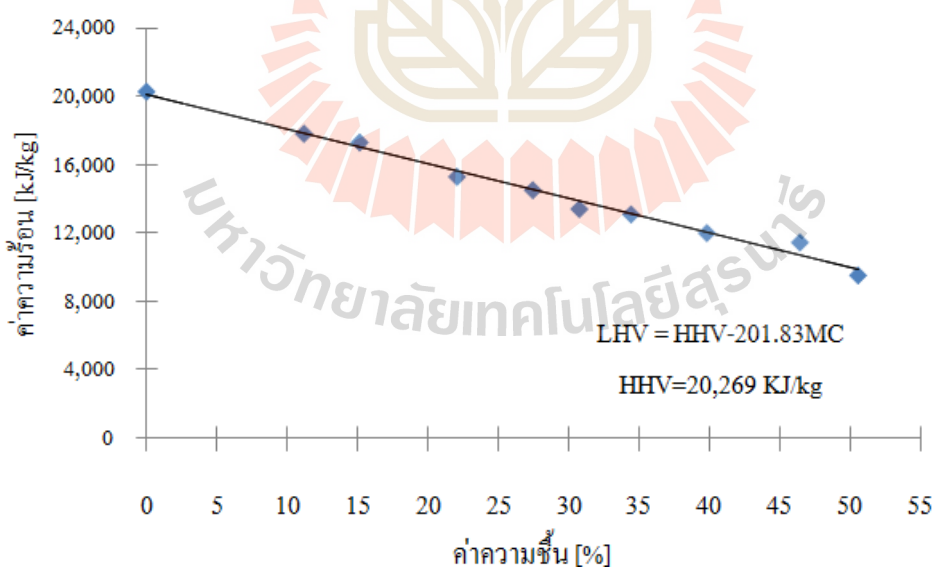
4.3 ผลการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

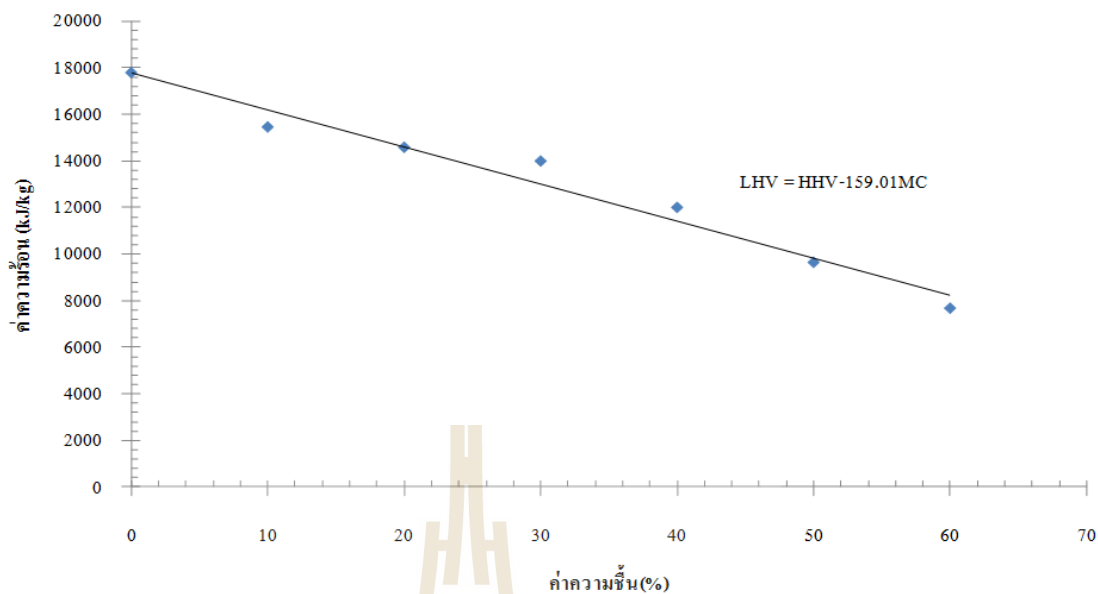
การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อน จากตัวอย่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความชื้น 0, 11.2, 15.16, 22.09, 27.48, 30.79, 34.47, 39.87, 46.48 และ 50.62% ได้ค่าความร้อน 20,269 17,826 17,315 15,321 14,542 13,444 13,129 12,045 11,495 และ 9,582 kJ/kg ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ตารางที่ 4.6 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

ตารางที่ 4.6 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้นต่าง ๆ

ลำดับที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ความชื้น	0	11.2	15.16	22.09	27.48	30.79	34.47	39.87	46.48	50.62
LHV(kJ/kg)	20,269	17,826	17,315	15,321	14,542	13,444	13,129	12,045	11,495	9,582



(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของการศึกษานี้



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของ สาวตรี คำหอม (2551)

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากการศึกษานี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับงานของ สาวตรี คำหอมและวีรัชย์ อัจหาญ (2551) แต่เนื่องจากตัวอย่างเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่นำมาทดสอบค่าความร้อนเป็นคนละชุดกันดังนั้น อาจมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของตัวอย่างเนื่องจากการเสื่อมสภาพทางธรรมชาติ เช่น การย่อยสลาย เนื่องจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสส่วนใหญ่จะถูกจัดเก็บไว้กลางแจ้ง ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษานี้เนื่องจากเป็นชุดเชื้อเพลิงชุดเดียวกับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่นำมาทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ

สมการความสัมพันธ์

$$LHV = HHV - 201.83MC \quad (4.1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
 HHV คือ ค่าความร้อนของเปลือกไม้ความชื้น 0% มีค่า 20,269 kJ/kg

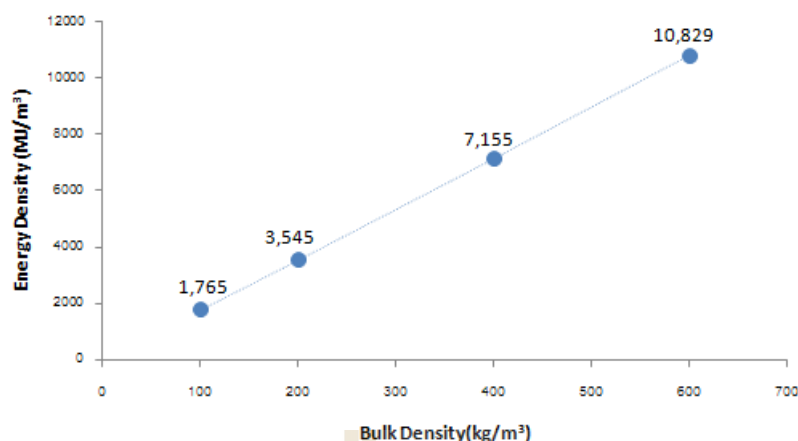
4.3.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส กับความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากหัวข้อการศึกษาการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่า การแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากกระบวนการลดขนาดและการลดความชื้นทำให้ได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อยที่มีค่าความชื้นที่มีความชื้น 13% และมีค่าความหนาแน่น 100 kg/m^3 และจากกระบวนการอัดเม็ดทำให้ได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด ที่มีความชื้น 11% และมีความหนาแน่น 600 kg/m^3 และเมื่อนำเชื้อเพลิงทั้งสองแบบมาผสมกันในอัตราส่วน 80:20 ลำดับทำให้ได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีค่าความชื้น 12.6% และค่าความหนาแน่นที่ 200 kg/m^3 และผสมในอัตราส่วน 40:60 ลำดับทำให้ได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีค่าความชื้น 11.8% และค่าความหนาแน่นที่ 400 kg/m^3

และนำเชื้อเพลิงทั้ง 4 ระดับความหนาแน่นมาวิเคราะห์ค่าความร้อนตามสมการที่ 4.1 ได้ค่าความร้อน ดังนี้ เชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่น 100 kg/m^3 มีค่าความร้อน 15.71 MJ/kg จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเป็น $1,571 \text{ MJ/m}^3$ เชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่น 200 kg/m^3 มีค่าความร้อน 15.77 MJ/kg จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มเป็น $3,154 \text{ MJ/m}^3$ เชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่น 400 kg/m^3 มีค่าความร้อน 15.90 MJ/kg จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มเป็น $6,360 \text{ MJ/m}^3$ และเชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่น 600 kg/m^3 มีค่าความร้อน 16.03 MJ/kg จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานเพิ่มเป็น $9,618 \text{ MJ/m}^3$ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า Energy Density ที่ค่าความหนาแน่นและค่าความชื้นต่างๆ ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่นำมาทำการทดสอบ

ระดับความหนาแน่น	ความชื้น (%wb)	ค่าความร้อน LHV(MJ/kg)	ค่าความหนาแน่น พลังงาน (MJ/m ³)
BD 100 kg/m^3	13.0	17.65	1,765
BD 200 kg/m^3	12.6	17.73	3,545
BD 400 kg/m^3	11.8	17.88	7,155
BD 600 kg/m^3	11.0	18.05	10,829



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานและค่าหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ค่าความชื้นต่างๆ ที่นำมาทำการทดสอบ

4.3.3 การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนทำการทดสอบโดยการนำเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 4 ระดับความหนาแน่น คือ 100, 200, 400 และ 600 kg/m³ ตามลำดับ

มาทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง โดยทำการทดสอบที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำคือ 6, 8, 10 และ 12 bar ตามลำดับ

โดยทำการตรวจวัด ค่าปริมาณเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ ปริมาณไอน้ำที่ได้ (ตรวจวัดจากปริมาณน้ำที่ป้อนระบบ) และค่าอุณหภูมิของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (ผลการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำที่ป้อนเข้ามีค่าคงที่คือ 24 C) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ในแต่ละระดับแรงดันเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำตามสมการที่ 3.1 ได้ผลการทดสอบตามลำดับดังนี้

ตารางที่ 4.8 การจัดการตัวแปรและวิธีการหาข้อมูลต่างๆของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

ข้อมูล	วิธีการ	ตัวแปรที่ใช้
1. อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	เก็บข้อมูลและคำนวณ	น้ำหนักของเชื้อเพลิง, เวลา
2. อัตราการผลิตไอน้ำ	เก็บข้อมูลและคำนวณ	น้ำหนักของน้ำที่ป้อน, เวลา
3. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำ	คำนวณ	อัตราการผลิตไอน้ำ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ ความดันและอุณหภูมิของไอน้ำ

1) เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 100 kg/m³ และมีความหนาแน่นพลังงาน 1,765 MJ/m³ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแบบสับย่อย กับเครื่องกำเนิดไอน้ำ ขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง ที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

ในการทดสอบเผาเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำที่ระดับแรงดันไอน้ำ 6, 8, 10 และ 12 bar มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ 84.6, 128, 170 และ 321 kg/hr ตามลำดับ โดยสามารถผลิตไอน้ำได้ 150, 202.8, 241.6 และ 382.2 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละระดับแรงดันได้ 26.76, 24.00, 21.59 และ 18.13% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

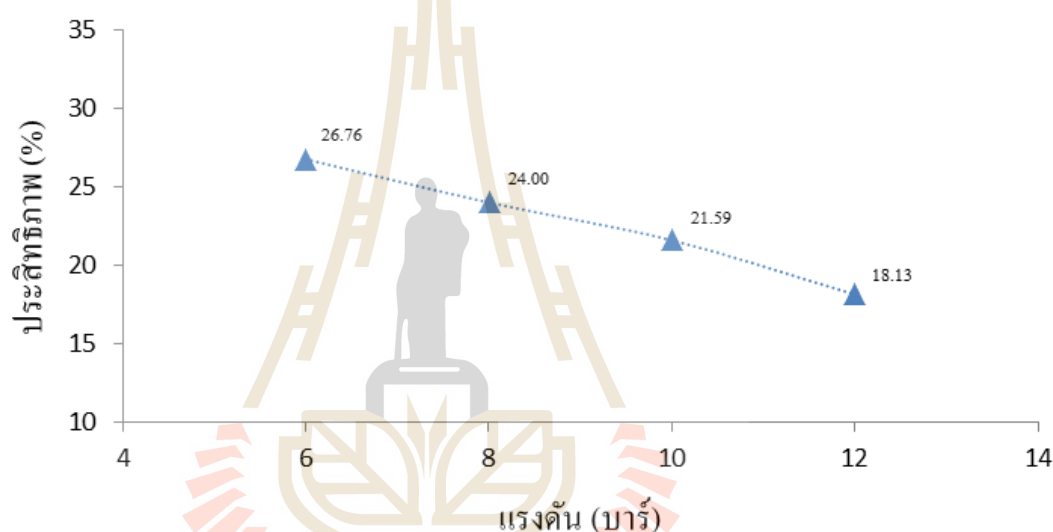
ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่แรงดันสูงขึ้นต้องใช้เชื้อเพลิงในการรักษาแรงดันในระบบเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อต้องการเพิ่มแรงดันไอน้ำเป็น 2 เท่าจาก 6 bar ไปเป็น 12 bar ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็น 3.8 เท่า เนื่องจากที่ระดับแรงดันไอน้ำสูงขึ้นเครื่องกำเนิดไอน้ำจึงต้องการพลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อรักษาแรงดันไอน้ำในระบบ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 100 kg/m³ มีค่าต่ำ (1,765 MJ/m³) จึงจำเป็นต้องป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นปริมาณมาก แต่ห้องเผาไหม้มีปริมาตรเท่าเดิมทำให้เชื้อเพลิงเต็มห้องเผาไหม้ ดังนั้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจึงเป็นไปได้ช้าและไม่ทั่วถึงเพราะการทับถมกันของเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.8 ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกจากการเผาไหม้มีปริมาณไม่มากตามต้องการส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันไอน้ำสูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การทับถมกันของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้
ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 100 kg/m³

BD 100 Kg/m ³ 11%MC	ระดับแรงดันไอน้ำ			
	6	8	10	12
ปริมาณเชื้อเพลิง (Kg/hr)	84.6	128	170	321
ปริมาณไอน้ำ (Kg/hr)	150	202.8	241.6	382.2
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	26.76	24.00	21.59	18.13



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

2) เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 200 kg/m³

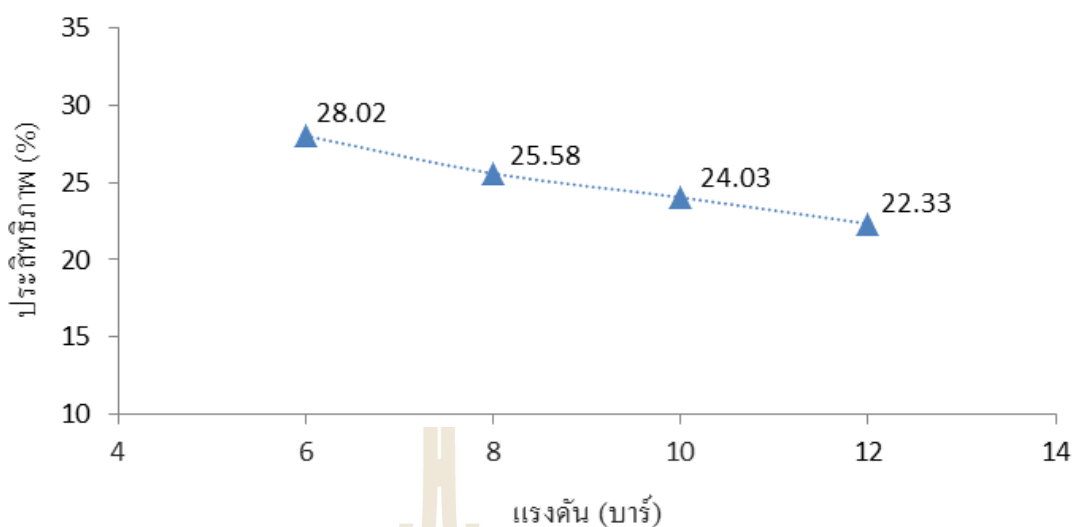
จากการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 200 kg/m³ และมีความหนาแน่นพลังงาน 3,545 MJ/m³ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแบบผสม (สับย่อย 80%:อัดเม็ด 20%) เพื่อต้องการเพิ่มค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง กับเครื่องกำเนิดไอน้ำ ขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง ที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

ในการทดสอบเผาเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำที่ระดับแรงดันไอน้ำ 6, 8, 10 และ 12 bar มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ 74, 110, 180 และ 230 kg/hr ตามลำดับ โดยสามารถผลิตไอน้ำได้ 138, 186.6, 286 และ 338.9 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละระดับแรงดันได้ 28.02%, 25.58%, 24.03% และ 22.33% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

จากผลการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 200 kg/m^3 (ED $3,545 \text{ MJ/m}^3$) ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 100 kg/m^3 (ED $1,765 \text{ MJ/m}^3$) ในทุกระดับแรงดัน แต่ยังมีแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนใกล้เคียงกับการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความหนาแน่น 100 kg/m^3 คือ ที่แรงดันสูงขึ้นต้องใช้เชื้อเพลิงในการรักษาแรงดันในระบบเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อต้องการเพิ่มแรงดันไอน้ำเป็น 2 เท่าจาก 6 bar ไปเป็น 12 bar ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 เท่า เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในการทดสอบข้างต้น ซึ่งแนวโน้มของประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันไอน้ำสูงขึ้นมีประสิทธิภาพต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 200 kg/m^3

BD 200 Kg/m^3 12.6%MC	ระดับแรงดันไอน้ำ			
	6	8	10	12
ปริมาณเชื้อเพลิง (Kg/hr)	74	110	180	230
ปริมาณไอน้ำ (Kg/hr)	138	186.6	286	338.9
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	28.02	25.58	24.03	22.33



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 200 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

3) เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 400 kg/m^3 และมีความหนาแน่นพลังงาน $7,155 \text{ MJ/m}^3$ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแบบผสม (สับย่อย 40%:อัดเม็ด 60%) เพื่อต้องการเพิ่มค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง กับเครื่องกำเนิดไอน้ำ ขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง ที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

ในการทดสอบเผาเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำที่ระดับแรงดันไอน้ำ 6, 8, 10 และ 12 bar มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ 68, 95, 150 และ 127 kg/hr ตามลำดับ โดยสามารถผลิตไอน้ำได้ 134.8, 174.6, 269.8 และ 230.8 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละระดับแรงดันได้ 29.51%, 27.47%, 26.96% และ 27.30% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

จากผลการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 400 kg/m^3 ($ED 7,155 \text{ MJ/m}^3$) ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 2 ระดับความหนาแน่นที่ทำการทดสอบมาข้างต้น ในทุกๆระดับแรงดัน และมีแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบคงที่เมื่อระดับแรงดันไอน้ำในระบบสูงขึ้นซึ่งต่างจากผลการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 2 ระดับความหนาแน่นที่ทำการทดสอบมาข้างต้น ที่แนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบจะลดลงเมื่อแรงดันไอน้ำสูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อต้องการเพิ่มแรงดันไอน้ำเป็น 2 เท่าจาก 6 bar ไปเป็น 12 bar ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าเช่นกัน โดยที่ระดับแรงดันไอน้ำสูงขึ้นเครื่องกำเนิดไอน้ำจึงต้องการพลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมากขึ้นเพื่อรักษาแรงดันไอน้ำในระบบ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่น

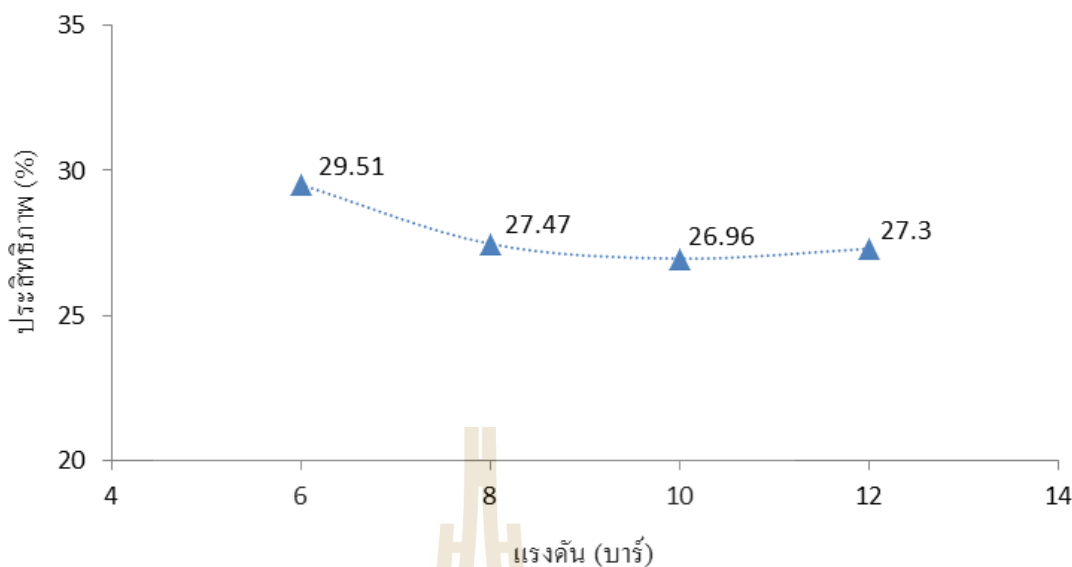
พลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 400 kg/m³ มีค่าสูงขึ้น (7,155 MJ/ m³) จึงไม่จำเป็นต้องป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในห้องเผาไหม้เป็นปริมาณมาก เนื่องจากเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้นจึงทำให้พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจึงเป็นไปได้อย่างทั่วถึงเพราะไม่เกิดการทับถมกันของเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 4.11 จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่ระดับแรงดันไอน้ำที่สูงขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

BD 400 Kg/m ³ 11.8%MC	ระดับแรงดันไอน้ำ			
	6	8	10	12
ปริมาณเชื้อเพลิง (Kg/hr)	68	95	150	127
ปริมาณไอน้ำ (Kg/hr)	134.8	174.6	269.8	230.8
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	29.51	27.47	26.96	27.30



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่าง ๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสความหนาแน่น 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

4) เชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

จากการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 400 kg/m³ และมีความหนาแน่นพลังงาน 10,829 MJ/ m³ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงแบบอัดเม็ด กับเครื่องกำเนิดไอน้ำ ขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง ที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ

ในการทดสอบเผาเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำที่ระดับแรงดันไอน้ำ 6, 8, 10 และ 12 bar มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ 60.2, 84.8, 90.8 และ 100 kg/hr ตามลำดับ โดยสามารถผลิตไอน้ำได้ 137.8, 196.1, 214.2 และ 274.2 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งสามารถประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละระดับแรงดันได้ 33.77, 34.25, 35.04 และ 40.82% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

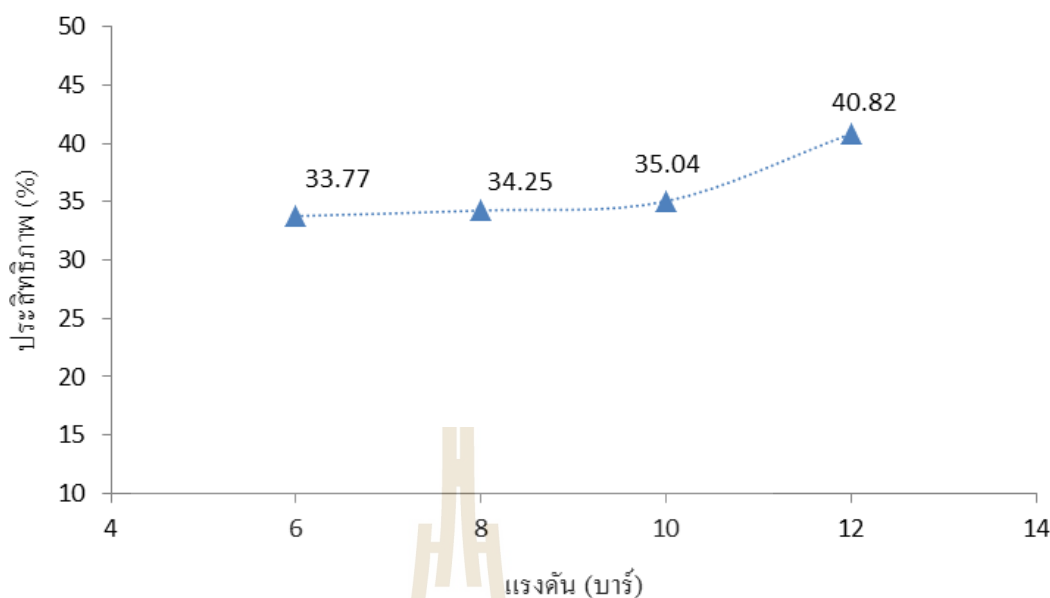
จากผลการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีระดับความหนาแน่น 600 kg/m³ (ED 10,829 MJ/ m³) ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 3 ระดับความหนาแน่นที่ทำการทดสอบมาข้างต้นในทุกๆระดับแรงดัน และมีแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบสูงขึ้นเมื่อระดับแรงดันไอน้ำในระบบสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามหลักการทำงานปกติของเครื่องกำเนิดไอน้ำ



รูปที่ 4.13 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือก
ไม้ยูคาลิปตัสชนิดความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

BD 600 Kg/m ³ 13%MC	ระดับแรงดันไอน้ำ			
	6	8	10	12
ปริมาณเชื้อเพลิง (Kg/hr)	60.2	84.8	90.8	100
ปริมาณไอน้ำ (Kg/hr)	137.8	196.1	214.2	274.2
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	33.77	34.25	35.04	40.82



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่างๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

4.4 สรุปผลการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

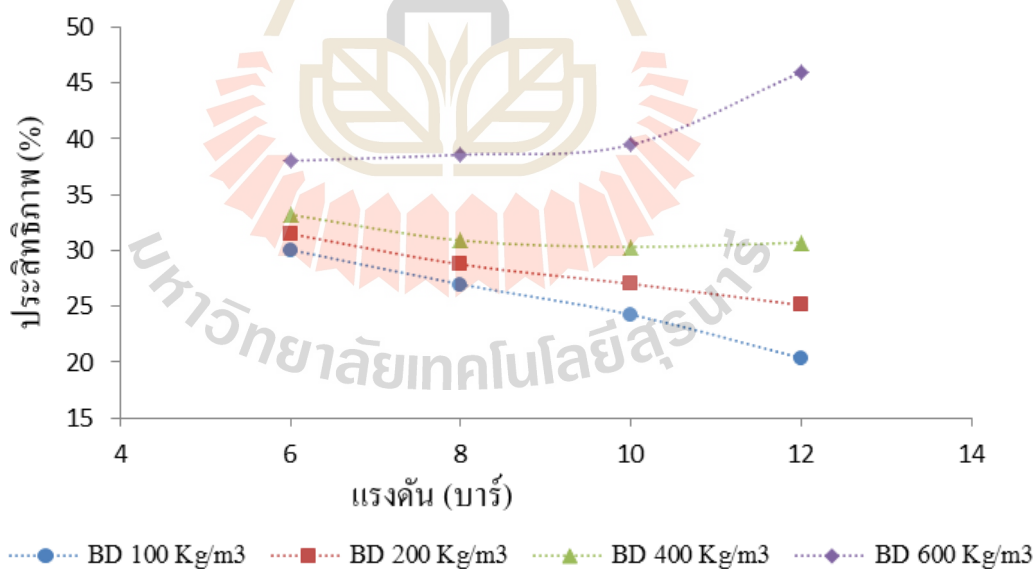
จากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m³ โดยแต่ละระดับความหนาแน่นทดสอบที่ระดับแรงดันไอน้ำ 6, 8, 10 และ 12 bar ผลการทดสอบพบว่าที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 100 และ 200 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผกผันกับระดับแรงดันไอน้ำ ที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 400 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนคงที่เมื่อแรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้น และที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 600 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตามระดับแรงดันไอน้ำ เนื่องด้วยผลของค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง ที่ส่งผลต่อ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบ ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และระยะเวลาการนำเอาออกจากห้องเผาไหม้

จากข้อมูลประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.15 พบว่าที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 600 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่ 40.82% ที่ระดับแรงดันไอน้ำ 12 bar แต่ทั้งนี้ในสภาวะนี้มีต้นทุนการเตรียมเชื้อเพลิงสูงกว่าเชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่นอื่นๆ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด 100% ส่วนระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 400 kg/m³ ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำคงที่เมื่อระดับแรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้น และมีต้นทุนการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำกว่าที่สภาวะความหนาแน่นเชื้อเพลิง

600 kg/m³ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงผสม (เชื้อเพลิงสับย่อย 40% : เชื้อเพลิงอัดเม็ด 60%) ดังนั้นการเลือกใช้เชื้อเพลิง เชื้อเพลิงทั้ง 2 ความหนาแน่น จึงต้องพิจารณาถึงต้นทุนในการเตรียมเชื้อเพลิงต่อไป

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้
ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส แบ่งตามความหนาแน่น	แรงดัน(บาร์)			
		6	8	10	12
	100 Kg/m ³	26.75	24.00	21.59	18.13
	200 Kg/m ³	28.02	25.58	24.03	22.33
	400 Kg/m ³	29.51	27.47	26.96	27.30
	600 Kg/m ³	33.77	34.25	35.04	40.82



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำที่แรงดันต่าง ๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m³

4.5 การเปรียบเทียบด้านพลังงานที่ได้จากการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ

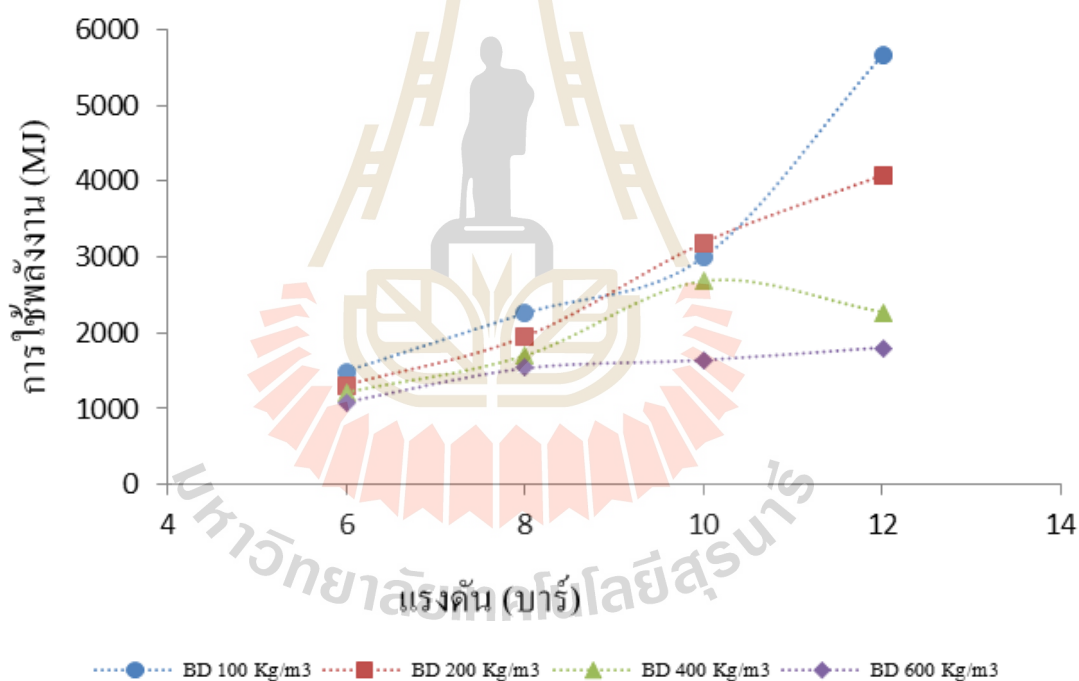
จากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเครื่องกำเนิดไอน้ำของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 4 ระดับความหนาแน่น พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำแปรผันตามความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เนื่องด้วยผลของค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง ที่ส่งผลกระทบต่อ อัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบ ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และระยะเวลาการนำเอาออกจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์ด้านพลังงานจึงพบว่า ปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตไอน้ำของระบบแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

เนื่องจาก การผลิตไอน้ำจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความหนาแน่นต่ำมีพลังงานบางส่วนที่สูญเสียไปกับเถ้าเนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่ทั่วถึงเนื่องจากการทบถมกันของเชื้อเพลิง รวมถึงเชื้อเพลิงที่ร่วงผ่านตะกรับลงไปเนื่องจากเชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก ดังนั้นปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำจึงมีค่าสูง และการผลิตไอน้ำจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นการสูญเสียพลังงานจากเหตุผลข้างต้นมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ที่ทั่วถึงและเชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่ขึ้นและสม่ำเสมอ ดังนั้นปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำจึงมีค่าต่ำลง ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.16

ดังนั้นเมื่อนำปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น 100 kg/m^3 ซึ่งเป็นปริมาณการใช้พลังงานสูงสุด มาเปรียบเทียบกับปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่นอื่น ๆ พบว่า มีการลดลงของพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.14 ปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตไอน้ำที่ความดันต่างๆของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m³

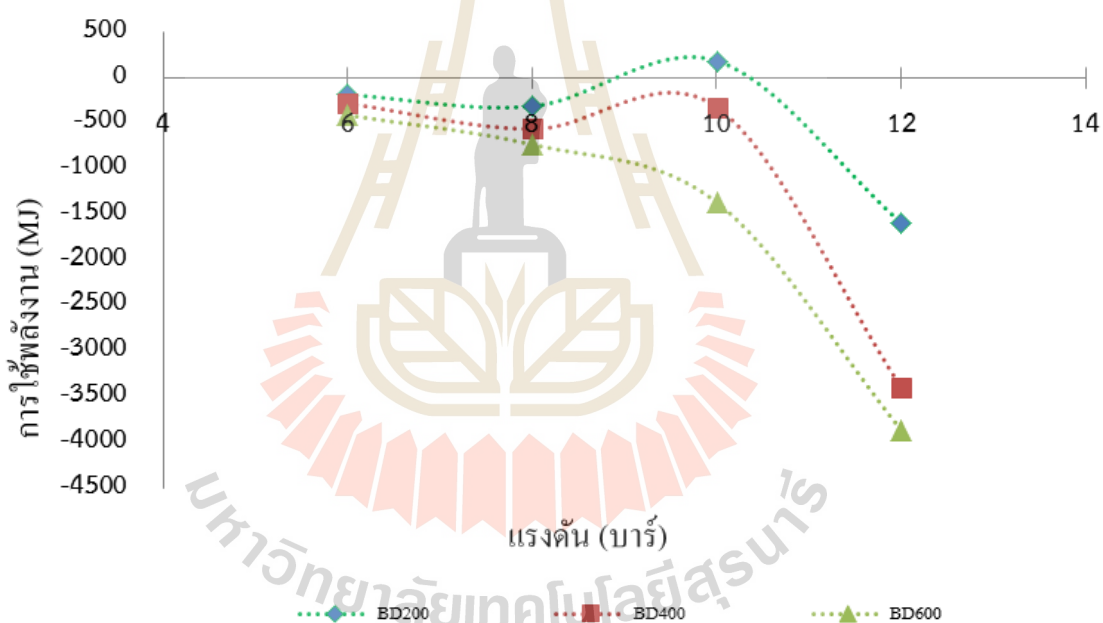
ปริมาณพลังงานที่ใช้ (MJ)	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาแบ่งตามความหนาแน่น	แรงดัน(บาร์)			
		6	8	10	12
	100 Kg/m ³	1,493	2,259	3,000	5,664
	200 Kg/m ³	1,312	1,950	3,191	4,077
	400 Kg/m ³	1,216	1,699	2,683	2,273
	600 Kg/m ³	1,087	1,531	1,639	1,805



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังที่ใช้ในการผลิตไอน้ำที่แรงดันต่าง ๆ เมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100,200,400 และ 600 kg/m³

ตารางที่ 4.15 ปริมาณพลังงานที่ลดลงในการผลิตไอน้ำที่ความดันต่างๆของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 200, 400 และ 600 kg/m³เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100 kg/m³

ปริมาณพลังงานที่ลดลง (MJ)	เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาแบ่งตาม	แรงดัน (บาร์)			
	ความหนาแน่น	6	8	10	12
200 Kg/m ³		-181	-309	191	-1,587
400 Kg/m ³		-277	-560	-317	-3,391
600 Kg/m ³		-406	-728	-1361	-3,859



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ลดลงในการผลิตไอน้ำที่แรงดันต่างๆเมื่อใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 200,400 และ 600 kg/m³ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความหนาแน่น 100 kg/m³

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 คุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส จะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ มีลักษณะเป็นชิ้น และลักษณะเป็นเส้นใย จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 2 ชนิด พบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นชิ้นมีค่าความหนาแน่น 127.45 kg/m^3 และค่าความชื้น $59.53\% \text{ w.b.}$ และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีค่าความหนาแน่น 215.4 kg/m^3 และมีค่าความชื้น $62.97\% \text{ w.b.}$ ซึ่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้นจะมีความหนาแน่น (bulk density) มากกว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นชิ้น เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กกว่าจึงทำให้มีความหนาแน่นมากกว่า

สมบัติเฉพาะตัวของเชื้อเพลิงชีวมวลของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่แสดงถึงสัดส่วนของปริมาณความชื้น (moisture content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (volatile matter) ปริมาณเถ้า (ash content) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 มีค่าร้อยละ 61.45, 69.79, 8.94 และ 21.27 ตามลำดับ

สมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวลของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932 ซึ่งองค์ประกอบของธาตุต่างๆ จะมีความแตกต่างกัน โดยมีผลการวิเคราะห์ ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์และออกซิเจน มีค่าเฉลี่ยที่ร้อยละ 38.57, 3.86, 0.51, 0.31 และ 47.81 ตามลำดับ

ค่าความร้อน (LHV) ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีค่าความร้อน $8,159.20 \text{ kJ/kg}$ และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบชิ้นค่าความร้อน $8,966.52 \text{ kJ/kg}$ เนื่องจากค่าความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบชิ้นมีค่าต่ำกว่าแบบเส้นใย ส่วนค่าความหนาแน่นพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีค่าความหนาแน่นพลังงานสูงกว่าแบบชิ้น เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีความหนาแน่นมากกว่าแบบชิ้น โดยมีค่า $1,766.28 \text{ MJ/m}^3$ และ $1,147.05 \text{ MJ/m}^3$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นพลังงาน (energy density) แล้ว เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมากกว่าแบบชิ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง และมีขนาดเล็กกว่าแบบชิ้นจึงทำการสับย่อยได้ง่ายและมีความหนาแน่นสูงจึงทำให้มีคัมค่าต่อการขนส่ง

5.2 การแปรรูปและพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

กระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสนั้นประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

1) การลดขนาดและลดความชื้น ดำเนินการ โดยนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบเส้นใยมาทำการลดขนาดด้วยเครื่องสับย่อยวัสดุชีวมวล (biomass chipper) ด้วยอัตราการสับย่อย 200 kg/hr จากนั้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะถูกป้อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ด้วยอัตราการป้อนเดียวกัน หลังจากการอบแห้งเพื่อลดความชื้นแล้วเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะถูกสับย่อยอีกครั้งโดยเครื่องสับละเอียดจากกระบวนการดังกล่าวจะได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีความหนาแน่น 100 kg/m^3 ความชื้น 13% w.b. โดยกระบวนการนี้ใช้พลังงานในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 2.30 MJ/kg

2) การอัดเม็ด ดำเนินการ โดยนำเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อยจากกระบวนการข้างต้นมาทำการเพิ่มความหนาแน่นด้วยเครื่องอัดเม็ดซึ่งจะได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด ที่มีลักษณะเป็นเม็ดที่มีความหนาแน่น 600 kg/m^3 ความชื้น 11% w.b. โดยกระบวนการนี้ใช้พลังงานในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 0.68 MJ/kg

การศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อน จากตัวอย่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความชื้น พบว่าสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำ (LHV) และความชื้น (MC) ดังนี้

$$\text{LHV} = \text{HHV} - 201.83\text{MC}$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
 HHV คือ ค่าความร้อนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้น 0% มีค่าเท่ากับ $20,269 \text{ kJ/kg}$

5.3 ผลการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ

จากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ระดับความหนาแน่น 100, 200, 400 และ 600 kg/m³ โดยแต่ละระดับความหนาแน่นทดสอบที่ระดับแรงดันไอน้ำ 6, 8, 10 และ 12 bar ผลการทดสอบพบว่าที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 100 และ 200 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผกผันกับระดับแรงดันไอน้ำ ที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 400 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนคงที่เมื่อระดับแรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้น และที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 600 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตามระดับแรงดันไอน้ำ เนื่องด้วยผลของค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง ที่ส่งผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบ ลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และระยะเวลาการนำแก๊สออกจากห้องเผาไหม้ และเมื่อนำพลังงานที่ใช้ในการผลิตไอน้ำของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาวิเคราะห์พบว่าปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตไอน้ำของระบบแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากข้อมูลในการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำ พบว่าที่ระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 600 kg/m³ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด ที่ 40.82% ที่ระดับแรงดันไอน้ำ 12 bar แต่ทั้งนี้ในสถานะนี้มีต้นทุนการเตรียมเชื้อเพลิงสูงกว่าเชื้อเพลิงที่ระดับความหนาแน่นอื่นๆ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ด 100% ส่วนระดับความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 400 kg/m³ ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องกำเนิดไอน้ำคงที่เมื่อระดับแรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้น และมีต้นทุนการเตรียมเชื้อเพลิงต่ำกว่าที่สถานะความหนาแน่นเชื้อเพลิง 600 kg/m³ เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงผสม (เชื้อเพลิงสับย่อย 40% : เชื้อเพลิงอัดเม็ด 60%) ดังนั้นการเลือกใช้เชื้อเพลิง ทั้ง 2 ความหนาแน่น จึงต้องพิจารณาถึงต้นทุนในการเตรียมเชื้อเพลิงต่อไป

5.4 ข้อเสนอแนะและวิธีการดำเนินงานวิจัยต่อไป

การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นสูงเหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำที่มีห้องเผาไหม้แบบตะแกรงที่ติดตั้งอยู่กับที่ แต่หากมีความจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นพลังงานต่ำควรเลือกใช้เทคโนโลยีห้องเผาไหม้แบบอื่น เช่น ห้องเผาไหม้แบบตะแกรงสั่น หรือห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- กัญจนา บุญเกียรติ. 2544. **เชื้อเพลิงและการเผาไหม้**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
กรุงเทพมหานคร.
- จรัส จีรวินุญต์. 2553. **หม้อไอน้ำฉบับใช้ในโรงงาน.**: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.
กรุงเทพมหานคร.
- ณัฐ วรยศ และคณะ. 2549. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชนโดยใช้พลังงานจาก
ไม้โตเร็ว. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พิริยะ ทองเชี่ยว. 2550. การวิเคราะห์ปัจจัยทางด้านการเผาไหม้ต่อการทำงานหม้อไอน้ำเชื้อเพลิง
ถ่านหินบดละเอียด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ระบบหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำ. 2556. ห้องเผาไหม้แบบต่างๆ (ออนไลน์). ได้จาก:
<http://www.boilerthailand.com>
- วีรชัย อาหาญ และคณะ. 2554. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการเพิ่มศักยภาพเชื้อเพลิง
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักนโยบาย
และแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน สนับสนุนงบประมาณ. ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้าน
ชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- วีรชัย อาหาญ และคณะ. 2553. โครงการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็น
พลังงานทดแทน (ระดับชุมชน). ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี.
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์. 2548. **เทคนิคการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมและกรณีศึกษา**.
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร.
- สาวิตรี คำหอม และวีรชัย อาหาญ. 2551. **การศึกษาผลกระทบของสมบัติของเชื้อเพลิงต่อค่าความ
ร้อน**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- Energy Performance Assessment for Equipment and Utility Systems. 2005. **Bureau of Energy
Efficiency, A Statutory Body Under Ministry of Power**. Government of India.

- J. Dias , M. Costa , J.L.T. Azevedo. 2003. **Test of a small domestic boiler using different pellet.** Biomass and Bioenergy 27: 531-539.
- John Carroll and John finnan. 2013. **Emissions and efficiencies from the combustion of agricultural feedstock pellets using a small scale tilting grate boiler.** Biosystems engineering 115: 50-55.
- Lara Carvalho et al. 2013. **Performance of a pellet boiler with agricultural fuels.** Applied Energy 104: 286-296.
- Obernberger I. and Thek G. 2004. **Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour.** Biomass Bioenergy 27(6): 653–69.
- Vamvuka D and Zografos D. 2004. **Predicting the behavior of ash from agricultural wastes during combustion.** Fuel 83: 2051-2057.
- Verma VK, Bram S, Gauthier G and De Ruyck J. 2011. **Evaluation of the performance of a multi-fuel domestic boiler with respect to the existing European standard and quality labels. Part 1.** Biomass Bioenergy 35(1): 80–9.



ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ก1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

ก1.1 ความหนาแน่นก่อนการอัด

การนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาจัดเรียงให้ชิดกันที่สุดในภาชนะที่มีปริมาตร 0.10 m^3 นำไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกผล ค่ามวลของเชื้อเพลิงต่อหน่วยปริมาตรที่แน่นอน ดังสมการที่ (ก1)

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

ก1.2 ความชื้น

คือ เปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงชีวมวล โดยหาเป็นร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (hot air oven) ที่อุณหภูมิ $104-110^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desicator) ที่ทิ้งไว้ประมาณ 15 min นำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 g ลงในถาดลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $104-110^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 1 hr หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 min จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายใน ทำการบันทึกผล จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณ ดังสมการที่ (ก2)

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

เมื่อ

M (wb)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)
W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)

ก2 การหาค่าประกอบแบบประมาณของชีวมวลและเถ้า (proximate analysis)

การหาค่าประกอบประมาณ ได้แก่ ความชื้น เถ้า (ash) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานของ ASTM D1762-84 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ก2.1 ความชื้น

คือ ร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักชีวมวลแห้ง โดยหาเป็นเปอร์เซ็นต์ของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis) ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110°C เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำเข้าเตลิเกเตอร์ทิ้งไว้ประมาณ 15 min แล้วนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประมาณ 1 g ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง
- นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110°C เป็นเวลา 1 hr หรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่
- นำถาดอลูมิเนียมมาทิ้งไว้ให้เย็นแล้วนำเข้าเตลิเกเตอร์ จากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 15 min จึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่าง ที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในและทำการบันทึกจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณ ดังสมการที่ (ก3)

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

เมื่อ		
M (db)	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis)
W_0	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ใช้ในการทดลอง (g)
W_1	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)
W_2	คือ	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)

ก2.2 เถ้า (ash)

- เตาครุชเชิลพอร์ซเลน (porcelain crucible) พร้อมฝาในเตาเผา Muffle furnace ที่อุณหภูมิ 750°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 hr จากนั้นนำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วทำการชั่งน้ำหนักครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝา
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ครุชเชิลประมาณ 1 g
- นำไปเผาบนตะเกียงบุนเสน รอจนควันระเหยออกหมด
- ใส่ครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750°C ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 hr หรือรอจนน้ำหนักเถ้าคงที่
- นำครุชเชิลพอร์ซเลนออกจากเตาเผาแล้วนำทิ้งไว้ให้เย็นลง นำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณ ดังสมการที่ (ก4)

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

เมื่อ		
A	คือ	ร้อยละของเถ้า
W_3	คือ	น้ำหนักของครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝาที่มีเถ้า (g)
W_4	คือ	น้ำหนักของครุชเชิลพอร์ซเลนพร้อมฝา (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)

ก2.3 ปริมาณสารระเหย

- เเผาครุชชีเบิลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950°C ทิ้งไว้ 30 min จากนั้นนำออกจากเตาเผา ทิ้งไว้ให้เย็นในเคสิเกเตอร์ แล้วทำการชั่งน้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝานและทำการบันทึกผล
- ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองใส่ในครุชชีเบิล 1 g
- ปิดฝาครุชชีเบิลพอร์ชเลนให้เรียบร้อย จากนั้นนำไปให้ความร้อนโดยให้อยู่เหนือปากเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 300°C เป็นเวลา 6 min
- หย่อนครุชชีเบิลพอร์ชเลนให้อยู่บริเวณปากเตา อุณหภูมิประมาณ 600°C ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 10 min
- หย่อนครุชชีเบิลพอร์ชเลนให้อยู่กึ่งกลางเตาเผา อุณหภูมิประมาณ 950°C เป็นเวลาประมาณ 6 min
- นำครุชชีเบิลพอร์ชเลนออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง จากนั้นนำไปใส่ไว้ในเคสิเกเตอร์ประมาณ 15 min นำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผล แล้วทำการคำนวณ ดังสมการที่ (ก5)

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

เมื่อ

V	คือ	ร้อยละของสารระเหย
W_5	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการเผา (g)
W_6	คือ	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการเผา (g)
W	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง (g)
M	คือ	ร้อยละของความชื้น

ก2.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว

ปริมาณคาร์บอนคงตัว สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (ก6)

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \% \text{ความชื้น} - \% \text{เถ้า} - \% \text{สารระเหย} \quad (ก6)$$

ก2.5 การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ (Calorific value)

การหาค่าความร้อนของการเผาไหม้ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter ตามมาตรฐานของ ASTM D 2015-77 โดยนำตัวอย่างแห้งบดละเอียด อัดเป็นเม็ด พันด้วยลวดเผาไหม้ (ignition wire) ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง วางในเครื่องบอมบ์ ปิดฝา อัดก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไปด้วยความดัน 30 kg/cm^3 เป็นเวลา 5 min แล้วประกอบเข้าในถัง (jacket) เต็มน้ำ 1800 mL กดปุ่มเผาไหม้ตัวอย่าง อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนกระทั่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำ แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ไปคำนวณหาค่าความร้อนของตัวอย่าง โดยเทียบกับค่าความร้อนที่ได้จากการบอมบ์กรดเบนโซอิก (benzoic acid) มาตรฐาน

ค่าทางความร้อนทางเชื้อเพลิง คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องถ่ายเทออกจากเชื้อเพลิง เนื่องจากการสันดาปที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในระบบ โดยปกติการสันดาปของเชื้อเพลิง จำพวกไฮโดรคาร์บอนเมื่อสันดาปในบรรยากาศของออกซิเจนแล้ว ผลของการสันดาปจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ ถ้าไอน้ำสามารถกลั่นตัวแล้วคายความร้อนแฝงออกมา ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ได้จะเป็นค่าความร้อนสูงสุด แต่ถ้าไอน้ำไม่กลั่นตัว ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงจะเป็นค่าความร้อนต่ำ การหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงโดยการนำเอาเชื้อเพลิงที่จะทำการทดสอบไปทำการชั่งน้ำหนักให้ละเอียด แล้วนำมาเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ ภายใต้ความดันใน Bomb Calorimeter ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นรอบตัวบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิของน้ำได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ และปริมาณความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ก7)

$$Q = m c_p \Delta T \quad (\text{ก7})$$

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

ก3 การหาคุณสมบัติแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงชีวมวล (Ultimate Analysis)

ก3.1 องค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N S Elemental Analyzer นำตัวอย่างตัวอย่างบดให้ละเอียด ชั่งปริมาณที่แน่นอน 1-2 mg ใส่ภาชนะ นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 925°C ภายใต้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ผ่านเข้าไปใน Reaction $\text{CO}_2 \text{ H}_2\text{O N}_2$ ควบคุมความดัน อุณหภูมิ และปริมาตรให้คงที่

ก3.2 องค์ประกอบของธาตุออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนของเชื้อเพลิงชีวมวลหาได้จาก การคำนวณดังสมการที่ (ก8)

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

ก3.3 องค์ประกอบของธาตุโลหะหนักและคลอรีน

สามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ คือ เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF รุ่น ED 2000) ที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้ครอบคลุมตั้งแต่ธาตุ Na จนถึงธาตุ U ในระดับ 0.01-100% โดยนำตัวอย่างที่บดให้ละเอียด ชั่งปริมาณใส่ในถ้วยชั่งสาร แล้วนำไปอัดตัวอย่างโดยใช้เครื่องเตรียมตัวอย่าง EDXRF จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยเครื่องมือดังกล่าว

ก4 การหาค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป

ก4.1 ค่าพลังงานความร้อนของไอเสีย

$$Q_{\text{exhaust gas}} = m_{\text{ex}} C_{p_{\text{ex}}} \Delta T \quad (\text{ก9})$$

เมื่อ

$Q_{\text{exhaust gas}}$ คือ ค่าพลังงานความร้อนจากไอเสีย (MJ)

m_{ep} คือ มวลของไอเสีย (1.12 KJ/kg °C)

ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (°C)

m_{biomass} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ (kg/hr)

ก4.2 ค่าพลังงานไฟฟ้า

$$Q_e = 3.6 * P_e \quad (\text{ก10})$$

เมื่อ

Q_e คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (MJ)

P_e คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

ก5 การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

โดยประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการทดสอบตามมาตรฐาน อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASME PTC-4-1 Power test code for steam generating direct method หรือ Input -output method ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหาได้จากค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำได้รับ โดยวัดค่าอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ อัตราการผลิตไอน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง แล้วนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพที่ (1) พารามิเตอร์ที่ควบคุมและตรวจวัดในกระบวนการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{Water} (h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel} (LHV)} \quad (ก11)$$

เมื่อ

\dot{m}_{Water}	คือ อัตราการผลิตไอน้ำ (kg/hr)
\dot{m}_{fuel}	คือ อัตราการการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)
h_{water}	คือ เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน (kJ/kg)
h_{Steam}	คือ เอนทาลปีของไอน้ำ (kJ/kg)
LHV	คือ ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (kJ/kg)



ข1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ข1.1 ความหนาแน่น

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด

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

$$\text{Density} = \frac{60 \text{ kg}}{0.1 \text{ m}^3}$$

$$\text{Density} = 600 \text{ kg/m}^3$$

ข1.2 ความชื้น

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_{wb} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$

$$M_{wb} = \frac{8.00 - 6.96}{8.00} \times 100$$

$$M_{wb} = 13\%$$

ข2 การหาค่าพลังงานที่ใช้ในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ข2.1 ค่าพลังงานความร้อนของไอเสีย

อัตราการไหลของแก๊สไอเสียเท่ากับ $0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ (โดยปริมาตร) ต้องการอัตราการไหล

โดยมวล อุณหภูมิแก๊สไอเสีย 194.13°C และอุณหภูมิบรรยากาศ 30°C

$$M = 0.43 \text{ m}^3/\text{s} / 1.745 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$M = 0.246 \text{ kg/s}$$

ค่าความร้อนของไอเสีย สามารถหาได้จาก

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

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{exhaust gas}} &= 0.246 \text{ kg/s} \times 1.12 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (196.8 - 30)^\circ\text{C} \\
 &= 45.957 \text{ Kw} \times 3.6 \\
 &= 165.45 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

ก2.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์วัดกระแสไฟฟ้า

$$Q_e = 3.6 * P_e$$

พลังงานที่ใช้แปรรูปสำหรับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย
พลังงานไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 Q_{e1} &= 3.6 \times P_e \\
 &= 3.6 \times 49.81 \text{ kW} \\
 &= 179.32 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

พลังงานความร้อนจากไอเสีย

$$Q_{\text{exhaust gas}} = 165.45 \text{ MJ}$$

พลังงานรวมในการแปรรูปแบบสับย่อยที่อัตราการผลิต 150 kg/hr

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{total1}} &= Q_{\text{exhaust gas}} + Q_{e1} \\
 &= 165.45 \text{ MJ} + 179.32 \text{ MJ} \\
 &= 344.77 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้ต่อกิโลกรัม

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= 344.77 \text{ MJ} / 150 \text{ kg/hr} \\
 &= 2.30 \text{ MJ/kg}
 \end{aligned}$$

พลังงานที่ใช้แปรรูปสำหรับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อัดเม็ด

$$\begin{aligned}
 Q_{e2} &= 3.6 \times P_e \\
 &= 3.6 \times 28.3 \text{ kW} \\
 &= 101.88 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

พลังงานรวมในการแปรรูปแบบอัดเม็ดที่อัตราการผลิต 150 kg/hr

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{total2}} &= Q_{\text{total1}} + Q_{e2} \\
 &= 344.77 \text{ MJ} + 101.88 \text{ MJ} \\
 &= 446.65 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานที่ใช้ต่อกิโลกรัม

$$Q_2 = 446.65 \text{ MJ} / 150 \text{ kg/hr}$$

$$= 2.98 \text{ MJ/kg}$$

ข3 การคำนวณค่าในการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเครื่องกำเนิดไอน้ำ

ข3.1 ค่าความร้อนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความร้อนต่ำของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้น 11% w.b.

$$LHV = HHV - 201.83MC$$

HHV คือ ค่าความร้อนของเปลือกไม้ที่ความชื้น 0% มีค่าเท่ากับ 20,269 kJ/kg

$$LHV = 20,269 - 201.83(11)$$

$$= 18,048.87 \text{ kJ/kg}$$

ข3.2 ค่าความหนาแน่นพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนาแน่นพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

$$ED = LHV \times BD$$

$$= 18,048.87 \text{ kJ/kg} \times 600 \text{ kg/m}^3$$

$$= 10,829,322 \text{ kJ/m}^3$$

$$= 10,829 \text{ MJ/m}^3$$

ข3.3 ค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{Water} (h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel} (LHV)}$$

\dot{m}_{Water} คือ อัตราการผลิตไอน้ำ มีค่า 274.2 kg/h

\dot{m}_{fuel} คือ อัตราการการใช้เชื้อเพลิง มีค่า 100 kg/h

h_{water} คือ เอนทาลปีของน้ำที่ป้อนที่อุณหภูมิ 24 °C มีค่า 100.40 kJ/kg

h_{Steam} คือ เอนทาลปีของไอน้ำที่แรงดันไอน้ำ 12 bar มีค่า 2,787.11 kJ/kg

LHV คือ ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้น 11% (wb) มีค่า 18,048.87 kJ/kg

$$\eta_{Boiler} = \frac{274.2 (2787.11 - 100 .40)}{100 (18048.87)}$$

$$\eta_{Boiler} = \frac{736695 .88}{1804887.00} = 0.4082$$





ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

กฤษกร รับสมบัติ, ธนรัช มุขจันทร์, สุภัทร หนูแย้ม และ วีรัชย์ ออาจหาญ. (2555). การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13.



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิด ไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

Combustion Efficiency Improvement of Eucalyptus Bark Fuel Used In Boiler By Densification Process

กฤษฎกร รัชสมบัติ¹, ธนรัช มุขพันธ์¹, สุกัทร หนูแย้ม¹ และ วีรชัย อางหาญ^{2*}

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

²อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000

* ติดต่อ: Email: arjharh@g.sut.ac.th, โทรศัพท์: 044 225 007, โทรสาร: 044 225 046

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำชนิดท่อไอน้ำ ขนาดกำลังการผลิต 500 กิโลกรัมไอน้ำต่อชั่วโมง ด้วยวิธีการเพิ่มสมบัติความหนาแน่นของเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิง โดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อยความหนาแน่น 100 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร และเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ดความหนาแน่น 600 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในการทดสอบประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำ ที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ 4 ระดับ คือ 6 , 8 , 10 และ 12 บาร์ ผลการทดสอบพบว่า เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ คือ 30.04%, 26.94%, 24.20% และ 20.34% ตามลำดับ และเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำที่ 4 ระดับแรงดันไอน้ำ คือ 37.71%, 36.51%, 39.06% และ 45.50% ตามลำดับ

คำหลัก: ประสิทธิภาพการเผาไหม้, เครื่องกำเนิดไอน้ำ, เปลือกไม้ยูคาลิปตัส, ความหนาแน่น, ค่าความหนาแน่นพลังงาน

Abstract

In the present study, presents result from experimental study performed on a 500 kg_{steam}/hr boiler using Eucalyptus bark as fuel. Two different type of Eucalyptus bark fuel were used, the first one is a piece Eucalyptus bark (density of 100 kg/m³) and the second one is a pellet Eucalyptus bark (density of 600 kg/m³), for each one, the boiler was tested as a function of its capacity. The experiment was performed for boiler efficiency at 4 levels of steam pressure as follow: 6, 8, 10 and 12 bar. The result showed that, efficiency of boiler at 4 conditions that using a piece Eucalyptus bark as fuel is equal 30.04%, 26.94%, 24.20% and 20.34%, respectively. For using a pellet Eucalyptus bark as fuel, efficiency of boiler is equal 37.71%, 36.51%, 39.06% and 45.50%, respectively.

Keywords: Combustion Efficiency, Boiler, Eucalyptus Bark, density

1. บทนำ

ประเทศไทยมีแหล่งชีวมวลที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาก แต่ในทางปฏิบัติแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่จะกระจายไปในภูมิภาคต่างๆ ทั่วประเทศ ทั้งที่เป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตเกษตร และ ไร่ นา สวนเกษตร

นอกจากนี้ยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อันเนื่องมาจากเศษวัสดุดังกล่าวยังอยู่ในสภาพที่ไม่พร้อมใช้ ต้องมีการจัดการแปรรูปเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น เราจึงทำการจำแนกเชื้อเพลิงชีวมวลออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (Commercialized Biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูป ซื่อ-ขาย ง่าย ในที่นี้ เช่น แกลบ ชานอ้อย เส้นใยปาล์ม กะลาปาล์ม ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์

2) เชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (Non-Commercialized Biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่กระจายอยู่ในไร่ นา สวนเกษตร ในที่นี้ เช่น ฟางข้าว ยอดและใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม ซึ่งยังเป็นชีวมวลที่คงเหลือ ยังไม่ถูกนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ สามารถนำมาพัฒนาไปเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ได้ โดยผ่านกระบวนการจัดการ คือ การรวบรวม และแปรรูปให้พร้อมใช้

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการประเมินศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลในปี 2553 พบว่า สามารถผลิตพลังงานได้กว่า 6,448 ktoe หากนำเชื้อเพลิงดังกล่าวมาผลิตไฟฟ้าทั้งหมด จะมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้า 2,468 MW โดยเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ ได้แก่ แกลบ, ช้างข้าวโพด, เศษไม้, เปลือกไม้, ไม้พิน รวม 1,008 ktoe คิดเป็นร้อยละ 16 ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพ

ทั้งหมด และเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ ได้แก่ ยอดและใบอ้อย ฟางข้าว ต้นข้าวโพด ทะลายปาล์ม ลำต้นและเหง้ามัน เศษไม้และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส รวม 5,440 ktoe คิดเป็นร้อยละ 84 ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพทั้งหมด ตามลำดับ

จากการประเมินศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ที่มีอยู่ พบว่า เชื้อเพลิงดังกล่าวส่วนใหญ่จะกระจายอยู่ในไร่ นา สวนเกษตร ใช้ต้นทุนในการรวบรวมค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อพิจารณาศักยภาพด้านการรวบรวมแล้วพบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่รวบรวมได้ง่ายเนื่องจากกระบวนการผลิตไม้ยูคาลิปตัส จะกระทำในลักษณะรวมศูนย์ จึงมีเศษเปลือกไม้กองรวมกันอยู่ บริเวณโรงงานไม้สับ ทั้งนี้พบว่า มีเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่ยังคงเหลือ 680, 000 ตันต่อปี และยังไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์

อย่างไรก็ตามการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มาใช้ประโยชน์โดยนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล นั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วย ตารางที่ 1 ที่แสดงถึง สมบัติทางกายภาพ ค่าความร้อน สมบัติแบบประมาณ และสมบัติแบบแยกธาตุ [1] ซึ่งจะเห็นว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้น 61% ซึ่งจัดอยู่ได้สูงมาก และมีความหนาแน่นต่ำในช่วง 118-228 kg/m³ ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการใช้งานตลอดจนมีต้นทุนในการขนส่งค่อนข้างสูง

ทั้งนี้ได้มีการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับความชื้นของเชื้อเพลิงยูคาลิปตัส โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อน ของตัวอย่าง ที่ความชื้นต่างๆ ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 1 [2] ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (1)

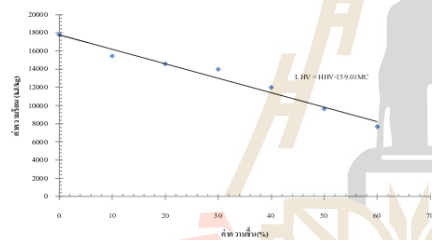
$$LHV=HHV-159.01MC \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
HHV คือ ค่าความร้อนของเปลือกไม้ที่ความชื้น 0%
มีค่าเท่ากับ 17.78 MJ/kg

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

Parameters	Value
Physical Properties	
Size (mm.)	50 - 200
Bulk density (kg/m ³)	118 - 228
%MC (As Received)	61.9
Proximate Value	
%VM	79.90
%Ash	6.39
%FC	13.71
HHV (MJ/kg)	17.78
Ultimate Value	
%C	45.4
%H	5.66
%N	0.33
%S	0.11
%O	48.50

ที่มา : [1]



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและค่าความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส [1]

จากกราฟรูปที่ 1 จะเห็นว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้น 61% จะมีค่าความร้อนเพียง 8 MJ/kg ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำมาก ทั้งนี้ผู้ประกอบการที่รับซื้อเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส จะกำหนดค่าความชื้นไว้ไม่เกิน 25% ซึ่งจะทำให้ค่าความร้อนมีค่า 13.8 MJ/kg ประกอบกับการขนส่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีต้นทุนค่อนข้างสูงจึงทำให้การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสจึงยังไม่แพร่หลายมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า องค์ประกอบทางเคมี ในเปลือกไม้ยูคาลิปตัส บางชนิด อาทิ สารอัลคาไลน์ (Be, Mg, Ca, Sr, Ba และ Ra) ส่วนประกอบทางเคมีของ Ash Oxide ต่างๆ เหล่านี้จะ

ก่อให้เกิด Fouling (การเกิดตะกรัน), Agglomeration หรือ Slagging (การเกาะตัวของเถ้า) ขณะเผาไหม้ ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อเตาเผาและระบบการถ่ายเทความร้อน [3]

อย่างไรก็ดีเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ยังเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่น่าสนใจ เนื่องจากมีปริมาณมาก ดังนั้นการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยจำเป็นต้องเน้นในการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ให้มีคุณลักษณะพร้อมใช้ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อันจะเป็นข้อพิสูจน์ถึง ข้อดีของการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการแปรรูปมาแล้ว ทั้งในด้านการขนส่ง และในด้านประสิทธิภาพการเผาไหม้

2. อุปกรณ์และวิธีการ

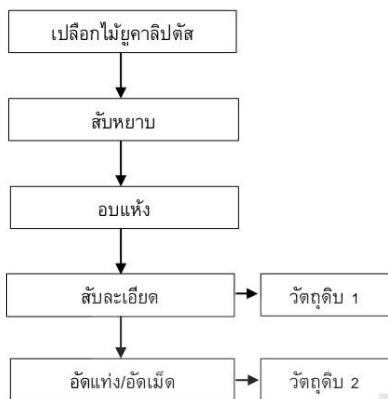
2.1 อุปกรณ์

2.1.1 วัตถุดิบ

1) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับละเอียด เป็นเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการแปรรูป การลดขนาดและอบแห้ง มีความชื้น 13% มีลักษณะเป็นผงขนาด 5 mm. มีความหนาแน่น 100 kg/m³ ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 3

2) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด เป็นเชื้อเพลิงที่ผ่านการแปรรูป เหมือนข้อ 1) แต่นำมาอัดแท่งด้วยเครื่อง Pelleting Machine มีความชื้น 11% มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm มีความหนาแน่น 600 kg/m³ ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 4

กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ แสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 3 เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแห้งสับละเอียด



รูปที่ 4 เปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด

2.1.2 เครื่องกำเนิดไอน้ำ

เครื่องกำเนิดไอน้ำที่ใช้ ขนาดกำลังการผลิต 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง ความดันสูงสุด 22 bar เป็นหม้อต้มไอน้ำแบบท่อน้ำ เตาเผาแบบตะกรับแบบเพลลาตัน ใช้เชื้อเพลิง ชีวมวล (ไม้สับ) เพื่อผลิตไอน้ำสำหรับเครื่องจักรกังหันไอน้ำ ตามการทำงานของวัฏจักรแรงคิน (Rankin Cycle) มีระบบการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนเกินแบบอัตโนมัติโดยสัมพันธ์กับการควบคุมอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมน้ำป้อนเป็นแบบอัตโนมัติ มีระบบการควบคุมความปลอดภัยแบบอัตโนมัติ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5



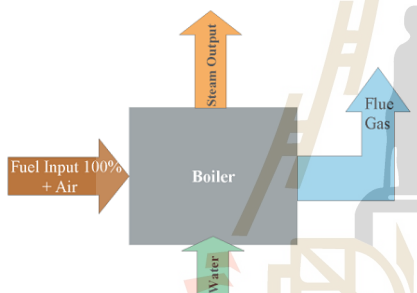
รูปที่ 5 เครื่องกำเนิดไอน้ำขนาดกำลังการผลิต 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง

2.2 วิธีการทดลอง

การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ เตาเผาชนิดตะกรับแบบเพลลาตัน ขนาดกำลังการผลิต 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง โดยทำการทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 2

ประเภท คือ 1) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย และ 2) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด โดยประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการทดสอบตามมาตรฐาน อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASME PTC-4-1 Power Test Code for Steam Generating Direct method (also called as Input - output method) แสดงไว้ในรูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหาได้จากค่าความร้อนสมมูลที่น้ำได้รับ โดยวัดค่าอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ อัตราการผลิตไอน้ำ และอัตราการใช้เชื้อเพลิง แล้วนำมาคำนวณหาตั้งสมการที่ (2) และ (3) ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ควบคุมและตรวจวัดในกระบวนการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน แสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดง Input -output method [4]

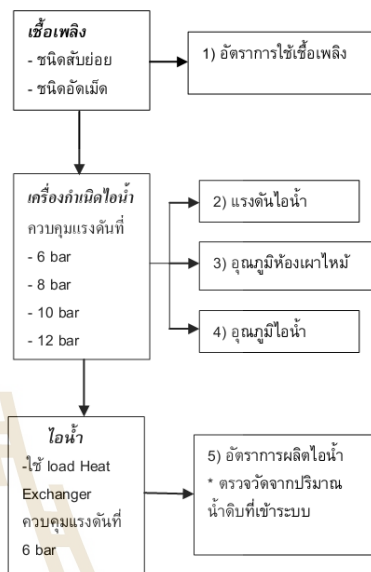
การหาประสิทธิภาพของ Boiler (Boiler Efficiency %)

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{Water}(h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel}(LHV)} \quad (2)$$

- \dot{m}_{Water} คือ อัตราการผลิตไอน้ำ มีหน่วยเป็น kg/h
- \dot{m}_{fuel} คือ อัตราการการใช้เชื้อเพลิง มีหน่วยเป็น kg/h
- h_{water} คือ เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน มีหน่วยเป็น kJ/kg
- h_{Steam} คือ เอนทาลปีของไอน้ำ มีหน่วยเป็น kJ/kg
- LHV คือ ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีหน่วยเป็น kJ/kg

การหาค่า Evaporation Ratio

$$Evaporation Ratio = \frac{Quantity\ of\ Steam\ Generation}{Quantity\ of\ Fuel\ Consumption} \quad (3)$$



รูปที่ 7 แสดงรายการพารามิเตอร์ที่ควบคุมและตรวจวัดในกระบวนการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

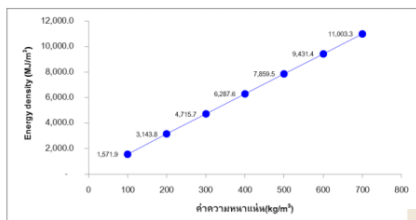
3. ผลการทดสอบและวิจารณ์

การทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง มีผลการทดสอบดังนี้

3.1 ความหนาแน่นพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการอัดเม็ด

จากกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 2 ประเภท คือ 1) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย 2) เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด พบว่าความหนาแน่นพลังงานของ

เชื้อเพลิงเปลือกไม้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพลังงานและค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

โดยที่สมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดสอบ แสดงไว้ใน ตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่ามากขึ้น 6 เท่า ทำให้ความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงดังกล่าวมีมากกว่า 6 เท่าเป็นอย่างน้อย ซึ่งค่าความหนาแน่นพลังงานที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 6 เท่านี้เป็นเพราะในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจะมีการสูญเสียความชื้น ประมาณ 2% ทั้งนี้เมื่อทำการวิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในการอัดแท่งพบว่า จะใช้พลังงานประมาณ 800 kJ/kg ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การขนส่งแล้วพบว่ามีความคุ้มค่ามาก

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ชนิด	%MC	LHV	BD	ED
เชื้อเพลิง	(wb)	(kJ/kg)	(Kg/m³)	(MJ/m³)
สับย่อย	13%	15,719.87	100	1,572
อัดเม็ด	11%	16,037.89	600	9,622

3.2 การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

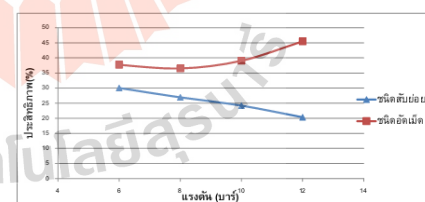
การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 2 ประเภท คือ แบบสับย่อย และแบบอัดเม็ด โดยการทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ ขนาดกำลังการผลิต 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง พบว่าการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด ทำให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงาน

ความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำที่สูงกว่า เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับย่อย ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 9 และรูปที่ 10 สาเหตุเนื่องจากหลายสาเหตุ คือ

- 1) การลำเลียงเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับจะมีน้ำหนักเบา ทำให้เชื้อเพลิงงอกเข้าสู่อุปกรณ์อย่างต่อเนื่อง บางช่วงมากเกินไป บางช่วงน้อยเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบอัดเม็ด
- 2) การร่วผ่านตะแกรงของชุดป้อนเชื้อเพลิงเนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบสับจะมีขนาดเล็ก บางชิ้นเป็นผงและมีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมด รวมถึงการหลุดปลิวไปในปล่องไอเสียเนื่องจากแรงของพัดลมอีกด้วย [5] [6]
- 3) ระบบการป้อนเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำเป็นลักษณะเป็น Volumetric Feeder จากการเคลื่อนที่ของ Stoker ดังนั้นการที่มีเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นพลังงานสูงๆ จึงทำให้ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำสูงขึ้นด้วย

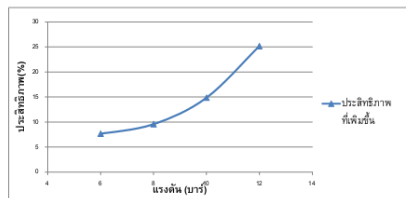
ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเป็นไอน้ำของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงทั้ง 2 ประเภท

ชนิด	เชื้อเพลิง	แรงดัน(บาร์)			
		6	8	10	12
ประสิทธิภาพ	ชนิดสับย่อย	30.04%	26.94%	24.20%	20.34%
	ชนิดอัดเม็ด	37.71%	36.51%	39.06%	45.50%
	เพิ่มขึ้น	7.67%	9.57%	14.86%	25.16%



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและแรงดันของไอน้ำ ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้งสองชนิด

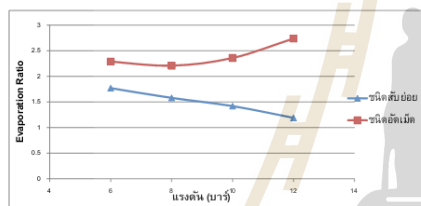
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่



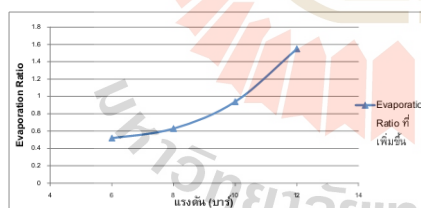
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นและแรงดันของไอน้ำ

ตารางที่ 4 ค่า Evaporation Ratio ของเชื้อเพลิงเชื้อเพลิงทั้ง 2 ประเภท

Evaporation Ratio	ชนิดเชื้อเพลิง	แรงดัน(บาร์)			
		6	8	10	12
	ชนิดสับย่อย	1.77	1.58	1.42	1.19
	ชนิดอัดเม็ด	2.29	2.21	2.36	2.74
	เพิ่มขึ้น	0.52	0.63	0.94	1.55



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Evaporation Ratio และแรงดันของไอน้ำ ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสทั้ง 2 ประเภท



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Evaporation Ratio ที่เพิ่มขึ้นและแรงดันของไอน้ำ

4. สรุป

จากการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงพบว่า การเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยการอัดเม็ด สามารถเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงได้ 6 เท่าตัว ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นพลังงานของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเป็น 6 เท่า โดยสามารถแสดงให้เห็น จากการทดสอบกับเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำ ขนาดกำลังการผลิต 500 กิโลกรัมไอน้ำ/ชั่วโมง โดยผลการทดสอบ พบว่า การใช้เชื้อเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความหนาแน่นสูง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำของเครื่องกำเนิดไอน้ำได้ โดยที่แรงดันไอน้ำในระบบ 6, 8, 10 และ 12 บาร์ มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น 7.67%, 9.57%, 14.86% และ 25.16% ตามลำดับ และค่า Evaporation Ratio เพิ่มขึ้น 0.52, 0.63, 0.94 และ 1.55 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน โครงการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1]วีรชัย อหาญ และคณะ. (2554). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการเพิ่มศักยภาพเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานสนับสนุนงบประมาณ. ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [2]สาวิตรี คำหอมและวีรชัย อหาญ. (2551), การศึกษาผลกระทบของสมบัติของเชื้อเพลิงต่อค่าความร้อน . การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรม

เกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551,
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[4]Energy Performance Assessment for
Equipment and Utility Systems.(2005).Bureau of
Energy Efficiency ,A Statutory Body Under
Ministry of Power .Government of India.

[3] Vamvuka, D., and Zografos D., "Predicting
the behavior of ash from agricultural wastes
during combustion", Fuel83 (2004) 2051-
2057.

[5]กัญจนา บุญเกียรติ. (2544).เชื้อเพลิงและการเผา
ไหม้.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.

[6]จรัส จีรวินิตย์.(2553).หม้อไอน้ำ ฉบับใช้ในโรงงาน.
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริม
เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

ประวัติผู้เขียน

นายกฤษกร รับสมบัติ เกิดเมื่อวันที่ 16 ธันวาคม พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเลาขวัญ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นบุตรของ นายสมศักดิ์ รับสมบัติ และนางลำไย เจาะขาว สำเร็จการศึกษาชั้นประถมจากโรงเรียนบ้านกรับใหญ่ อำเภอเลาขวัญ จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียนเลาขวัญราษฎร์บำรุง อำเภอเลาขวัญ จังหวัดกาญจนบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2548

ในปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนจากแหล่งทุนภายนอก ซึ่งกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา นอกจากนี้ยังทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำศูนย์ความปั่นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 โดยภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 4-5 เมษายน 2555 ณ โรงแรมอิมพีเรียลแม่ปิง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เรื่อง “การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำ โดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี