การเพิ่มสารเติมแต่งเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับหม้อต้มไอน้ำ

นายพินิจ จิรัคคกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2557

ADDITION OF ADDITIVE TO EUCALYPTUS BARK FUEL FOR BOILER

PinitJirukkakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy Mechanical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

การเพิ่มสารเติมแต่งเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับหม้อต้มไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.กีรติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ

____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

กรรมการ

____

(รศ. ดร.ธัญญะ เกียรติวัฒน์)

กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พินิจ จิรัคคกุล : การเพิ่มสารเติมแต่งเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับหม้อต้มไอน้ำ (ADDITION OF ADDITIVE TO EUCALYPTUS BARK FUEL FOR BOILER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 239 หน้า.

ไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้เศรษฐกิจที่สำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ จากข้อมูลกรมป่าไม้ปี 2556 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกไม้ยูคาฯ 5.3 ล้านไร่ กำลังการผลิต 53 ล้านตัน มีรอบตัด 3-4 รอบ หรือประมาณ 10-14 ล้านตันต่อปีต่อรอบ ซึ่งจะมีเปลือก 20% เทียบเท่า 2-2.8 ล้านตันต่อปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 298.39-417.75 ktoe แต่การใช้เปลือกไม้ยูคาฯ ในหม้อต้มไอน้ำ จะมีอุปสรรคในด้านสมบัติทางกายภาพและเคมี เนื่องจากความชื้นสูง ความหนาแน่นต่ำ และองค์ประกอบทางเคมีมีฤทธิ์เป็นด่าง (Alkali) สูง ส่งผลต่อการเกิดตะกรัน การเกิดเถ้าหลอม และการกัดกร่อนผิวท่อในห้องเผาไหม้ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเปลือกไม้ยูคาฯ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเมินแนวโน้มอิทธิพลในห้องเผาไหม้ และใช้สารเติมแต่งดินขาวเพื่อลดอิทธิพล พบว่า เปลือกไม้ยูคาฯ มีความชื้นค่าเฉลี่ย 47.65% ค่าความร้อนสูงมีค่าเฉลี่ย 16,533 kJ/kg ความหนาแน่นแบบชิ้นและแบบฝอยมีค่าเฉลี่ย 127.45, 215.40 kg/m^3 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) และออกซิเจน (O) มีค่าเฉลี่ย 39.13%, 3.91%, 0.53%, 0.41% และ 47.81% ตามลำดับ มีปริมาณเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว มีค่า 9.17%, 69.23% และ 21.61% ตามลำดับ และคลอรีน (Cl) เท่ากับ 0.98% เมื่อแปรรูปนำมาอัดแท่งจะมีความชื้นประมาณ 11-13% wb ความหนาแน่น 715 kg/m^3 และจากการประเมินแนวโน้มจากออกไซด์เปลือกไม้ยูคาฯ มีแนวโน้มการเกิดตะกรัน การเกิดเถ้าหลอม และการกัดกร่อนผิวท่อรุนแรง และเมื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบหม้อต้มไอน้ำพบว่า การใช้ออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาฯสดจากโรงงานมีความถูกต้องมากที่สุด เมื่อเทียบกับออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาฯ อัดแท่งและเถ้าหนักหลังการเผาไหม้ ส่วนการใช้ดินขาวอัตรา 5% และ 10% โดยน้ำหนัก จะลดการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนได้ 59.1%, 77.4% และ 72.3%, 88.6% ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพจะลดลง 9.5% และ 26.9% ที่ระดับความดันเดียวกัน ส่วนอัตรา 12% โดยน้ำหนักจะเกิดเถ้าหลอมอย่างรวดเร็วและทำความดันได้ต่ำ การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์การใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น แต่สามารถนำไปทดแทนถ่านหินได้ แต่ถ้าใช้เปลือกไม้ยูคาฯ อบแห้งต้นทุนจะลดลง 0.62-0.96 ล้านบาท ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 MW เทียบกับถ่านใช้ถ่านหิน โดยแนวทางกำไรมากที่สุด คือการใช้เปลือกไม้ยูคาฯ สดร่วมกับดินขาว ถูกกว่าการใช้ถ่านหินบิทูมินัสและถูกกว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอื่นร่วม

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนักศึกษา ____________

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ____________

PINIT JIRUKKAKUL : ADDITION OF ADDITIVE TO EUCALYPTUS BARK FUEL FOR BOILER. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 239 PP

DEPOSIT / FOULING / SINTERING / EUCALYPTUS BARK / KAOLIN

Eucalyptus is the one of the economic trees and also important for pulp and paper processing in Thailand. In 2003, the area for growing eucalyptus was about 5.3 MTons with the harvesting yield of 53 MTons per period in 3-4 periods, resulting in the annual production of about 10-14 MTons. From the pulp processing, barks of eucalyptus have been generated for 20% (approximately 2-2.8 MTon). As the bio-fuel, the energy from this amount can be calculated to be equal to 298.39-417.75 ktoe of crude fuel. However, the eucalyptus bark utilization in the boiler is still limited due to its high moisture content, low density and high alkali content. These may affect the fouling, slagging and corrosion in the combustion chamber. This research was aimed to study the physical and chemical properties of the eucalyptus bark from the North-eastern part of Thailand in order to evaluate its effects on the combustion chamber. In addition, the possibility to reduce those effects by addition of kaolin was also studied. The moisture content of eucalyptus bark was 47.65% and the heating value was found at 16,533 kJ/kg. The density values of pieced and shredded barks were 127.45 and 215 kg/m^3, respectively. The amount of carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur and oxygen were 39.13, 31.91, 0.53, 0.41 and 47.81%, respectively. The ash content, volatile compound,

fixed carbon, and chlorine were 9.17, 69.23, 21.61, and 0.98% , respectively. When eucalyptus bark was processed into the pellet, it showed the moisture content at 11-13% (wet basis, wb) and its density increased to be 715 kg/m^3. Based on the oxide value in eucalyptus bark, it indicated the tendency to cause the fouling, slagging and corrosion. The oxide from fresh eucalyptus bark was more suitable for boiler than that from eucalyptus bark pellet or bottom ash. Addition of kaolin for 5% could reduce the fouling and corrosion for 59.1 and 77.4% , respectively. In addition, increasing the kaolin to 10% could increase the reduction of fouling and corrosion to be 72.3 and 88.6% , respectively. However, efficiency was reduced for 9.5 and 26.9% at the same pressure level. At 12% (wb) of kaolin, the slagging and low pressure was occurred. Based on the economic analysis, pellet fuel has a potential to replace the charcoal although it production cost is increased. Utilization of dried eucalyptus bark could reduce the production cost about 0.62-0.96 MTHB for every 1 MW of electricity produced from charcoal. The utilization of fresh eucalyptus bark and kaolin together resulted in a cheaper cost than bituminous and other biomass, resulting in the highest profitability.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Mechanical Engineering | Student's Signature J. PINIT

Academic Year 2014 | Advisor's Signature ________

กิตติกรรมประกาศ

ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภท บัณฑิตศึกษาและจากงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่สนับสนุนทุนวิจัย ประจำปี 2553ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ดุษฎีนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ให้โอกาสทางการศึกษาให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ คอยให้การช่วยเหลือ แนะนำและแก้ไขปัญหาจนดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์รองศาสตราจารย์นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศรองศาสตราจารย์ดร. ธัญญะ เกียรติวัฒน์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กีรติ สุลักษณ์ที่ให้ข้อเสนอแนะในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มศึกษาจนแล้วเสร็จ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลงได้โดยสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร บัณฑิตศึกษา และ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนให้การทำวิจัยสำเร็จลุล่วง ขอกราบระลึกถึงบุญคุณของครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับศิษย์ และขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัวอันเป็นส่วนสำคัญยิ่งให้สามารถต่อสู้และผ่านปัญหาอุปสรรคต่างๆ มาได้

สำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาผู้ให้กำเนิดที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ส่งเสริมการศึกษาและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมาทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดีจนประสบความสำเร็จในชีวิต

พินิจ จิรัคคกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฑ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ท

บทที่

1 บทนำ 1
- 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
- 1.2 วัตถุประสงค์ 2
- 1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
- 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
- 2.1 บทนำ 5
- 2.2 เชื้อเพลิง (Fuel) ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไอน้ำ 11
- 2.3 สถานภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศ 12
- 2.4 สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกยูคาลิปตัส 13
  - 2.4.1 สมบัติทางกายภาพ (ขนาด ความหนาแน่นและความชื้น) 13
  - 2.4.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) 14
  - 2.4.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) 14
  - 2.4.4 ค่าความร้อน (Heating Value) 14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.5 ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ (High and Low Heating Value; HHV and LHV) 15

2.5 ศักยภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 16

2.6 เทคโนโลยีการแปรรูปไม้ยูคิลิปตัส 16

2.7 การผลิตพลังงานจากชีวมวล 17

2.7.1 กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) 18

2.7.2 ระบบผลิตพลังงาน (Power Generation System) 24

2.7.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) 26

2.7.4 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น (Gasification) 27

2.8 สถานภาพการใช้ประโยชน์เปลือกยูคาลิปตัส 31

2.8.1 คุณสมบัติและอิทธิผลของการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้เป็นเชื้อเพลิง 31

2.8.2 มลพิษอากาศที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล 39

2.9 แนวทางการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิง 41

3 เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย 53

3.1 บทนำ 53

3.2 ขั้นตอนการวิจัย 54

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 57

3.3.1 วัสดุในการทดสอบและเครื่องจักรสำหรับการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 57

3.3.2 เครื่องมือในการทดสอบและเครื่องมือวัดของหม้อต้มไอน้ำ 59

3.3.3 เครื่องมือในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี 65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 66
3.4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากโรงงานสับไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อประเมินความเป็นเชื้อเพลิงและแนวโน้ม การเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน 66
3.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับดินขาว 5%, 10%, 12% และอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในหม้อต้มไอน้ำขนาด Pilot scale 70
4 ผลการทดลอง 78
4.1 ผลการสำรวจปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 78
4.1.1 สมบัติทางกายภาพ (ขนาด ความหนาแน่นและความชื้น) 82
4.1.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) 83
4.1.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) 84
4.1.4 ค่าความร้อน (Heating Value) 85
4.1.5 ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ (High and Low Heating Value; HHVandLHV) 85
4.1.6 การศึกษาองค์ประกอบเคมีในรูปของออกไซด์ ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 87
4.2 ผลการเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 90
4.3 ผลทดสอบการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งกับระบบความร้อนระดับเครื่องต้นแบบ (Pilot scale) 92
4.3.1 การทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับสารเติมแต่งในหม้อต้มไอน้ำโดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ไหม้ 92

สารบัญ (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หน้า

4.4 การทดสอบอิทธิพลของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนการเกิดตะกรันเกาะท่อและเถ้าหลอม 99

4.5 การวิเคราะห์มลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยเทคโนโลยีการเผาไหม้ 136

4.6 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับการใช้ดินขาว 137

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 147

5.1 สรุป 147

5.1.1 สรุปภาพรวมสถานการณ์เปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 147

5.1.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 147

5.1.3 ผลการทดสอบเชื้อเพลิงอัดแท่งกับประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและผลกระทบมลพิษ 148

5.1.4 การวิเคราะห์ออกไซด์ของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเปรียบเทียบกับเถ้าจากการทดสอบ เชื้อเพลิงอัดแท่งในหม้อไอน้ำ 149

5.1.5 ผลของการใช้ดินขาวผสมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อไอน้ำ 151

5.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับการใช้ดินขาว 154

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต 154

รายการอ้างอิง 155

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. แบบสอบถาม 160

ภาคผนวก ข. ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 163

ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและยูคาลิปตัสอัดแท่ง 174

ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์องประกอบของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 177

ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ 191

ภาคผนวก ฉ. ผลการวิเคราะห์ไอเสีย 197

ภาคผนวก ช. ผลการวิเคราะห์ความดันและอัตราการไหล 209

ภาคผนวก ซ. ตัวอย่างการคำนวณ 214

ภาคผนวก ฌ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา 220

ประวัติผู้เขียน 237

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวและจุด eutectic สำหรับสารประกอบบริสุทธิ์และสารประกอบผสมของเถ้าชีวมวลที่เกาะท่อไอน้ำ 9
2.2 สมบัติทางกายภาพของเปลือกยูคาลิปตัส 13
2.3 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value) ของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัส 14
2.4 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัส 14
2.5 ศักยภาพเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสในการผลิตไฟฟ้าของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 16
2.6 พฤติกรรมของเถ้าสำหรับ Initial Deformation Temperature (I.D.T.) 33
2.7 แสดงค่า Fouling Index (Rf) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 37
2.8 แสดงค่า Sodium Oxide (Na_2O) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 37
2.9 แสดงค่า Fouling Index (Rf) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 38
2.10 แสดงค่า % ของ Active Alkali ในถ่านหินที่มีผลต่อการเกิด Fouling 38
2.11 แสดงค่าปริมาณคลอรีน (Chlorine) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 39
2.12 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด 42
3.1 สมบัติของสารเติมแต่งของดินขาวจากบริษัทสยามซอยล์ จำกัด 57
3.2 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อยแบบละเอียด (Hammer mill) 58
3.3 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องอัดแท่ง (PelletizingMachine) 58
3.4 คุณลักษณะของเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger รุ่น midi Logger GL 820 ของบริษัท Graphtec 60
3.5 ความสามารถในการวัดอัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดที่ความดันต่างๆ ของ flow meterรุ่น DN50 ของ ยี่ห้อ SpiraxSarco 61
3.6 รายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน 63
3.7 แสดงค่า Fouling Index (Rf) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

3.8 แสดงค่า Sodium Oxide (Na_2O) ในเถ้าที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 70
3.9 แสดงค่าปริมาณคลอรีน (Chlorine) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling 70
3.10 การวัดและวิเคราะห์การผลิตความร้อนและอิทธิพลที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิง เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 76
3.11 การวัดและวิเคราะห์มลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 77
4.1 ผลการสำรวจแบบสอบถามโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือปี 2554 80
4.2 สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 83
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 84
4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในรูปออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Vassilev, S.V., et al. (2010) 88
4.5 แสดงค่าของพารามิเตอร์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำให้เกิด Slagging และ Fouling 89
4.6 การทดสอบสมรรถนะของการผลิตไอน้ำและประสิทธิภาพของ Boiler 97
4.7 ผลการทดสอบปริมาณตะกรันที่เกาะท่อ 98
4.8 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเชื้อเพลิงโดยใช้เชื้อเพลิง ไม้กระถินยักษ์กับเปลือกยูคาอัดแท่ง 98
4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในรูปออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง และผสมดินขาวในอัตรา 5,10 และ12% โดยน้ำหนัก 131
4.15 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการเลือกใช้เชื้อเพลิง เปลือกไม้ยูคาลิปตัสร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ดินขาวลดอิทธิพลสำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 1 MW 144
4.10 แสดงค่าของพารามิเตอร์ของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำให้เกิด ตะกรันและจับตัวเป็นก้อน 133

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.11 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในรูปของออกไซด์ของเถ้าหนัก (ผง) ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาวในอัตรา 5,10 และ12% โดยน้ำหนัก 135
4.12 แสดงค่าของพารามิเตอร์ของเถ้าหนัก(ผง) ของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำเกิดตะกรันและจับตัวเป็นก้อน 135
4.13 แก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเชื้อเพลิงขยะ โดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง 136
4.14 ต้นทุนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 138
ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 164
ค.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 175
ค.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 176
ง.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 178
ง.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด 181
ง.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าหนัก เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด 183
ง.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าหลอม เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด 185
ง.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของตะกรันเกาะท่อ เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด 187
ง.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าลอย เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด 189
จ.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ 192
ฉ.1 ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 198
ฉ.2 ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 200
ฉ.3 ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 5% 202

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ฉ.4 ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 10% 204
ฉ.5 ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12% 206
ช.1 ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง 210
ช.2 ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 5% 211
ช.3 ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 10% 212
ช.4 ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 12% 213
ซ.1 แสดงเงื่อนไขกรณีของเถ้าที่มีค่า CaO + MgO < Fe_2O_3) เท่านั้น 218
ซ.2 แสดงเงื่อนไขกรณีเถ้าที่มีค่า CaO + MgO > Fe_2O_3 ซึ่งปริมาณร้อยละของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ในเถ้าจะบอกถึงแนวโน้มการเกิด Fouling 218

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 เถ้าที่เกาะท่อและตะกรันก่อผิวท่อของโรงไฟฟ้าในเมืองฉางฉุนประเทศจีน 7

2.2 แผนผังการปลดปล่อย K, Cl และ S ของชีวมวลขณะเกิดการเผาไหม้ 7

2.3 ลักษณะการไหลวนของเถ้าลอยและไอระเหยจากการเผาไหม้ในเตา 8

2.4 ลักษณะปฏิกิริยาของการออกซิเดชั่นต่อท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน 10

2.5 กระบวนการผลิตไม้ยูคาลิปตัสสับ 17

2.6 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง 18

2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินกับคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน 20

2.8 ลักษณะของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงไม้ขนาดท่อนสั้น 20

2.9 ระบบการเผาไหม้แบบตะกรับเลื่อน 22

2.10 ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด 23

2.11 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire-tube boiler) 25

2.12 หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water-tube boiler) 26

2.13 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น 28

2.14 อุณหภูมิในการศึกษาพฤติกรรมของเถ้า (Critical Temparature Point) 33

2.15 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบโรตารีขนาด 150 kg/h 42

2.16 ตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบโรตารีขนาด 150 kg/h (ต่อ) 43

2.17 เครื่อง Hammer Mill 44

2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความหนาแน่น 45

2.19 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ 46

2.20 ลักษณะของเครื่องแท่งชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน 47

2.21 แสดงอุปกรณ์การวัดการเกิดตะกรัน พัฒนาโดย Zbogar, A.,et al 49

2.22 Chemical classification and genetic mineral classification systems of high temperatureash. 50

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.23 สหสัมพันธ์ของ SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3และCaO ต่อ initial deformation temperature 51
2.24 สหสัมพันธ์ของ MgO, TiO_2, SO_3และ P_2O_5ต่อ initial deformation temperature 51
2.25 สหสัมพันธ์ของ K_2O_3+Na_2O ต่อ initial deformation temperature 52
3.1 ขั้นตอนการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ในโรงงานสับไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อประเมินความเป็น เชื้อเพลิงและแนวโน้มการเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน 55
3.2 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพและอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อน ในการผลิตพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ร่วมกับดินขาว 5%, 10%, และ 12% ของหม้อต้มไอน้ำขนาด Pilot scale 56
3.3 เครื่องบดละเอียด (Hammer mill) 58
3.4 ลักษณะของเครื่องอัดแท่งชีวมวล(Pelletizing Machine) 59
3.5 อุปกรณ์วัดการเกาะของตะกรันภายในเตา 61
3.6 เครื่องหล่อเย็นด้วยน้ำ 62
3.7 ปั๊มลมสำหรับหล่อเย็น 62
3.8 หม้อต้มไอน้ำชนิดท่อน้ำ 63
3.9 ระบบผลิตพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ 64
3.10 ระบบการผลิตและใช้ไอน้ำ 65
3.11 การทำงานของระบบผลิตไอน้ำ 65
3.12 กระบวนการเตรียมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 71
3.13 แสดงลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างการเกิด Deposit 72
3.14 ลักษณะคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในการผลิตลม 73
3.15 ระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำ 75

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.1 จำนวนโรงงานสับไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 79
4.2 โรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสของในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 81
4.3 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส 82
4.4 การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส 82
4.5 การเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 83
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้น ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ 87
4.7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส จากการสำรวจภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 88
4.8 แสดงกระบวนการสับย่อยด้วยเครื่อง Hammer Mill 90
4.9 แสดงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสก่อนและหลังการสับด้วยเครื่อง Hammer Mill 91
4.10 แสดงวิธีการอัดเม็ดเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 91
4.11 แสดงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการอัดเม็ดแล้ว 92
4.12 เกจวัดแสดงแรงความดันในหม้อต้มไอน้ำ 93
4.13 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลไอน้ำ 94
4.14 ไอน้ำที่ผลิตได้ 94
4.15 กระบวนการทดสอบหม้อต้มไอน้ำ 95
4.16 ลักษณะการเกิดของเถ้าหลอมภายในห้องเผาไหม้ (ซ้าย) การงัดเถ้าหลอมขึ้นเพื่อให้อากาศเข้าเผาไหม้ได้ตามปกติ (ขวา) 99
4.17 อุปกรณ์การเกาะเถ้าลอยภายนอกท่อที่ทำการทดสอบ(ซ้าย) ลักษณะของเถ้าที่หลอมตัวภายในเตาของเถ้าก้นเตา(Bottom Ash) 101
4.18 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 10จ
4.19 ลักษณะของออกไซด์ของเถ้าทำปฏิกิริยาท่อไอน้ำ 101
4.20 ผลการวิเคราะห์ค่าด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อัดแท่ง (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง) 103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.21 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง) 104
4.22 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งที่เป็นลักษณะเถ้า (ซ้าย) และ ของเถ้าที่ลักษณะเป็นก้อนซิลิกา (ขวา) 105
4.23 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของผิวของเถ้าที่จับตัวเป็นก้อนโดยจะหลอมตัวและที่หลอมจะจับตัวของเถ้าและก่อตัวเป็นก้อน 105
4.24 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอักแท่ง 106
4.25 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาสลิปตอัดแท่ง 107
4.26 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของตะกรันเกาะผิวท่อไอน้ำ (ก) กำลังขยาย 50 เท่า (บน) (ข) กำลังขยาย 2500 เท่า (ล่าง) 108
4.27 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 109
4.28 การเตรียมเชื้อเพลิงและผสมสารเติมแต่งในการทดสอบ 110
4.29 ลักษณะภายในเตาและตำแหน่งอุปกรณ์เก็บการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำ 111
4.30 ลักษณะเก็บตัวอย่างเถ้า 112
4.31 ลักษณะเถ้าที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้ 113
4.32 ผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของเถ้าหนักด้วยเครื่อง XRD ที่เถ้าเป็นผงและใช้สารเติมแต่งดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% 114
4.33 ลักษณะเถ้าหนักบางส่วนที่มีปริมาณมากเกินไปและไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง 115
4.34 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าหนักที่อัตรา 12% ในบางส่วนที่มีปริมาณมากเกินไปและไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง 116
4.35 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าหนักที่จับตัวเป็นก้อน 117
4.36 ผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12 % โดยน้ำหนัก 118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.37 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 5% โดยน้ำหนัก (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง) 119
4.38 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 10% โดยน้ำหนัก (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง) 120
4.39 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 12% โดยน้ำหนัก (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง) 121
4.40 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ผสมดินขาว 5% 123
4.41 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ผสมดินขาว 10% 124
4.42 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ผสมดินขาว 12% 125
4.43 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก 126
4.44 ลักษณะเถ้าลอยและออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมดินอัตรา 5% โดยน้ำหนัก 127
4.45 ลักษณะเถ้าลอยและออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมดินอัตรา 10% โดยน้ำหนัก 127
4.46 ลักษณะเถ้าลอยและออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมดินอัตรา 12% โดยน้ำหนัก 127
4.47 ลักษณะเถ้าลอยที่สะสมอยู่ด้านหลังท่อ 128

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.48	ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่องSEM ของตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิงผสมดินขาว 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก	129
4.49	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12%โดยน้ำหนัก	130

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AI	=	ดัชนีความเป็นด่าง (Alkali Index)
Al	=	ธาตุอลูมิเนียม (Aluminum)
Al_2O_3	=	ก๊าซอลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminuimoxide)
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	=	อลูมินั่มซิลิเกทไฮดรอกไซด์(Aluminum Silicate Hydroxide)
ASTM	=	สมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน(Amarican Society of Testing and Material)
Ba	=	แบเรียม(Barium)
BAI	=	ดัชนีการจับตัวเป็นก้อน (Aggromeration Index)
Be	=	เบริลเลียม(Beryllium)
C	=	ธาตุคาร์บอน (Carbon)
Ca	=	ธาตุแคลเซียม (Calcium)
CaO	=	ก๊าซแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium oxide)
$CaCO_3$	=	แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)
$CaMg(CO_3)_2$	=	แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium magnesium dioxide)
CH_4	=	ก๊าซมีเทน(Methane)
C_2H_6	=	ก๊าซอีเทน(Ethane)
Cl	=	ธาตุคลอรีน (Cholorine)
CO	=	ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (Carbonmonoxide)
CO_2	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide)
$CrCl_2$	=	โครเมียมคลอไรด์(Chromium II chlorides)
$CrCl_3$	=	โครเมียมคลอไรด์(Chromium III chlorides)
%db	=	ร้อยละมาตรฐานแห้ง (%Dry basis)
EDXRF	=	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer
g	=	กรัม (gram)
GWh	=	กิกะวัตต์ชั่วโมง(Gigawatt-hour)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

Fe	=	ธาตุเหล็ก (Ferrous)
$FeCl_2$	=	เฟอร์รัสคลอไรด์ (Ferrous chloride)
$FeCl_3$	=	เฟอร์รัสคลอไรด์ (Ferrous chloride)
Fe_2O_3	=	เฟอริคออกไซด์ (Ferric oxide)
F.T	=	อุณหภูมิที่ตัวอย่างเถ้าหลอมละลายจนไหล ซึ่ง ณ จุดนี้ ความสูงของตัวอย่างเถ้าจะมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของความกว้าง ของฐาน (Flow Temperature)
kg	=	กิโลกรัม (Kilogram)
ktoe	=	พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ(Kilotons of Oil Equivalents)
H	=	ธาตุไฮโดรเจน (Hydrogen)
H_2	=	ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen gas)
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochoric acid)
$H_2O_{(g)}$	=	ไอน้ำ (Stream)
HHV	=	ค่าความร้อนสูง (High Heating Value)
hr	=	ชั่วโมง (hour)
H.T	=	อุณหภูมิที่ตัวอย่างเถ้าหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับ 2เท่าของความสูง(Hemispherical Temperature)
I.D.T.	=	อุณหภูมิที่เถ้าเริ่มหลอมตัว (Initial Deformation Temperature)
K	=	โพแทสเซียม (Potassium)
$KAlSiO_4$	=	โพแทสเซียมอลูมิเนียมซิลิเกท(Potassiumaluminuim silicate)
$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	=	โพแทสเซียมอลูมินั่มซิลิเกทไฮดรอคไซด์(Potassiumaluminum silicate hydroxide)
KCl	=	โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassiumchloride)
KCl_s	=	โพแทสเซียมคลอไรด์สถานะของแข็ง (Potassiumchloride)
K_2CO_3	=	โพแทสเซียมคาร์บอเนต(Potassium carbonate)
K_2CrO_4	=	โพแทสเซียมโคเมท (Potassium chromate)
$K_2Cr_2O_7$	=	โพแทสเซียมไดโคเมท (Potassium dichromate)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

K_2O	=	ก๊าซโพแทสเซียมออกไซด์ (Potassuim oxide)
kg	=	กิโลกรัม (Kilogram)
K_2OnSiO_2	=	โพแทสเซียมซิลิเกท (Potassuim silicate)
K_2SO_4	=	โพแทสเซียมซัลเฟต(Potassuim sulfate)
kW	=	กิโลวัตต์ (Kilowatt)
LHV_{fuel}	=	Low Heating Value(MJ/kJ)
m_{fuel}	=	Fuel Consumption (kg/hr)
MC	=	ความชื้น (Moisture content)
Mg	=	ธาตุแมกนีเซียม (Magnesium)
MgO	=	ก๊าซแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide)
MJ	=	เมกะจูล (Mega Joule)
N	=	ธาตุไนโตรเจน (Nitrogen)
Na	=	ธาตุโซเดียม (Sodium)
NaCl	=	โซเดียมคลอไรด์ (Sodiumchloride)
Na_2CrO_4	=	โซเดียมโครเมท (Sodium chromate)
ND	=	ตรวจไม่พบ(Not detected)
NO	=	ก๊าซไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide)
NO_2	=	ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen dioxide)
NO_x	=	ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (Nitrogen oxide)
Na_2O	=	โซเดียมออกไซด์ (Sodium oxide)
$Na_2Cr_2O_7$	=	โซเดียมไดโคเมท (Sodium dichromate)
O	=	ธาตุออกซิเจน (Oxygen)
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน(Oxygen gas)
$O_{2(g)}$	=	ออกซิเจนสถานะก๊าซ(Oxygen gas)
P	=	ธาตุฟอสฟอรัส (Phosphorus)
Ra	=	เรเดียม (Radium)
$R_{b/a}$	=	สัดส่วนด่างต่อกรด (Base to Acid Ratio)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

R_f	=	ดัชนีการเกาะท่อ(Fouling Index)
Rs	=	ดัชนีการจับตัวเถ้าหลอม(Slagging Index)
TiO_2	=	ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
%wt	=	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%By weight)
%wb	=	ร้อยละมาตรฐานเปียก (% Wet basis)
S	=	ธาตุซัลเฟอร์ (Sulphur)
Si	=	ธาตุซิลิคอน (Silicon)
SO_2	=	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulphur dioxide)
$SO_{2(g)}$	=	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สถานะก๊าซ (Sulphur dioxide)
SiO_2	=	ก๊าซซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)
SO_x	=	ก๊าซออกไซด์ของซัลเฟอร์ (Sulphur oxide)
S.T.	=	อุณหภูมิที่เถ้าหลอมละลายจนความสูงของแท่งตัวอย่างเถ้าลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูง(Spherical Temperature)
Sr	=	สตรอนเซียม (Strontium)
η	=	ประสิทธิภาพ (efficiency)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศเนื่องจากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อีกทั้งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ(เยาวนุช บริสุทธิพงศากุล,2556)จากข้อมูลกรมป่าไม้พื้นที่เพาะปลูกไม้ยูคาลิปตัสของประเทศไทยมีประมาณ 5.3 ล้านไร่โดยแบ่งเป็นพื้นที่แปลง 3.5 ล้านไร่และพื้นที่หัวไร่คันนา 1.5-1.8 ล้านไร่ กำลังการผลิต 53 ล้านตัน จะมีรอบตัด 3-4 รอบซึ่งปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเป็นเยื่อกระดาษ 10-14 ล้านตันต่อปีหรือประมาณ60%ของผลผลิตทั้งหมดและเป็นไม้ชีวมวล 3-5 ล้านตันต่อปี หรือประมาณ30%และอื่นๆเช่น ไม้เสาเข็ม ไม้ค้ำยัน ฯลฯ ประมาณ 10%ซึ่งการผลิตไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเป็นวัตถุดิบผลิตเยื่อกระดาษนั้นจะมีผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ เปลือกไม้ซึ่งจะมีสัดส่วนร้อยละ 20 ของไม้สด เมื่อนำมาคำนวนปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เกิดขึ้นมีปริมาณ2-2.8 ล้านตันต่อปีคิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 298.39-417.75ktoe(วีรชัย อาจหาญ,2554) โดยทำการสำรวจการใช้ประโยชน์เปลือกไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ปัจจุบันในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าและ/หรือความร้อนเพียง 0.52 ล้านตันคิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 112.54ktoeเท่านั้น สาเหตุเนื่องมาจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นสูงเฉลี่ย 48.27%และความหนาแน่นต่ำเป็นอุปสรรคต่อการบรรทุกทำให้ต้นทุนการขนส่งสูง อีกทั้งมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลต่อระบบป้อนและการเผาไหม้ นอกจากนี้ในส่วนของสมบัติทางเคมีและองค์ประกอบแยกธาตุของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง(Alkali) สูง เช่น คลอรีน(Cl) โซเดียม(Na) แคลเซียม(Ca) และ โพแทสเซียม(K) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนของผิวท่อไอน้ำ และส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการผลิตความร้อน ทำให้ปัจจุบันไม่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนที่มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องนำเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆมาผสมเพื่อลดอิทธิพลจากการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อน

โดยงานวิจัยนี้เป็นงานต่อยอดจากงานวิจัยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นเชื้อเพลิงของกฤษกรรับสมบัติ(2555) จากการศึกษาพบว่า การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดไม่มีเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำที่มีห้องเผาไหม้ขนาดเล็กเนื่องจากการเผาไหม้จะไม่สามารถ

เผาไหม้เชื้อเพลิงได้หมด อีกทั้งเมื่อใช้งานในการผลิตไอน้ำที่ความดันสูงประสิทธิภาพจะลดลง เนื่องจากการเผาไหม้ไม่ทันและค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม่สูงเพียงพอต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้ไม่สามารถทำความดันได้สูงแต่ถ้าใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะสามารถต้มไอน้ำได้ตามที่กำหนดและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำซึ่งความดันสูงสุดที่สามารถทำได้คือ12 บาร์ ที่อัตราการผลิตไอน้ำ1500 kg_{vapor}/hrจากงานวิจัยดังกล่าว ทำให้การใช้งานเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีแนวโน้มที่จะสามารถนำมาใช้กับหม้อต้มไอน้ำที่มีขนาดห้องเผาไหม้เล็กได้ แต่ยังมีอุปสรรคเรื่องปริมาณสารประกอบภายในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีปริมาณด่างสูงส่งผลต่อการใช้งานในระยะยาวทำให้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงอิทธิพลของการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและองค์ประกอบธาตุที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูง ที่ส่งผลต่อการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนที่ผิวท่อภายในห้องเผาไหม้ได้ โดยวัตถุประสงค์ของโครงการนี้มุ่งเน้นการศึกษาการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100%และลดอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนด้วยการใช้สารเติมแต่ง(Additive)ต่อการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อต้มไอน้ำและอิทธิพลที่ส่งผลต่อระบบการถ่ายเทความร้อนในระบบหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

1.2.2 เพื่อศึกษาการประเมินแนวโน้มการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และ การกัดกร่อน (Slagging, Fouling and Corrosion) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

1.2.3 เพื่อศึกษาการใช้งานและประสิทธิภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง (Eucalyptus Bark Pellet) ในระบบเผาไหม้โดยตรง(Direct Combustion) ในหม้อไอน้ำชนิดท่อน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่สำรวจในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

1) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ได้แก่ ขนาด ความชื้น และความหนาแน่น

2) สมบัติทางเคมีได้แก่การวิเคราะห์แบบประมาณ(Proximate analysis)และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ(Ultimate analysis)

2.1) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ ได้แก่ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า (% Ash) ปริมาณสารระเหย (%Volatile Matter) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (%Fixed Carbon)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ได้แก่ C, H, N, S,O และ Cl

3) ศึกษาสารประกอบในรูปของออกไซด์ด้วยการวิเคราะห์ทางเคมีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

1.3.2 ประเมินแนวโน้มการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน การกัดกร่อน จากออกไซด์และสารประกอบจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

1.3.3 ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพการผลิตความร้อนและไอน้ำจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ในระบบเผาไหม้โดยตรงของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำโดยสมรรถนะการผลิตไอน้ำสูงสุดของหม้อต้มไอน้ำ 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมงหรือความดันสูงสุด 22 บาร์

1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของการผสมดินขาว (Kaolin, China clay)ต่อปริมาณเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน การกัดกร่อนในระบบเผาไหม้โดยตรงของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ โดยสมรรถนะการผลิตไอน้ำสูงสุดของหม้อต้มไอน้ำ500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือความดันสูงสุด 22 บาร์

1.3.5 ประเมินแนวโน้มการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน การกัดกร่อน จากออกไซด์และสารประกอบจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและเถ้าหนักหลังทดสอบ

1.3.6 ศึกษามลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและการผสมดินขาวในเชื้อเพลิง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ด้านเศรษฐกิจ

เพื่อส่งเสริมให้ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนมากขึ้นทั้งภาคอุตสาหกรรมขนาดเล็กและอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล ลดการนำเข้าพลังงานจากภายนอก เพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและทำให้การค้าขายชีวมวลดังกล่าวมีความเข้มแข็ง มีเงินหมุนเวียนตลอดเวลาเพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรและโรงงานแปรรูปไม้

1.4.2 ด้านสังคม

รายได้ที่เพิ่มขึ้นในภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมนั้น จะทำให้เกิดความกินดีอยู่ดีมีการย้ายแรงงานกลับคืนถิ่น สอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาลที่มุ่งเน้นให้แต่ละชุมชนใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เป็นเครื่องมือการสร้างความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจและสังคมให้กับชุมชนของตนเองได้

1.4.3 ด้านทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม

สามารถใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเป็นพลังงานทดแทนและลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่าตลอดจนลดการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นต้นเหตุปัญหาของภาวะโลกร้อน

1.4.4 ด้านการขยายผล

สามารถขยายผลการศึกษา ลดผลกระทบจากการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าชีวมวล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทถ่านหินที่ก่อปัญหาการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันเกาะผิวท่อและการกัดกร่อนในหม้อต้มไอน้ำเมื่อเผาไหม้และส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำซึ่งสาเหตุของปัญหาที่สำคัญของการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันเกาะผิวท่อและการกัดกร่อนคือองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิง ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้จากต้นเหตุคือ การปรับสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง หรือเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานก็จะทำให้ปัญหาเถ้าหลอม, ตะกรันเกาะผิวท่อและการกัดกร่อนลดลง โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและเถ้าชีวมวลที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในรูปของออกไซด์ซึ่งประกอบด้วยSiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, K_2O และ Na_2O โดยแยกเป็นส่วน Acidic Oxides และ Basic Oxides เพื่อประเมินและวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันเกาะผิวท่อและการกัดกร่อน จากที่กล่าวมาข้างต้น เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะประกอบด้วยโพแทสเซียม(Potassium, K) คลอรีน(Chlorine, Cl) และโซเดียม(Sodium, Na)ซึ่งเป็นต้นเหตุของปัญหาการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันเกาะผิวท่อและการกัดกร่อนที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งถ้าเกิดเถ้าหลอมปริมาณมากๆ บนตะกรันเตาจะส่งผลต่อการกระจายลมภายในห้องไหม้ทำให้เผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์

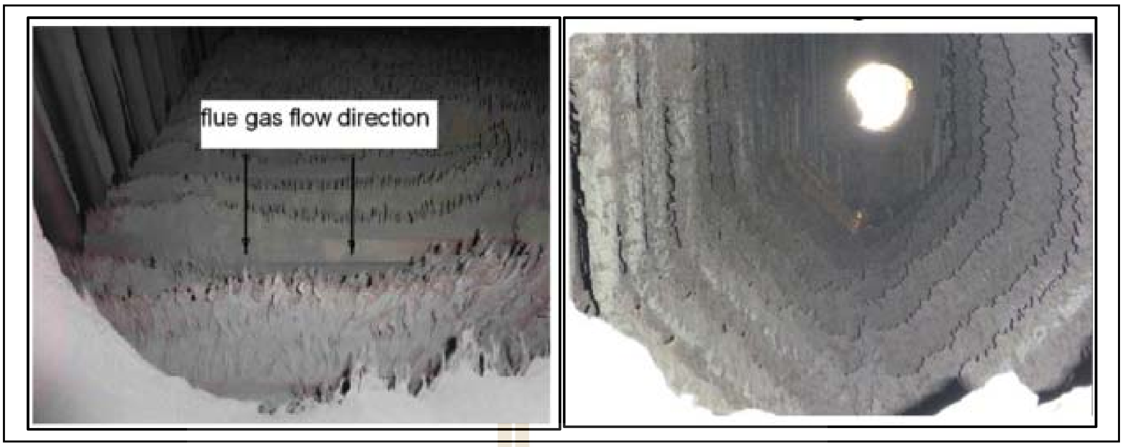
การเกิดเถ้าหลอมจะเกิดจาก ซิลิคอน(Silicon, Si) กับโพแทสเซียมทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้และเกิดเป็น Eutectic Compound ในเถ้าทำให้เกิดเป็นสารประกอบโพแทสเซียมซิลิเกท(Potassium-Silicate, K_2OnSiO_2) โดยอุณหภูมิหลอมเหลวจะอยู่ในช่วงประมาณ 770-1,045ºCขึ้นอยู่กับสัดส่วนของโพแทสเซียมต่อซิลิเกท ดังตารางที่ 2.1ส่วนในกระบวนการเผาไหม้สารประกอบโพแทสเซียมคลอไรด์(Potassium chloride, KCl) และ โพแทสเซียมซัลเฟต(Potassium sulfate,K_2SO_4)จะถูกระเหยเป็นก๊าซขณะเผาไหม้ส่วนที่เหลือจะเป็นโพแทสเซียมที่อยู่ในเถ้าในรูปของสารประกอบโพแทสเซียมซิลิเกทซึ่งเมื่ออุณหภูมิในเตาสูง700ºCโพแทสเซียมซิลิเกทจะเกิดการเริ่มหลอมเหลวทำให้เกิดเถ้าหลอมและจับตัวกันเป็นก้อนบนเบดของเตาหม้อต้มไอน้ำการเกิด Slagging และ Fouling เกิดขึ้นจากการหลอมตัวของโลหะอัลคาไลน์ (ธาตุหมู่ 1, 2) เช่น K, Ca, Na และ Mg ในชีวมวลที่เป็นสารระเหย (Volatile) ภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้ซึ่งเมื่อเผาไหม้จะเกิดจากการหลอมตัว

ของสารประกอบออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นเบส เช่นFe_2O_3, CaO, MgO, K_2O และ Na_2O ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2ซึ่งภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้จะเกิดก๊าซ KCl และ K_2SO_4 ขึ้นและจะลอยขึ้นไปกลั่นตัวบนผิวท่อไอน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิผิวท่อประมาณ 550ºCและทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ออกไซด์ในไอเสีย เกิดเป็นสารประกอบซัลเฟตที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมาก ส่งผลให้เกิดการหลอมตัวเป็นคราบเหนียวเคลือบตามผิวท่อคอยจับฝุ่นขี้เถ้าที่ลอยมาและถ้าในการผลิตไอน้ำเป็นไอน้ำยิ่งยวด(Super Heat) อุณหภูมิผิวท่อจะสูงขึ้นเป็น580ºC ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิเผาไหม้สูงขึ้นก๊าซ KCl และ K_2SO_4 จะมีอัตราการเกิดที่เร็วขึ้นทำให้เกิดการควบแน่นบนผิวท่อมากขึ้นซึ่งจะทำให้เกิด Depositมากขึ้นและยางเหนียวมากขึ้นทำให้การจับเถ้าลอยที่มากับ flue gas เกาะติดที่ผิวท่อจะมีอย่างต่อเนื่องทำให้ชั้นของ Deposit จะหนาขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไปจะมีผลต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแย่ลงและปัญหาการกัดกร่อนของท่อไอน้ำจะเกิดขึ้นตามมาดังรูปที่ 2.2และรูปที่ 2.3

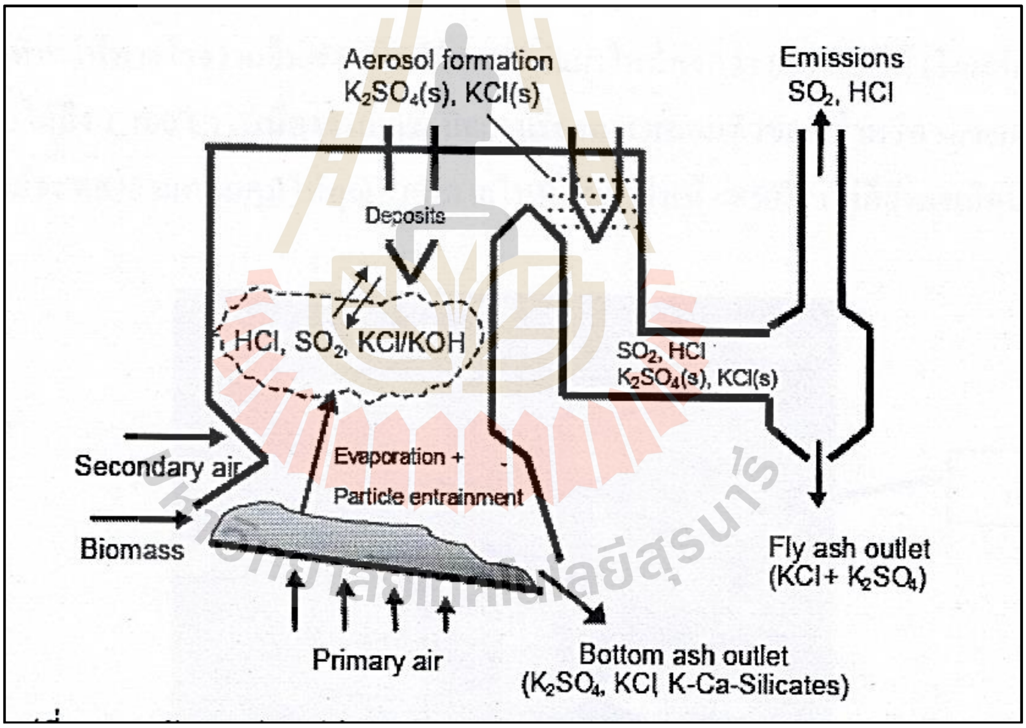
การกัดกร่อนก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดเมื่ออุณหภูมิผิวท่อสูงเกิน 450-500ºCไอระเหยที่มากับก๊าซในรูปของออกไซด์และสารประกอบที่มากับเถ้าลอยจะทำการกัดกร่อนดังสมการที่ 2.1 โดยกลไกการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.4ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นกับท่อเหล็กกับออกไซด์ของโลหะและก๊าซที่เป็นคลอไรด์ เช่น Cl_2และHClโดยตะกรันที่เกาะผิวท่อจะกัดกร่อนท่อที่ด้านล่างที่อุณหภูมิหลอมเหลวของ KCl ประมาณ 772ºCและเมื่อเป็นสารประกอบจุดหลอมเหลวผสมeutecticก็จะต่ำลงดังตารางที่ 2.1 โดยที่ตะกอนเถ้าลอยของ KCl-$FeCl_2$ หรือ NaCl-$FeCl_2$ มีอุณหภูมิeutectic อยู่ในช่วง 340-393ºCและ370-374ºCตามลำดับก็จะทำการควบแน่นและทำปฏิกิริยากับผิวท่อและทำการกัดกร่อน โดยเฉพาะในสภาวะที่มีHCl เป็นก๊าซจะเกิดการแพร่เข้าสู่ผิวท่อและทำปฏิกิริยากับท่อทำให้เกิดทำการกัดกร่อนเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นเถ้าที่เกาะผิวท่อเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาค่าส่วนประกอบธาตุจะสามารถบอกอิทธิพลของการกัดกร่อนจากคลอไรด์ได้

$$2KCl_{(s)} + SO_{2(g)} + 0.5O_{2(g)} + H_2O_{(g)} \rightarrow K_2SO_{4(S)} + 2HCl_{(g)} \tag{2.1}$$

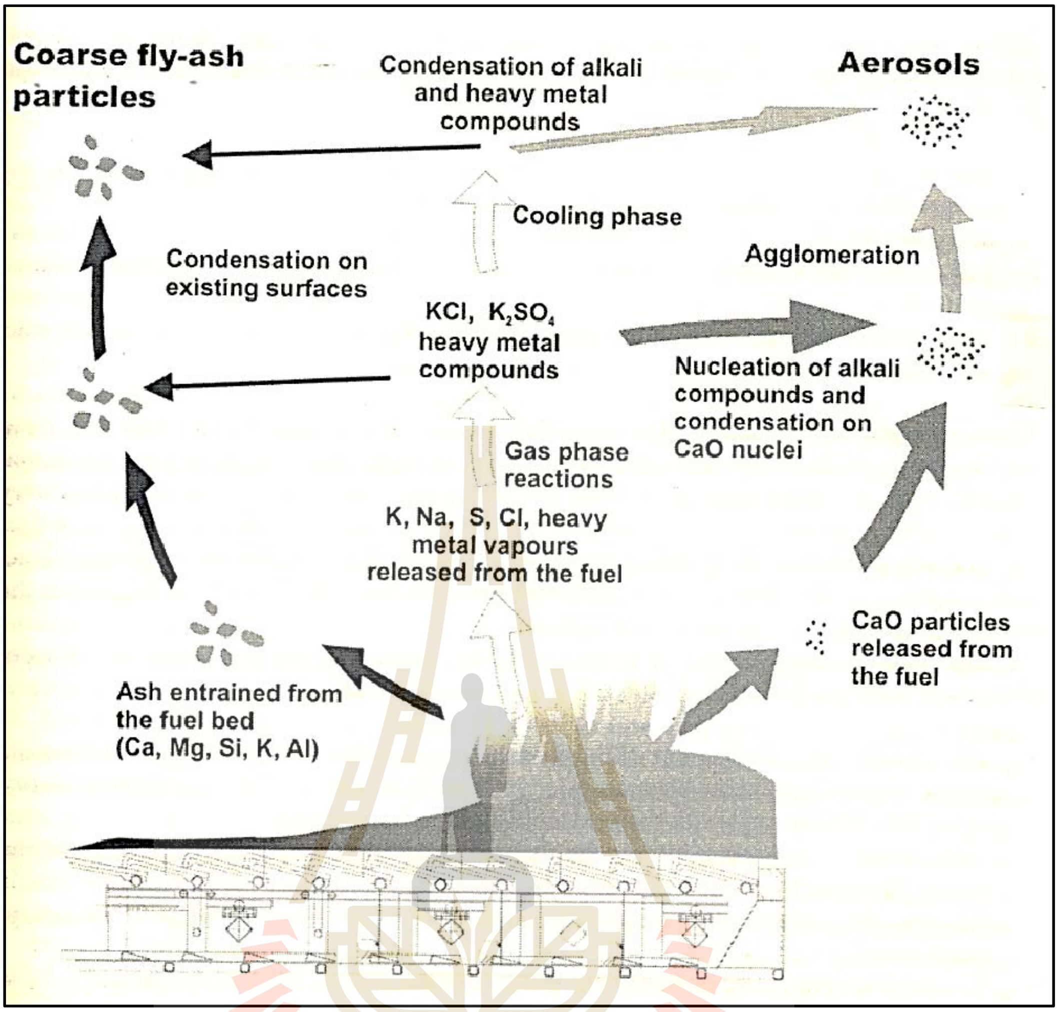
ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในกระบวนการผลิตไอน้ำในหม้อต้มไอน้ำชนิดท่อน้ำและเป็นชนิดหม้อต้มไอน้ำที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจัดเป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพของประเทศไทย และถือว่าเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและยังมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย โดยในบทนี้กล่าวถึงสถานภาพลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบต่างๆของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูป และชนิดของเตาชีวมวลที่สามารถนำเปลือกยูคาลิปตัสไปใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานและผลกระทบของการนำเชื้อเพลิงไม้ยูคาลิปตัสไปใช้ประโยชน์ โดยมีรายละเอียดดังในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.1เถ้าที่เกาะท่อและตะกรันก่อผิวท่อของโรงไฟฟ้าในเมืองฉางฉุน ประเทศจีน



รูปที่ 2.2แผนผังการปลดปล่อย K, Cl และ S ของชีวมวลขณะเกิดการเผาไหม้
ที่มา: ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และคณะ(2553)



รูปที่ 2.3ลักษณะการไหลวนของเถ้าลอยและไอระเหยจากการเผาไหม้ในเตา

ที่มา: Nussbaumer, T.(2001)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวและจุด eutectic สำหรับสารประกอบบริสุทธิ์ และสารประกอบผสมของเถ้าชีวมวลที่เกาะท่อไอน้ำ

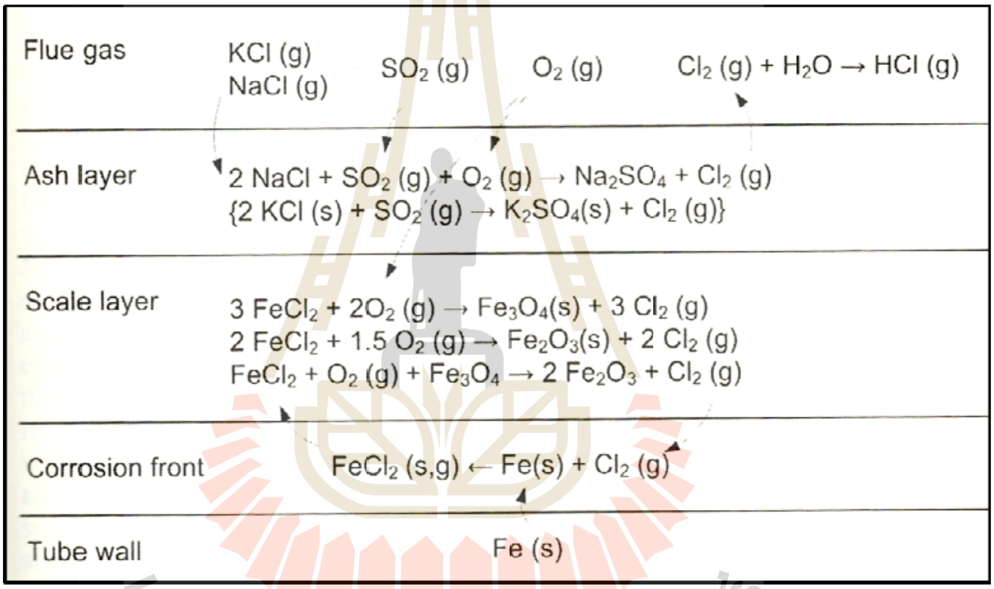
System	Melting/eutectic Temperature(ºC)	Composition at the eutectic point (mole% alkali)
NaCl	801	-
KCl	772	-
$FeCl_2$	677	-
$FeCl_3$	300	-
NaCl-$FeCl_2$	370-374	~56
NaCl-$FeCl_3$	151	45.3
KCl-$FeCl_2$	340-393	45.8-91.8
KCl-$FeCl_3$	202-393	24-47
$CrCl_2$	845	
$CrCl_3$	947	
NaCl-$CrCl_2$	437	53.7
NaCl-$CrCl_3$	544-593	68-95
KCl-$CrCl_2$	462-457	36-70
KCl-$CrCl_3$	700-795	54-89
Na_2CrO_4	792	
K_2CrO_4	980	
NaCl-Na_2CrO_4	557	
KCl-K_2CrO_4	650	68.4
$Na_2Cr_2O_7$	356.7	
$K_2Cr_2O_7$	398	
NaCl-$Na_2Cr_2O_7$	592	30
KCl-$K_2Cr_2O_7$	366-368	25-27.5
$^*SiO_2$	>1400	
$^*K_2O.4SiO_2$	770	
$^*K_2O.2SiO_2$	1045	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวและจุด eutectic สำหรับสารประกอบบริสุทธิ์ และสารประกอบผสมของเถ้าชีวมวลที่เกาะท่อไอน้ำ (ต่อ)

System	Melting/eutectic Temperature(ºC)	Composition at the eutectic point (mole% alkali)
*$K_2O.SiO_2$	976	
*K_2O	740	
*K_2CO_3	900	

ที่มา: Nielsen H.P.,et al.(2000); Soerensen L.H.,et al.(2001)



รูปที่ 2.4ลักษณะปฏิกิริยาของการออกซิเดชั่นต่อท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน ที่มา:Van Loo S., and Koppejan,J. (2008)

แนวทางการใช้สารเติมแต่ง(Additive) เพื่อแก้ปัญหาการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันเกาะผิวท่อและการกัดกร่อน โดยใช้สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเถ้าหลอมเหลว ซึ่งโดยทั่วไปสารเติมแต่งที่นิยมใช้ในกลุ่มเชื้อเพลิงชีวมวลคือ ดินขาว ซึ่งประกอบด้วย $Al_2Si_2O_5(OH)_4$หรือ Al_2O_3และ SiO_2หรือ Dolomite จะมีส่วนประกอบหลักคือ $CaMg(CO_3)_2$และ $CaCO_3$ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้สารเติมแต่งเป็นดินขาว หรือชื่อทางการค้าคือ China Clay เบอร์ C400 ดังตารางที่ 3.7 ซึ่งมีองค์ประกอบ SiO_2และ Al_2O_3ในช่วง 65-70 และ 17-20 % และเมื่อนำไปเผาร่วมกับชีวมวลจะเกิดสารประกอบ K-Al-Silicate ดังสมการที่2.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$Al_2O_3 + 2SiO_2 + 2KCl + H_2O \rightarrow 2KAlSiO_4 + 2HCl \tag{2.2}$$

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และคณะ(2553) ศึกษาอิทธิพลของดินขาวกับโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ในตู้อบ พบว่าจะเกิดกระบวนการ Adsobtion และ Chemical reaction ขึ้น โดยในช่วงอุณหภูมิ 700-800ºCพบว่า ดินขาว $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ได้ดูดซับโพแทสเซียม(K) ไว้โดยองค์ประกอบที่เรียกว่า muscovite ($KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$) โดยที่อุณหภูมิที่ 800ºCยังมีปริมาณโพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) เหลืออยู่แต่พบในปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับอุณหภูมิ700ºCและที่ระดับอุณหภูมิ 900ºCโพแทสเซียม (K)ซึ่งดูดซับไว้ที่ผิวของ muscovite จะเข้าทำปฏิกิริยากับ Aluminum-silicate ได้สารประกอบ 2 ตัว คือสารประกอบ $KAlSiO_4$หรือ Kalsilite ซึ่งเป็น Crystalline และพบในลักษณะเป็น Hexagonal จึงเรียกว่า Kaliophilite (Leucite) ซึ่งเป็น Crystalline เช่นกัน สารประกอบทั้งสองมีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง 1,165-1,250ºCปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นสามารถเขียนดังสมการที่ 2.2

2.2 เชื้อเพลิง(Fuel)ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไอน้ำ

เชื้อเพลิง คือสารสะสมความร้อนเก็บไว้ในตัวในลักษณะส่วนผสมทางเคมี โดยองค์ประกอบที่สำคัญของเชื้อเพลิง คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน เชื้อเพลิงเมื่อถูกเผาไหม้ในอากาศจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของพลังงานความร้อน ในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ้าปริมาณอากาศหรือออกซิเจนมีเพียงพอ นอกจากจะได้พลังงานความร้อนแล้วก็จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำออกมา

เชื้อเพลิงถ้าพิจารณาตามสถานะ สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ

1. เชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ เช่นก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม(LPG) ก๊าซธรรมชาติอัดก๊าซ(CNG) จากถ่านหินต่างๆ โปรดิวเซอร์ก๊าซ ก๊าซปิโตเลียม ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซอะเซทิลีน

2. เชื้อเพลิงเหลว เช่น ผลิตภัณฑ์ทางปิโตเลียม น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันเตา น้ำมันสังเคราะห์จากถ่านหิน น้ำมันหิน น้ำมันชีวภาพและแอลกอฮอล์ต่างๆ

3. เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งเช่นถ่านหิน ถ่านโค้ก ไม้ฟืน หินน้ำมัน เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ชานอ้อย กะลาปาล์ม เปลือกไม้ยูคาลิปตัส และอื่นๆ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ประเทศไทยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น แกลบ กะลาปาล์ม ชานอ้อย ฯลฯ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต ที่เกิดขึ้นในโรงงาน อย่างไรก็ตามยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อันเนื่องมาจากเศษวัสดุดังกล่าวยังอยู่ในสภาพที่ไม่พร้อมใช้ ต้องมีการจัดการแปรรูปเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะฉะนั้นการจำแนกเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (Commercialized Biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูป ซื้อ-ขาย ง่าย เช่น แกลบ ชานอ้อย กะลาปาล์ม ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์

2. เชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (Non-Commercialized Biomass) คือเศษวัสดุเหลือใช้ที่กระจัดกระจายในไร่นา สวนเกษตร และเศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร ที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันที ในที่นี้ เช่น ฟางข้าว ยอด/ใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม ทะลายปาล์ม และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งยังเป็นชีวมวลที่คงเหลือยังไม่ถูกนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างไรก็ดีเชื้อเพลิงดังกล่าว สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ได้ โดยผ่านกระบวนการจัดการ คือ การรวบรวม และแปรรูปให้พร้อมใช้ทั้งนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงดังกล่าวอย่างละเอียดต่อไป

การศึกษาในครั้งนี้จะมุ่งเน้นเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3 สถานภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศ

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ (เยาวนุช บริสุทธิพงศากุล, 2556) จากข้อมูลกรมป่าไม้พื้นที่เพาะปลูกไม้ยูคาลิปตัสของประเทศไทยมีประมาณ 5.3 ล้านไร่ โดยแบ่งเป็นพื้นที่แปลง 3.5 ล้านไร่และพื้นที่หัวไร่คันนา 1.5-1.8 ล้านไร่ กำลังการผลิต 53 ล้านตัน จะมีรอบตัด 3-4 รอบซึ่งปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีความต้องการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเป็นเยื่อกระดาษ 10-14 ล้านตันต่อปีหรือประมาณ60%ของผลผลิตทั้งหมดและเป็นไม้ชีวมวล 3-5 ล้านตันต่อปี หรือประมาณ30% และอื่นๆเช่น ไม้เสาเข็ม ไม้ค้ำยัน ฯลฯ ประมาณ 10% ซึ่งการผลิตไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเป็นวัตถุดิบผลิตเยื่อกระดาษนั้น จะมีผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ เปลือกไม้ ซึ่งจะมีสัดส่วนร้อยละ 20 ของไม้สด เมื่อนำมาคำนวนปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เกิดขึ้นมีปริมาณ 2-2.8 ล้านตันต่อปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 298.39-417.75 ktoe (วีรชัย อาจหาญ, 2554) ทำการสำรวจการใช้ประโยชน์เปลือกไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ปัจจุบันในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าและ/หรือความร้อนเพียง 0.52 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 112.54 ktoe เท่านั้น สาเหตุเนื่องมาจาก เปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นสูงเฉลี่ย 48.27% และความหนาแน่นต่ำเป็นอุปสรรคต่อการบรรทุก ทำให้ต้นทุนการขนส่งสูง อีกทั้งมีขนาดไม่สม่ำเสมอส่งผลต่อระบบป้อนและการเผาไหม้ นอกจากนี้ในส่วนของสมบัติทางเคมีและองค์ประกอบแยกธาตุ ของ

เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง(Alkali) สูง เช่น คลอรีน(Cl)โซเดียม(Na) แคลเซียม(Ca) และ โพแทสเซียม(K) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนของผิวท่อไอน้ำ และส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบการผลิตความร้อน ทำให้ปัจจุบันไม่นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนที่มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องนำเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆมาผสมเพื่อลดอิทธิพลจากการเกิดเถ้าหลอมตะกรัน และการกัดกร่อน

2.4 สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกยูคาลิปตัส

สมบัติของเปลือกยูคาลิปตัสที่จำเป็น ในการพิจารณานำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า คือ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบแบบประมาณ องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อน ซึ่งสมบัติต่างๆ แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.2-2.4

2.4.1 สมบัติทางกายภาพ (ขนาด ความหนาแน่นและความชื้น)

เปลือกยูคาลิปตัสส่วนใหญ่มี 2 ขนาด คือ มีลักษณะเป็นชิ้น และเป็นฝอยขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป ซึ่งเปลือกยูคาลิปตัสนั้นมีความหนาแน่นต่ำ (Bulk Density) และมีความชื้นสูง (55-65%) ทำให้ไม่คุ้มค่าในการขนส่ง

ตารางที่ 2.2สมบัติทางกายภาพของเปลือกยูคาลิปตัส

ประเภทชีวมวล	ความชื้น (%wb)	ความหนาแน่น (kg /m^3)	ลักษณะทั่วไป
เปลือกยูคาลิปตัสชิ้น	56	118	ยาว 0.2 ม. หนา 5 มม.
เปลือกยูคาลิปตัสฝอย	60	261	เส้นใย

ที่มา:วีรชัยอาจหาญ(2554)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

เป็นสมบัติเฉพาะตัวของเปลือกยูคาลิปตัสที่แสดงถึงสัดส่วนของ ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Matter) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และ ปริมาณเถ้า (Ash Content) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เป็นสมบัติที่นิยมใช้ประกอบการพิจารณาในการเลือกใช้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรม ในส่วนของปริมาณเถ้าจะเป็นของเสียที่เกิดขึ้นและต้องนำไปกำจัดซึ่งจะเป็นข้อมูลประกอบการเลือกเชื้อเพลิงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2.3องค์ประกอบแบบประมาณ (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

ที่มา:วีรชัยอาจหาญ(2554)

2.4.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

เป็นสมบัติที่แสดงถึงธาตุองค์ประกอบของเปลือกยูคาลิปตัส อันประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzerทั้งนี้ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญและมีผลต่อค่าความร้อน คือ คาร์บอนและไฮโดรเจน เนื่องจากคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น คาร์บอนได-ออกไซด์ น้ำ และพลังงานในกระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม หากมีปริมาณไฮโดรเจนมาก ในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะเกิดน้ำมากเช่นกัน ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำส่วนนี้ดูดซับพลังงานไว้บางส่วน พลังงานที่ระบบปลดปล่อยออกมาจึงลดลง

ตารางที่ 2.4องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัส

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

ที่มา:วีรชัยอาจหาญ(2554)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4.4 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนักในรูปของความร้อน ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการเปลี่ยนคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลจะขึ้นกับสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้มีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของชีวมวลแต่ละชนิด

จากการศึกษา Senelwa, K.andSims, R.E.H.(1999) สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Demirbas,A. (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษากับวัสดุชีวมวลถึง 16 ชนิดเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับค่าความร้อน โดยพบว่าค่าความชื้นในวัสดุชีวมวลเป็นผลทำให้ค่าความร้อนลดลง เพราะความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวลจะอยู่ระหว่างช่องว่างในเซลล์ที่ตาย และผนังเซลล์ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลถูกเผาไหม้ความชื้นจะเป็นตัวดูดซับความร้อนบางส่วน ทำให้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาลดลง

2.4.5 ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ (High and Low Heating Value; HHV and LHV)

นิยามของค่าความร้อนสูง (High Heating Value; HHV) หมายถึงพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบสมบูรณ์ (Gross Calorific Value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25ºCและผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 25ºCซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่รวมถึงพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (Latent Heat of Vaporization) ส่วนค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value; LHV) หมายถึงพลังงานความร้อนสุทธิที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (Net Calorific Value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25ºCและผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 150ºCซึ่งไม่รวมถึงพลังงานที่ได้จากการควบแน่น (Condensate) ไอน้ำมาใช้งาน โดยปกติค่าความร้อนใช้งานของเชื้อเพลิง จะไม่รวมถึงพลังงานจากการควบแน่นดังกล่าวนี้ด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่าง LHV และ HHV แสดงไว้เป็นสมการที่ 2.3

$$LHV = HHV - 2.395(9H + W) \qquad (2.3)$$

โดยที่ H และ W เป็น สัดส่วนของไฮโดรเจนและความชื้นตามลำดับ

จากนิยามของค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำข้างต้น เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้โดยใช้ เครื่อง Bomb Calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดมาตราฐานที่ใช้สำหรับการหาค่าความร้อนภายใต้สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ตามมาตรฐาน ASTM D2015 โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแห้ง (ความชื้น 0%) ถือได้ว่าเป็นค่าความร้อนสูง (HHV) ส่วนค่าความร้อนที่วัดได้เมื่อเชื้อเพลิงมีค่าความชื้นต่างๆ จากเครื่อง Bomb Calorimeter จะเป็นค่าความร้อนต่ำ (LHV)

2.5 ศักยภาพการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

วีรชัย อาจหาญ(2554)ได้ศึกษาศักยภาพการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสมีอยู่ทั้งสิ้น 1.82ล้านตันต่อปี คิดเป็นพลังงาน 11,470 TJเทียบเท่าน้ำมันดิบ 271.54ktoeสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้637.2GWh หรือป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าขนาด 90.9MWดังแสดงไว้ใน ตารางที่2.5

ตารางที่ 2.5ศักยภาพเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสในการผลิตไฟฟ้าของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ประเภทชีวมวล	ปริมาณคงเหลือ (ล้านตัน/ปี)	ความชื้น (%wb)	ค่าความร้อน MJ /kg	พลังงานทั้งสิ้น (TJ)	พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe)[1]	ศักยภาพผลิตกระแสไฟฟ้า (GWh)[2]/ ขนาดโรงไฟฟ้า (MW)[3]
เปลือกยูคาลิปตัส	1.82	61.9	6.3	11,470	271.54	637.2/ 90.9

หมายเหตุ 1) พลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1 ktoe เท่ากับ 42.24 x 10^6MJ

2) ค่า Net Plant Heat Rate เฉลี่ยสำหรับโรงไฟฟ้า 18 MJ/kWh หรือประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า 20%

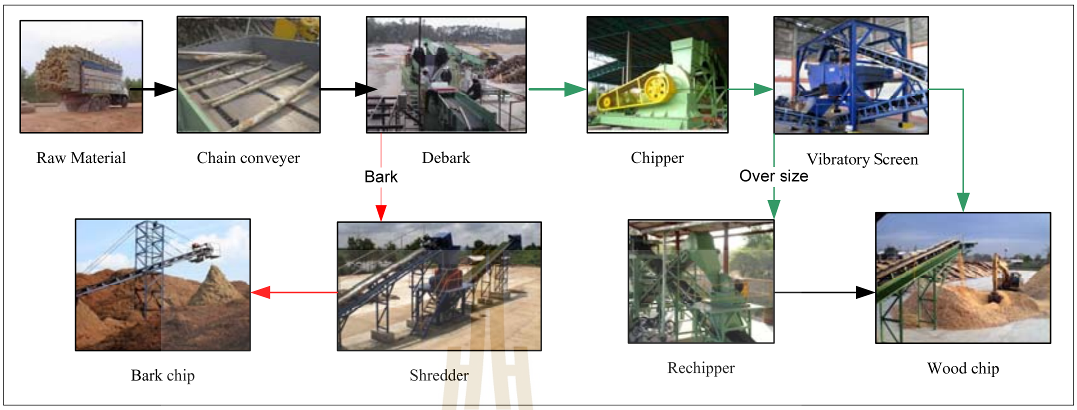
3) โรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า 7,008 ชั่วโมง/ปี หรือ Plant Factor 0.8

2.6 เทคโนโลยีการแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส

กระบวนการผลิตเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของอุตสาหกรรมต่าง ๆ เริ่มจากกระบวนการลำเลียงไม้ยูคาลิปตัสด้วยสายพานลำเลียง(Chain conveyer) ผ่านเครื่องลอกเปลือก (Debarked) ส่วนที่เป็นเนื้อไม้ก็จะผ่านเข้าเครื่องสับ (Chipper) เพื่อลดขนาดหลังจากเข้าเครื่องคัดขนาด (Vibratory Screen) โดยจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีขนาดเหมาะสมจะถูกลำเลียงเพื่อรอจำหน่าย ส่วนไม้ขนาดเล็กหรือที่เครื่องสับไม่สามารถสับได้จะมาผ่านเครื่องสับขนาดเล็ก (Rechipper) หรือบางแห่งอาจจะนำมาผ่านเครื่องสับอีกครั้งเพื่อลดขนาดอีกครั้ง ส่วนเปลือกไม้ที่โดนแยกออกจากเครื่องแยกเปลือกจะผ่านเข้าเครื่องตีเปลือกไม้ (Bark Shredder) เพื่อลดขนาดก่อนจะเตรียมจำหน่ายเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เปลือกยูคาลิปตัสจะกระจายอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมสับย่อยไม้ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ และอุตสาหกรรมไม้อัด เปลือกยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานจะมีความหนาแน่นต่ำความชื้นสูง การรวบรวมและขนส่งจึงทำได้ยาก เพราะฉะนั้นในการแปร

รูปเบื้องต้นในพื้นที่โรงงานที่มีเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเพิ่มความหนาแน่นและลดความชื้นให้กับเปลือกยูคาลิปตัสสำหรับการขนส่งต่อไป



รูปที่ 2.5 กระบวนการผลิตไม้ยูคาลิปตัสสับ

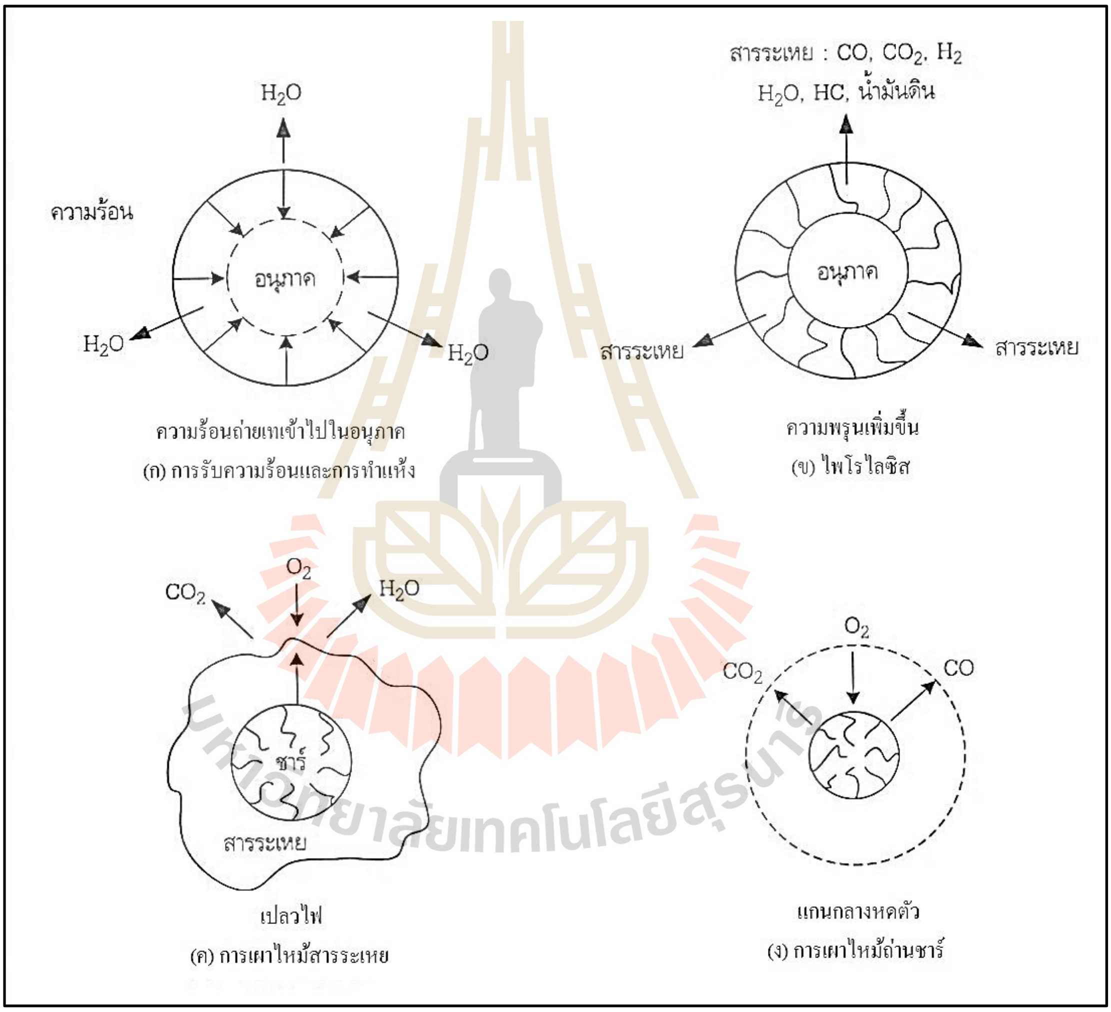
2.7 การผลิตพลังงานจากชีวมวล

เทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากชีวมวล คือ กระบวนการที่จะนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยทำให้เกิดการแตกตัวของอินทรีย์สารที่มีอยู่ในชีวมวล และผลิตพลังงานออกมา เทคโนโลยีที่ใช้เพื่อผลิตพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อนและกระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี โดยแต่ละกระบวนการจะมีวิธีการหลายรูปแบบและให้ผลผลิตออกมาในแบบที่แตกต่างกันในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อนเนื่องจากจะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับเป็นกรณีศึกษา

กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน (Thermochemical Conversion)เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเพื่อให้ได้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีคุณภาพสูงขึ้น โดยมีวิธีอยู่ด้วยกันหลายแบบ คือ การเผาไหม้โดยตรง การย่อยสลายด้วยความร้อน การแปรรูปเป็นก๊าซชีวมวล โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจะมีทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป

2.7.1 กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion)

ทฤษฎีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทเชื้อเพลิงแข็งจะมีอยู่ 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการลดความชื้น(drying) ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำการระเหยความชื้นในชีวมวล ขั้นตอนที่สองจะเป็นกระบวนการอุณหเคมี (Thermochemical) โดยแยกเป็นกระบวนการก๊าซซิฟิเคชั่น(Gasification) หรือกระบวนการไพโรไรซิส (Pyrolysis)ซึ่งได้พลังงานในรูปก๊าซเชื้อเพลิง(Syngas) และกระบวนการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการสุดท้ายจะเป็นกระบวนการเผาถ่าน(Charcol Burnout) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง

ที่มา: นคร ทิพยาวงศ์(2553)

การเผาไหม้กับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับอากาศทฤษฎีจากปฏิกิริยาการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ระหว่างเชื้อเพลิง C_mH_n จำนวน 1 โมล และใช้อากาศทฤษฎีจำนวน $[m+\frac{n}{4}](4.76)$ โมล จะสามารถเขียนสมการได้ดังสมการ2.4

$$C_mH_n+\left(m+\frac{n}{4}\right)(O_2+3.76N_2)\rightarrow mCO_2+\frac{n}{2}H_2O+3.76\left(m+\frac{n}{4}\right)N_2 \quad (2.4)$$

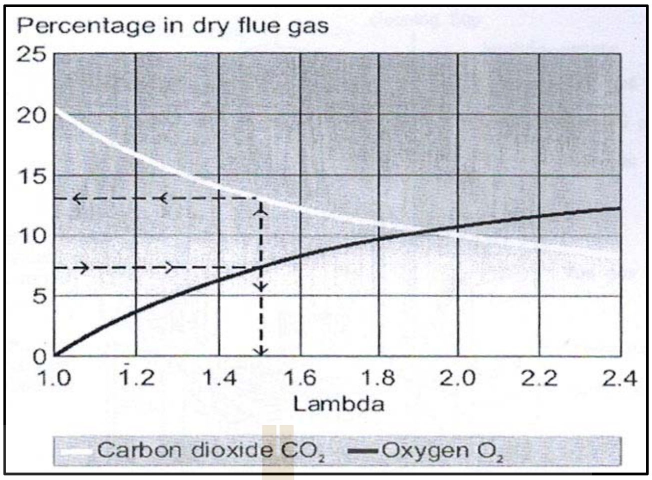
โดยอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยโมลเชิงทฤษฎีแสดงดังสมการ2.5

$$\overline{AF_{stoich}}=\left(m+\frac{n}{4}\right)4.76\ \frac{mol\ air}{mol\ fuel} \quad (2.5)$$

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยมวลทฤษฎีแสดงดังสมการ 2.6

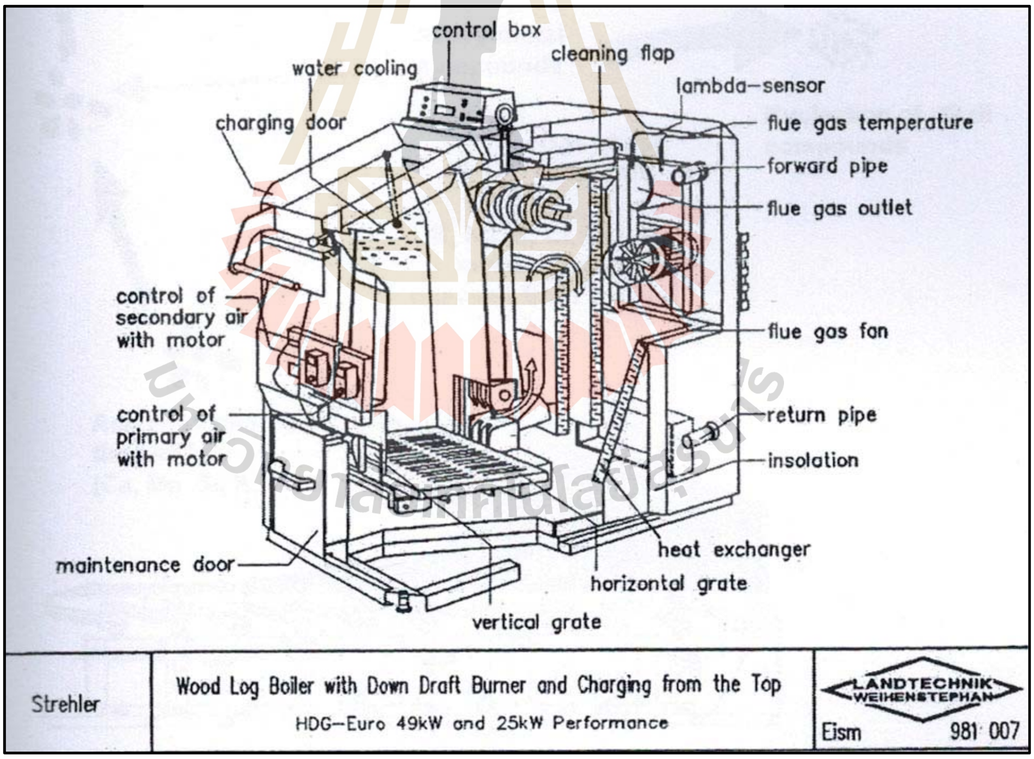
$$\overline{AF_{stoich}}=\left(m+\frac{n}{4}\right)(4.76)(28.9)\ \frac{kg\ air}{kg\ fuel} \quad (2.6)$$

ซึ่งจากการเผาไหม้จะต้องอาศัยการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือการเผาไหม้ต้องเกิดที่อุณหภูมิสูงเพียงพอ มีปริมาณอากาศส่วนเกินและช่วงระยะเวลาในการเผาไหม้ที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.7ซึ่งพบว่า อากาศส่วนเกิน(Lambda) ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงที่ 1.4-1.6 เท่าของการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี จะเห็นได้ว่าที่อากาศส่วนเกิน 1.5 เท่าของทฤษฎี จะมีปริมาณอากาศออกซิเจนและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เจือปนในไอเสียประมาณ 7.5% และ 13% ตามลำดับโดยขนาดของเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการเผาไหม้ ซึ่งขนาดเชื้อเพลิงตั้งแต่ 5-25 มิลลิเมตร จะสามารถใช้กับห้องเผาไหม้แบบอัตโนมัติได้ดังรูปที่ 2.8และลักษณะของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีขนาดท่อนสั้นหรือเป็นชิ้นเล็ก(chip) ระบบการเผาไหม้แบบเผาด้านล่าง(Bottom Burning) จะเผาไหม้สมบูรณ์ได้มากกว่า



รูปที่ 2.7แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอากาศส่วนเกินกับคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน

ที่มา: Lundgren,J.,et al. (2004)



รูปที่ 2.8ลักษณะของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงไม้ขนาดท่อนสั้น

ที่มา: สมคิดสลัดยะนันท์(มมป)

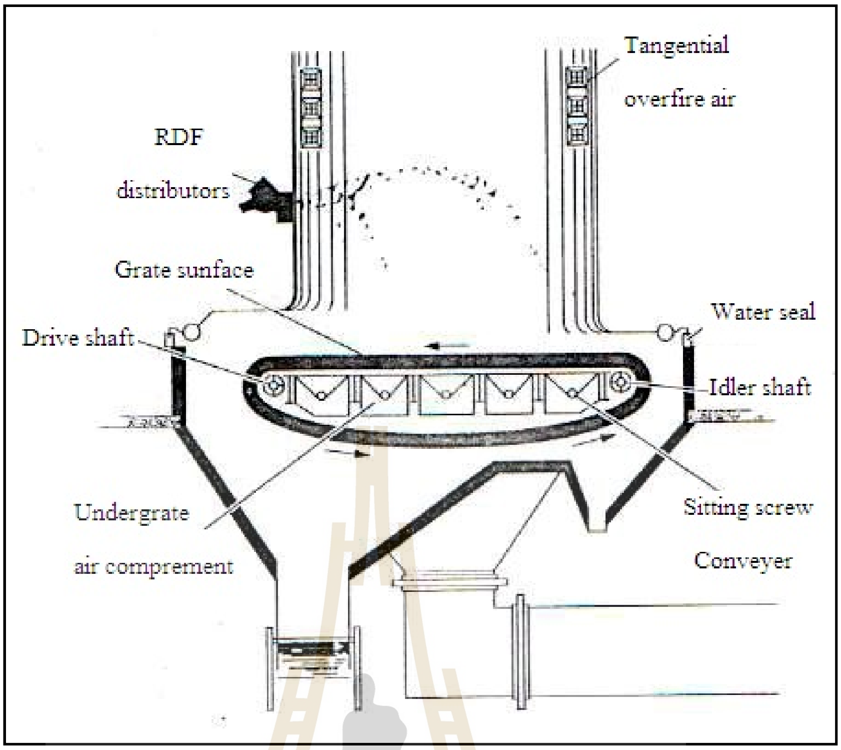
1. ระบบการเผาไหม้โดยตรง

ระบบการเผาไหม้โดยตรงได้รับการพัฒนามาเป็นเวลานานกว่า 100 ปี และในปัจจุบันระบบการเผาไหม้โดยตรงมีการนำไปใช้ร่วมกับเทคโนโลยีกังหันไอน้ำ หรือนำเอาก๊าซร้อนไปใช้ในการอบแห้งภาคอุตสาหกรรมในการผลิตพลังงานจากชีวมวลเป็นระบบที่มีการใช้มากที่สุดในโลก โดยระบบการเผาไหม้โดยตรงมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การเผาไหม้ในเตาเผาแบบตะกรับ (Stoker Firing) การเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed Combustion) และการเผาไหม้ในแบบลอยตัว (Suspension Firing)

1.1 การเผาไหม้แบบตะกรับ (Stoker Firing)

เป็นระบบแรกที่มีการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาโดยอาศัยเครื่องกลแทนแรงงานคน เชื้อเพลิงจะถูกป้อนกองอยู่บนตะแกรง แล้วอากาศส่วนแรกถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของตะแกรงผ่านขึ้นมาเผาไหม้เชื้อเพลิงบนตะแกรง อากาศอีกส่วนหนึ่งจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของตะแกรง เพื่อช่วยในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ ก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะนำไปผ่านส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำระบบแบบตะกรับ แบ่งออกได้ตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิง คือ 1) ระบบแบบตะกรับที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (Overfeed Stoker) และ2) ระบบแบบตะกรับที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed Stoker) ระบบแบบตะกรับที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบนก็ยังมีหลายประเภท ได้แก่ แบบตะกรับเอียง (Stationary Sloping Grate Stoker) แบบตะกรับเลื่อน (Travelling Grate Stoker) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 และแบบตะกรับสั่น (Vibrating Grate Stoker) ข้อดีของการเผาไหม้แบบตะกรับ คือ สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้ทุกขนาดและไม่จำกัดความชื้น การทำงานไม่ยุ่งยาก การเผาไหม้หมด เพราะสามารถควบคุมความเร็วของตะแกรงได้ ข้อเสีย คือ การควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าใต้ตะแกรงได้ยาก เพราะจะขึ้นอยู่กับความสูงและความหนาของเชื้อเพลิงที่กองอยู่บนตะแกรงและนอกจากนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากผนังเตาเพื่อให้อุณหภูมิของการเผาไหม้มีค่าคงที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



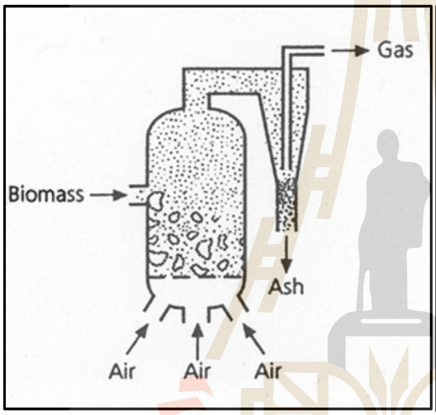
รูปที่ 2.9ระบบการเผาไหม้แบบตะกรับเลื่อน

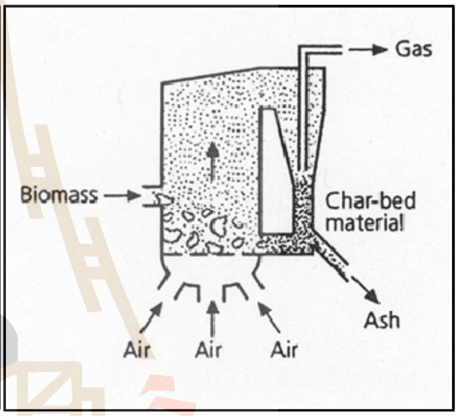
ที่มา: Institute of Engineering and Rural Technology.(2011)

1.2 ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed System)

เป็นระบบที่อากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงและเมื่อเพิ่มค่าความเร็วของอากาศถึงค่าหนึ่งเชื้อเพลิงที่วางอยู่จะลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหล ในตอนเริ่มติดเตาเบดจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิงหลังจากนั้นเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ การเผาไหม้จะเกิดขึ้นทั่ว ๆ บริเวณเตา โดยปกติจะใส่สารเฉื่อย (Inert Material) เช่น ทราย หรือสารที่ทำปฏิกิริยา (Reaction Material) เช่น หินปูน (Limestone) หรือตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะช่วยในด้านการถ่ายเทความร้อนและช่วยทำความสะอาดภายในเตา ข้อดีของเตาแบบฟลูอิไดซ์เบด คือ มีสารเฉื่อยเป็นเบดทำให้เกิดการผสมของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนได้ดี เกิดการเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว นอกจากนี้ตัวเบดยังช่วยเก็บความร้อนทำให้เตามีความเสถียร (Stable) ไม่ดับง่ายและเกิดการเผาไหม้ในตัวเตาได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผามีค่าเท่ากันสม่ำเสมอ สามารถใช้ในช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ต่ำ (ประมาณ 850°C) จึงช่วยแก้ปัญหามลพิษของอากาศ เนื่องจากเกิดสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) น้อย นอกจากนี้เชื้อเพลิงที่เผาไหม้ในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่เกิน 5 วินาที ก็จะทำปฏิกิริยา

หมด ซึ่งน้อยกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงใช้อยู่ในเตาเผาที่ทำให้เกิดการเผาไม้เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบบ Bubbling Fluidized Bed และแบบ Circulating Fluidized Bed แสดงดังรูปที่ 2.10ซึ่งลักษณะหลักการที่แตกต่างกันคือ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Circulating Fluidized Bed ความเร็วของลมที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าสูงมากทำให้มีความแตกต่างจาก Bubbling Fluidized-bed คือการแบ่งแยกของส่วนที่หนาแน่นกว่าซึ่งเป็นชั้นของทราย และส่วนที่เบาบางกว่าซึ่งเป็นชั้นของก๊าซนั้นหมดไป ทรายที่ใช้เป็นตัวกระจายความร้อนและถ่านชาร์จะถูกนำกลับเข้าสู่ระบบโดยผ่านการดักจับโดยไซโคลนซึ่งอาจจะอยู่ภายในหรือภายนอกระบบ ระบบนี้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีปริมาณขี้เถ้าสูง





(ก) Bubbling Fluidized Bed (ข) Circulating Fluidized Bed

รูปที่ 2.10 ระบบการเผาไหม้แบบฟลูอิดไดซ์เบด

ที่มา: Williams,R.H., and Larson, E.D. (1992)

1.3 ระบบการเผาไหม้แบบลอยตัว (Pulverised system)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบนี้ใช้หลักการเดียวกับการเผาไหม้ในเตา เผาเชื้อเพลิงบดละเอียด (Pulverised Fuel Combustor) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กับถ่านหินและเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในโรงไฟฟ้า การเผาไหม้จะเกิดขึ้นในลักษณะที่เชื้อเพลิงถูกแขวนลอย ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะต้องมีขนาดเล็กสามารถแขวนลอยอยู่ได้ในอากาศ อากาศส่วนแรกที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะถูกอุ่นก่อนเพื่อช่วยในการอบแห้งเชื้อเพลิง อากาศส่วนที่สองจะถูกส่งเข้าสู่เตาโดยตรงเพื่อช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ขี้เถ้าที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกมากับไอเสีย ข้อได้เปรียบของการเผาไหม้แบบนี้ คือ ไม่จำเป็นต้องมีระบบตะแกรงที่จะต้องให้ความร้อนในการเผา

ไหม้สูงเพราะระบบเผาไหม้แบบตะกรับที่กล่าวมาข้างต้นจะออกแบบให้เตาเผามีขนาดเล็กเพียงพอที่จะทำให้ความร้อนภายในเตาเผามีค่าสูงพอแก่เชื้อเพลิงที่จะเผาไหม้ต่อไปดังนั้นเตาเผาระบบการเผาไหม้แบบลอยตัวนี้จึงให้ความร้อนในการเผาไหม้สูงกว่า สำหรับข้อเสีย คือการควบคุมเถ้าทำได้ยากจึงต้องมีระบบกำจัดเถ้า เชื้อเพลิงต้องมีขนาดเล็กจึงต้องเพิ่มอุปกรณ์บดเชื้อเพลิง การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผายังทำได้ยากเพราะถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไปจะทำให้เกิดการหลอมตัวของเถ้าเกาะกันเป็นก้อนใหญ่ ซึ่งจะทำให้เตาเผาเสียหายได้

2.7.2 ระบบผลิตพลังงาน (Power Generation System)

หม้อไอน้ำ (Boiler) คือ เครื่องหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไอน้ำโดยการถ่ายเทความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้แก่น้ำ ซึ่งอยู่ในภาชนะปิดมิดชิดให้ได้ไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์ เช่น ขับเครื่องกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ขับเครื่องจักรไอน้ำ (Steam Engine) และยังนำเอาความร้อนจากไอน้ำมาใช้ในหม้อหุงต้มอาหาร, หม้ออบแห้ง, หม้อต้มน้ำอ้อย, หม้อเคี่ยวน้ำตาล เป็นต้น

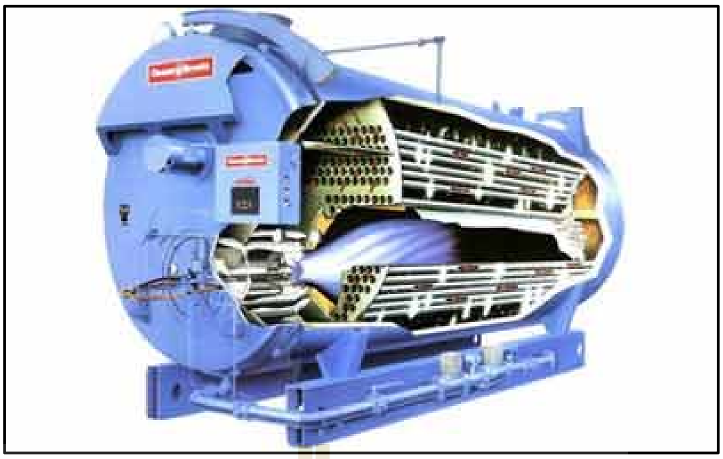
ปัจจุบันในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีการนำเอาหม้อไอน้ำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลายซึ่งจากข้อมูลพบว่าในประเทศไทยมีการใช้อยู่ประมาณ 10,000 เครื่อง แบ่งเป็น หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ, หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำและหม้อไอน้ำไฟฟ้า ในสัดส่วน 80, 15 และ5%ตามลำดับ

โดยทั่วไปหม้อไอน้ำจะใช้งานร่วมกับเครื่องผลิตความร้อนไม่ว่าจะเป็นหัวเผา (Burner)ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวในการให้ความร้อน และใช้กับเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง ที่ใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน และเชื้อเพลิงชีวมวลซึ่งในปัจจุบันมีหม้อไอน้ำหลายประเภทและสามารถจำแนกได้ตามลักษณะต่างๆกันไป แต่ในที่นี้เราสามารถจำแนกตามตำแหน่งของน้ำหรือก๊าซร้อนที่อยู่ในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

ก) หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire-tubeboiler)

รูปที่ 2.11 แสดงหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ที่มีก๊าซไหลอยู่ในท่อ และมีน้ำรับความร้อนจากก๊าซร้อนแล้วกลายเป็นไอน้ำอยู่ภายนอกท่อไฟนั้น โดยมีเปลือกหม้อไอน้ำรูปทรงกระบอกนอนหรือตั้งเป็นภาชนะรับความดันและเก็บกักน้ำไว้ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะใช้แค่ไอน้ำอิ่มตัวที่ความดันต่ำ หม้อไอน้ำแบบนี้มีราคาถูก ไม่เน้นเรื่องคุณภาพน้ำและการดูแลรักษามาก หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนี้มีหลายแบบ ได้แก่ หม้อไอน้ำแบบท่อไฟนอน (Horizontal fire-tube boiler), หม้อไอน้ำแบบท่อไฟตั้ง (Vertical fire-tube boiler)และหม้อไอน้ำแบบไม่มีท่อ (Tubeless boiler)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.11 หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire-tube boiler) (ที่มา: Trabue Industrial Systems, 2011)

ข) หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water-tube boiler)

รูปที่ 2.12แสดงหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำนี้มีน้ำอยู่ภายในท่อ และน้ำจะรับความร้อนจากก๊าซร้อนที่ไหลอยู่ภายนอกท่อกลายเป็นไอน้ำ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำนั้นมีราคาสูง ต้องการคุณภาพน้ำและการดูแลที่มากกว่าหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำนี้มีหลายแบบ ได้แก่หม้อไอน้ำโรงไฟฟ้า (Power plant boiler),หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำความร้อนทิ้ง (Waste heat boiler, heat recoverysteam generator, HRSG),หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำรูปตัว A,D,O (A,D,O type water tube boiler),หม้อไอน้ำแบบไหลผ่านทางเดียว (Once-through boiler)และหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำตั้ง (Vertical water-tube boiler)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่2.12หม้อไอน้ำแบบท่อน้ำ (Water-tube boiler)(ที่มา: Energy Solutions Center, 2007)

2.7.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส คือ กระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในที่อับอากาศได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิดได้แก่

1)ก๊าซ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และ ไฮโดรคาร์บอน

2) ของเหลว เช่น สารละลายอินทรีย์ และน้ำมันดิน (Tar)และ

3) ของแข็ง (ถ่านไม้)

ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพและวิธีการให้ความร้อนกับชีวมวล

โดยหลักการ Fast Pyrolysis ซึ่งเป็นกระบวนการเผาวัสดุชีวมวลโดยใช้ความร้อนสูงในระยะเวลาอันรวดเร็วโดยไม่ใช้ออกซิเจน (ในระยะเวลาสั้น ๆ 2-3 วินาที ณ ที่อุณหภูมิ ประมาณ450–500ºC) กระบวนการนี้เป็นการทำให้วัสดุชีวมวล เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว และเกิดการแยกตัวออกเป็นถ่าน ก๊าซ ไอ และสารแขวนลอยในอากาศ เมื่ออุณหภูมิลดลง สารที่ระเหยง่ายจะกลั่นตัวเป็นของเหลวที่เรียกว่า “Bio-oil” ส่วนก๊าซที่ยังคงเหลืออยู่เป็นก๊าซที่ไม่สามารถกลั่นตัวเป็นของเหลวได้ (Non-condensable Gas) และมีค่าความร้อนปานกลาง การควบแน่นจะต้องกระทำที่อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการแตกตัวหรือรวมตัวของ Bio-oil อีก

วัสดุชีวมวล ที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นวัสดุชีวมวลใดก็ได้ รวมถึงเศษไม้และกากของเสียจากการเกษตร ขั้นตอนการเตรียมชีวมวลลำดับแรก คือต้องทำให้แห้งโดยให้เหลือ

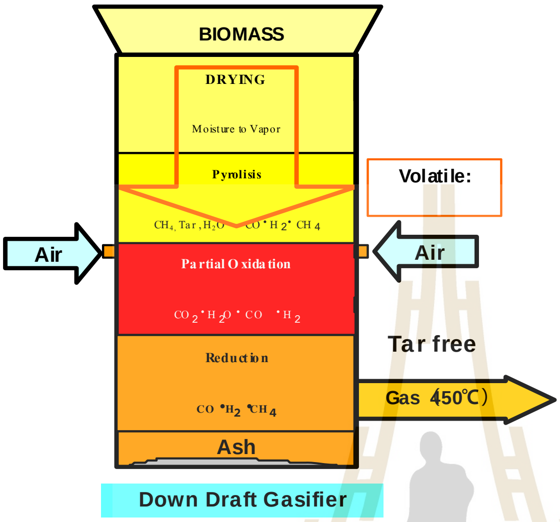
ความชื้นอยู่ในวัตถุดิบน้อยกว่าร้อยละ 10 เพื่อให้มีน้ำเหลือใน Bio-oil น้อยที่สุด และหลังจากนั้นนำชีวมวลไปบดย่อยให้ขนาดเล็กลง เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายความร้อนในเตาปฏิกรณ์ให้เร็วขึ้น ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ Thermolysis ประกอบด้วย Bio-oil ร้อยละ 60-70 ถ่านร้อยละ15-20 และก๊าซที่ไม่กลั่นตัวร้อยละ 15-20 ความร้อนที่ต้องการใช้สำหรับการทำปฏิกริยานี้คือ ความร้อนทั้งหมดที่ส่งผ่านเข้าไปในเตา เพื่อทำให้เกิดปฏิกริยาความร้อน และกระจายความร้อนได้อย่าง ทั่วถึงจนสิ้นสุดกระบวนการความร้อนจากปฏิกริยาที่ใช้สำหรับกระบวนการ Fast Pyrolysis บางส่วนจะถูกดูดซึม ทั้งนี้ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ต้องการสำหรับผลิต Bio-oil ปริมาณ 1 กิโลกรัม จะอยู่ประมาณ 2.5MJ ในขณะที่ความร้อนสุทธิที่ต้องการจากเชื้อเพลิงภายนอก เช่น ก๊าซธรรมชาติจะใช้เพียง 1.0MJ ต่อ Bio-oil 1 กิโลกรัม ส่วนที่เหลือจากกระบวนการผลิตเป็นก๊าซที่ไม่กลั่นตัว (Non-condensable Gas)จะถูกส่งต่อเข้าไปในเตาเผาทิ้งโดยตรง ซึ่งทั้งหมดนี้คิดเทียบเท่ากับร้อยละ 5 โดยประมาณของค่าความร้อนทั้งหมดที่จะได้จาก Bio-oil ที่ผลิตได้

Bio-oil มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้ม มีกลิ่นฉุนเหมือนควัน ประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิดและสารประกอบออกซิเจเนท เช่น Carbonyl, Carboxyl, และ Phenolic ส่วนประกอบของ Bio-oil มีน้ำประมาณ ร้อยละ 20-25, สารลิกนินร้อยละ 25-30, กรดอินทรีย์ (Organic Acids) ร้อยละ 5-12, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ร้อยละ 5-10, ผลึกน้ำตาล ร้อยละ 5-10, และสารประกอบออกซิเจเนทอื่นๆ ร้อยละ10-25มีคุณสมบัติและข้อดีคือ ไม่ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) เพราะ Bio-oil ได้มาจากชีวมวลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ (Organic Waste) เนื่องจากชีวมวลไม่มีสารประกอบซัลเฟอร์ ดังนั้นในขณะเผาไหม้จึงไม่ก่อให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_x) ปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์น้อยกว่าน้ำมันดีเซลร้อยละ 50 ในระบบกังหันก๊าซ การผลิต Bio-oil สามารถผลิตได้ในทุกประเทศที่มีของเสียจากสารอินทรีย์ในปริมาณที่มาก

2.7.4 เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชั่น(Gasification)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น (Biomass Gasification) เป็นกระบวนการที่ทำให้องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล เปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงที่จุดไฟติดและมีค่าความร้อนสูง โดยอาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical Reaction) ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งสภาวะที่ทำให้เกิดก๊าซดังกล่าวก็คือ สภาวะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เป็นสภาวะที่มีการจำกัดปริมาณอากาศหรือก๊าซออกซิเจน เพราะหากมีก๊าซออกซิเจนเพียงพอ หรือมากเกินพอจะกลายเป็นกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Combustion) และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ไอน้ำ ออกมาซึ่งไม่ติดไฟ ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น สามารถแบ่งโซนการเกิด ปฏิกิริยาออกเป็น 4 โซน ดังแสดงใน รูปที่ 2.13โดยโซนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังต่อไปนี้



1. Combustion หรือ Oxidation Zone
2. Reduction Zone
3. Pyrolysisหรือ Distillation Zone
4. Drying Zone

รูปที่ 2.13กระบวนการก๊าซซิฟิเคชั่น (ที่มา: Arjharn, W.,et al.,2012)

Combustion หรือ Oxidation Zone เป็นบริเวณที่ป้อนอากาศ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เชื้อเพลิงชีวมวลจะลุกไหม้ เกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ผลของปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2.7) ถึง (2.8)

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \tag{2.7}$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \tag{2.8}$$

ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.7) และ (2.8) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนในโซน Reduction และโซน Pyrolysis อุณหภูมิในโซน Combustion จะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500°C

Reduction Zone ก๊าซร้อนที่ผ่านมาจาก Combustion Zone จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Reduction ใน Zone นี้จะมีอุณหภูมิระหว่าง 500-900ºCทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ไฮโดรเจน และมีเทน ดังสมการที่ (2.9) ถึง (2.13)

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \tag{2.9}$$

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \tag{2.10}$$

$$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2 \tag{2.11}$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \tag{2.12}$$

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \tag{2.13}$$

ปฏิกิริยาในสมการที่ (2.9) เรียกว่า Boundouard Reduction และปฏิกิริยาในสมการที่ (2.10) เรียกว่า Water Gas Reduction เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900ºCก๊าซที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซหลักที่ต้องการ ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซชีวมวลนี้จะขึ้นอยู่กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใด

ในโซนของ Reduction นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นกับอุณหภูมิ ความเร็วของก๊าซที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีวมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ จะมีผลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวมวลมีค่าต่ำ

แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและก๊าซที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากจากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในโซน Reduction สูงกว่า 900ºCแล้วก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะ

ถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงมากกว่า 1,100ºCจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของโซน Reduction

ในขณะที่ก๊าซร้อนจากโซน Combustion ไหลเคลื่อนเข้าสู่โซน Reduction จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2.11) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600ºCปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้ก๊าซมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น (ก๊าซไฮโดรเจนมีผลต่อการจุดระเบิดของเครื่องยนต์สันดาปภายใน)แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ (2.12) (ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction) ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากจนเกินไป นอกจากนี้ในกระบวนการ Reduction ก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นได้ ดังสมการที่ (2.13) ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production

Pyrolysis หรือ Distillation Zone รับความร้อนจากโซน Reduction ทำให้ Volatile Matter ที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเมทานอล กรดน้ำส้ม และทาร์ อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าประมาณ 200-500ºCของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากการผ่านกระบวนการนี้ก็คือคาร์บอนในรูปถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิยาต่อในโซน Reduction และ Combustion ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้แสดงไว้ในสมการที่ (2.14)

$$\text{Dry Biomass} + \text{Heat} \rightarrow$$
$$\text{Charcoal} + CO + CO_2 + H_2O + CH_4 + C_2H_6 + \text{Pyroligneous Acid} + \text{Tars} \qquad (2.14)$$

Drying Zone ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของ Volatile Matter แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาได้ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100-200ºC

2.8 สถานภาพการใช้ประโยชน์เปลือกยูคาลิปตัส

จากข้อมูลสถานภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในประเทศในหัวข้อ 2.3 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง

สำหรับผลิตพลังงาน โดยส่วนใหญ่จะนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อนและส่วนใหญ่จะเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) ทั้งนี้ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย เช่นการกระจายตัวของแหล่งชีวมวล ขนาด ความชื้น สิ่งเจือปน ปริมาณขี้เถ้า/องค์ประกอบในเถ้า ดังนั้น ถ้าจะนำชีวมวลใดมาผลิตพลังงานไฟฟ้าความร้อน จำเป็นต้องพิจาณา ความยาก/ง่าย ของการเข้าถึงเชื้อเพลิง คุณสมบัติของเชื้อเพลิงทางด้านกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ตลอดจนกระบวนการแปรรูปของเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นๆ เพื่อประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุด

2.8.1 คุณสมบัติและอิทธิผลของการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ชีวมวลแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะอย่าง คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดเด่น คุณสมบัติบางอย่างถือเป็นจุดด้อย สำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีคุณสมบัติบางอย่างที่บ่งชี้ได้ว่า มีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ อาทิ ส่วนใหญ่เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะ คืออยู่รวมเป็นกลุ่ม มีความง่ายต่อการเข้าถึงเชื้อเพลิง เนื่องจากเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม การรวบรวมเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงจึงสามารถทำได้ง่าย มีค่าความร้อนค่อนข้างสูงหากผ่านกระบวนการลดความชื้น มีองค์ประกอบธาตุหลัก (คาร์บอน ไฮโดรเจน) สูง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานในตัวเชื้อเพลิง ให้เป็นพลังงานความร้อนได้โดยปฏิกิริยาอุณหเคมี

อย่างไรก็ดี คุณสมบัติที่เป็นจุดด้อยของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ก็ยังปรากฏอยู่เช่นกัน ซึ่งสามารถแบ่งเป็น ประเด็นต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

1. สมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

- ความชื้น (Moisture content) เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการนำมาเป็นเชื้อเพลิง กรณีที่ชีวมวลมีความชื้นสูงมาก จะไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้ ต้องนำมาผ่านกระบวนการอบแห้ง (Drying) เพื่อลดความชื้นก่อนนำไปใช้ ในกรณีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นประมาณ 56-60% ถ้านำมาเก็บไว้ล่วงหน้าระยะหนึ่ง ความชื้นจะลดลงโดยธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือ เสียพื้นที่ในการจัดเก็บ และถ้าเก็บไว้นานไปไม้มีโอกาสย่อยสลาย ผุพัง เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ตามสภาพธรรมชาติ

- ขนาด (Size/Shape)เปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีลักษณะไม่คงตัวมีลักษณะเป็นชิ้นและเป็นเส้นฝอยปะปนกัน ซึ่งการที่มีขนาดใหญ่เกินไป จะไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เพราะประสิทธิภาพการเผาไหม้จะต่ำ ดังนั้นควรนำมาย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น แต่ก็จะมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการย่อย/บดละเอียด เพิ่มขึ้นเช่นกัน เชื้อเพลิงที่ถูกย่อย/บดละเอียด จะถูกนำไปใช้สำหรับเตาพลังงานบางประเภท (Fluidize bed furnace, Pulverized furnace, Spreader fired stoker) แต่สำหรับเตาเผาบางระบบ ก็สามารถใช้เชื้อเพลิงได้ ไม่

จำเป็นต้องมีขนาดเล็กละเอียดได้ เช่น Stoker และ Rotary kiln furnace อย่างไรก็ดี การที่เชื้อเพลิงมีขนาดเล็กละเอียด จะมีปัญหาในขั้นตอนและต้นทุนการขนส่ง ดังนั้นขนาดจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณา เชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิด จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการอัดเม็ด หรืออัดแท่งเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มความหนาแน่น

2. สมบัติทางเคมี (Chemical Properties)

องค์ประกอบทางเคมีในเปลือกไม้ยูคาลิปตัส สำหรับบางสารถือว่าเป็นสิ่งเจือปนที่ต้องระมัดระวังให้มาก อาทิ สารอัลคาไลน์ Be, Mg, Ca, Sr, Ba และRa ส่วนประกอบทางเคมีของ Ash Oxide ต่างๆ เหล่านี้จะก่อให้เกิดตะกรันหรือการเกาะตัวของเถ้า ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อเตาเผาและระบบการถ่ายเทความร้อน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าและสารสารประกอบที่เกิดจากกระบวนการเผาไม้ จะสามารถทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้ เช่น การเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนได้ ซึ่งจะทำให้ทราบว่าเชื้อเพลิงนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะใช้ในเตาเผา (Furnace) หรือไม่

3. Ash Fusion Temperature

การวิเคราะห์พฤติกรรมของเถ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่เถ้าเริ่มหลอมละลาย จะเกิดขึ้นภายใต้ Reducing หรือ Oxidizing Atmosphere โดยเริ่มจาก 900-1600ºC หรือมากกว่า โดยอุณหภูมิที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของเถ้าจะมี 4 ระดับ คือ

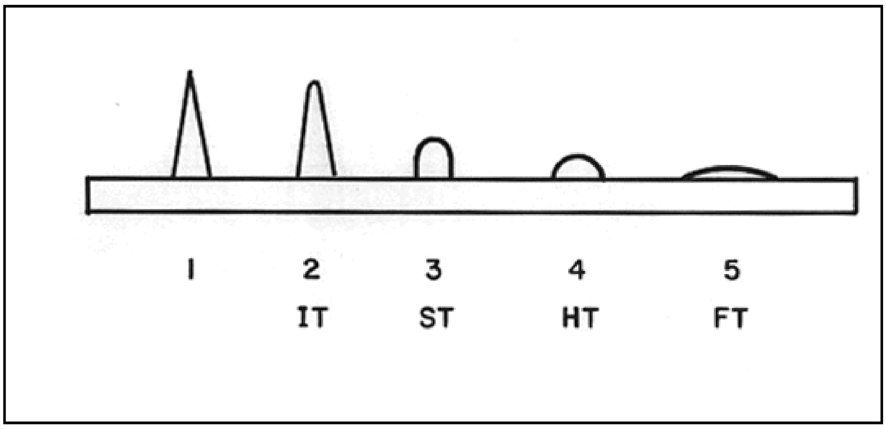
- Initial Deformation Temperature (I.D.T.) เป็นอุณหภูมิที่เถ้าเริ่มหลอมตัว โดยเริ่มจากปลายยอด

- Spherical Temperature (S.T.) เป็นอุณหภูมิที่เถ้าหลอมละลายจนความสูงของแท่งตัวอย่างเถ้าลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสูง ของตัวอย่าง เริ่มต้น

- Hemispherical Temperature (H.T.) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเถ้าหลอมละลายจนความกว้างของฐานมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของความสูง

- Flow Temperature (F.T.) เป็นอุณหภูมิที่ตัวอย่างเถ้าหลอมละลายจนไหล ซึ่ง ณ จุดนี้ความสูงของตัวอย่างเถ้าจะมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของความกว้าง ของฐาน

อุณหภูมิในการศึกษาพฤติกรรมของเถ้า แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14อุณหภูมิในการศึกษาพฤติกรรมของเถ้า(Critical Temparature Point)
ที่มา:ประเสริฐ ชุมรุม และคณะ(2554)

ทั้งนี้ Initial Deformation Temperature (I.D.T.) จะเป็นอุณหภูมิที่ใช้พิจารณาพฤติกรรมของเถ้าใน เตาเผาสำหรับที่ Reducing Atmosphere ซึ่งสามารถแปรผลพฤติกรรมของเถ้าได้ดัง ตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6พฤติกรรมของเถ้าสำหรับ Initial Deformation Temperature (I.D.T.)

อุณหภูมิ	พฤติกรรมของเถ้า
> 1450 ^{0}C	ขี้เถ้าไม่หลอมละลาย (Refractory)
1350 -1450 ^{0}C	ขี้เถ้าไม่หลอมละลายและไม่ทำให้เกิดปัญหาในการจับเป็นก้อน (Clinkering)
1250 -1350 ^{0}C	ต้องมีการดูแลเรื่องการออกแบบ Furnace
<1250 ^{0}C	ขี้เถ้ามักจะเกิดปัญหาการหลอมจับตัวเป็นก้อน

จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าค่า Ash Fusion Temperature ที่ต่ำ มักจะมีแนวโน้มของการเกิด Slagging สูง โดยสัมพันธ์กับอุณหภูมิในเตา โดยสังเกตจากค่า Initial Deformation Temperatureทั้งนี้ สามารถหาแนวโน้มของการเกิด Slagging Factor (Rs) ได้จากสูตร

$$\text{Slagging Factor}(\text{Rs}) = (\text{Max H.T} + 4 \cdot \text{Min IDT}) / 5 \tag{2.15}$$

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 ซึ่งส่วนประกอบของเถ้าจะแบ่งตามคุณสมบัติทางเคมีเป็น 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

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าที่ทำให้เกิด Slagging และ Fouling

1). AI (Alkali Index)

$$\text{AI} = \frac{\text{kg}(K_2O + Na_2O)}{\text{GJ}} \tag{2.16}$$

ค่าAI มีค่าอยู่ในช่วง 0.17-0.34 kg/GJ อาจเกิด Fouling และ Slagging แต่ถ้าค่า AI มากกว่า 0.34 kg/GJ มีแนวโน้มการเกิดFouling และ Slagging แน่นอน

2). BAI (Bed Agglomeration Index)

ค่า BAI นั้น ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.15 เบด(Bed) จะจับตัวเป็นก้อน

3). Basic/Acid ratio หรือ (B/A ratio)

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

$$B / A \text{ ratio} = \left(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O\right) / \left(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2\right) \quad (2.17)$$

4). Slagging Index (Rs)

Ratio นี้จะบอกถึงแนวโน้มในการเกิด Slag เช่นเดียวกับ Basic/Acid Ratio ถ้ายิ่งค่า Rs มีค่าสูง โอกาสที่จะเกิด Slagging ก็เพิ่มขึ้น

$$Rs = \left(\text{Basic} / \text{Acid}\right) \cdot \%\text{Sulphur in Biomass}\left(\text{Dry Basis}\right) \quad (2.18)$$

5). Silica/Alumina Ratio

Silica สามารถรวมตัวกับสารประกอบที่เป็นเบสแล้วเกิดเป็น Silicates ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้มากกว่าโอกาสที่ Alumina จะรวมตัวเกิดเป็น Aluminate ดังนั้นเถ้าที่มีค่า B/A Ratio เท่ากัน แต่เถ้าที่มีค่า Silica/Alumina Ratio สูงกว่าจะมีลักษณะหลอมตัวได้ง่ายกว่า โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 4.0อัตราส่วนนี้ใช้เป็นข้อมูลพิจารณาเกี่ยวกับการหลอมตัวของเถ้า เนื่องจากส่วนประกอบทั้งสองเป็น Acidic Oxides ซึ่งถือว่า มีจุดหลอมเหลวสูง

$$\text{Silica / Alumina Ratio} = SiO_2 / Al_2O_3 \quad (2.19)$$

6). Iron/Calcium Ratio

ถ้าในเถ้ามีปริมาณ Iron และ Calcium มาก จะทำให้เกิด Fluxing Action เหล็กและแคลเซียมจะรวมตัวเป็น Eutectic ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ถ้าผสมกันในสัดส่วนเหมาะสม อัตราส่วนที่มีผลต่อ Fluxing Effection มากที่สุด คือ ระหว่าง 0.3 ถึง 3.0 ความสัมพันธ์ของ Iron และ Calcium ต่อความยากง่ายในการหลอมตัวของเถ้าคือ

- ถ้าไม่มี CaO เลย Iron Oxide จะไม่ทำให้เกิดการหลอมเหลวของเถ้าง่ายที่สุด
- ถ้ามีปริมาณ Ferric Oxide สูงถึง 20% ในเถ้าจะทำให้มี Fluxing Effect เพิ่มขึ้นตาม%Fe_2O_3 แต่ถ้า%Fe_2O_3 มากกว่า 20% จนถึง 40% Fe_2O_3 จะไม่มีผลในการเพิ่มความสามารถในการหลอมตัว (Fusibility) ของเถ้า ที่มี%Fe_2O_3 มากกว่า 14% การเพิ่มของ%CaO จะทำให้ Fusion Temperature ลดลงได้มากกว่าการเพิ่ม Fe_2O_3 ในปริมาณที่เท่ากัน
- ปริมาณ MgO ซึ่งปกติจะมีค่าน้อยกว่า CaO Fluxing Effect ของการที่ MgO รวมกับ CaO จะมากกว่าการเพิ่มปริมาณ CaO อย่างเดียวเป็น ปริมาณเท่ากับ 3:2 เท่า

$$\text{Iron / Calcium Ratio} = Fe_2O_3 / CaO \qquad (2.20)$$

7). Iron/Dolomite Ratio

Dolomite Percentage (D.P.) คือ%ของ Dolomite ใน Basic Oxides ทั้งหมด Parameter นี้ใช้กับเถ้าที่ปริมาณ Basic Oxides มากกว่า 40% เนื่องจากปริมาณ Basic Oxides มากกว่า 40% จะมีความสัมพันธ์กับค่า Viscosity ของเถ้าช่วงที่ใช้พิจารณาคือ Basic Oxides เท่ากับ 40-98% ถ้า Dolomite Percentage เพิ่มขึ้น ค่า Fusion Temperature และ Viscosity จะสูงขึ้นด้วย

$$\text{Iron / Dolomite Ratio} = Fe_2O_3 / CaO + MgO \qquad (2.21)$$

8). Equivalent Fe_2O_3 และ Ferric Percentage (F.P.)

Ferric Percentage จะบอกถึง Degree ที่เหล็กถูก Oxidised ใน Slag ของเถ้า ค่าทั้งสองค่านี้จะถูกนำมาใช้เมื่อพบว่า Ash Fusion Temperature และอุณหภูมิที่เริ่มแข็งตัว (Crystallization Temperature) ใน Reducing Atmosphere ต่ำกว่าในบรรยากาศของ Oxidising ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากรูปแแบบที่ต่างกันของ 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 Fe2O3 และ F.P. จะขึ้นกับภาวะในการเผาไหม้ใน Furnace

$$\text{Equivalent } Fe_2O_3 = Fe_2O_3 + 1.11FeO + 1.43Fe \qquad (2.22)$$

$$\text{F.P.} = (Fe_2O_3 / \text{Equi. } Fe_2O_3) \cdot 100 \qquad (2.23)$$

9). Silica Percentage (S.P.)

ค่า S.P. ที่มีค่าประมาณ 35-90% จะมีความสัมพันธ์กับ Viscosity ของ Ash Slag โดยค่า S.P. เพิ่มขึ้นจะทำให้ Slag Viscosity เพิ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าที่ทำให้เกิด Fouling

1).Fouling Index (Rf)

ใช้ในกรณีของเถ้าที่มีค่า $CaO + MgO < Fe_2O_3$) เท่านั้น

$$Rf = (Basic / Acid) \cdot \%Na_2O \text{ ในเถ้า} \tag{2.24}$$

ตารางที่ 2.7 แสดงค่า Fouling Index (Rf)ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

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 $CaO + MgO > Fe_2O_3$ ซึ่งปริมาณร้อยละของ Na_2O ใน เถ้า จะบอกถึงแนวโน้มการเกิด Fouling

ตารางที่ 2.8 แสดงค่า Sodium Oxide(Na_2O) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

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

3).Active Alkali

เป็นตัวบอกแนวโน้มของการเกิด Fouling เพราะโซเดียม (Na) และ โพแทสเซียม (K) เมื่อถูกความร้อนจะระเหยกลายเป็นไอ และไปกลั่นตัวบนท่อ Steam และจะทำปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ใน Flue Gas เกิดเป็น Complex Sulphate ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำมาก และหลอมตัวเป็นคราบเหนียวตามผิวท่อคอยจับอนุภาคเถ้าที่มาสัมผัส ปริมาณโซเดียม (Na) และ โพแทสเซียม (K)เป็นตัวบอกแนวโน้มการเกิด Fouling ได้ดี ซึ่งสามารถคำนวณการเกิด Fouling ได้ว่า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\text{Modified Rf} = (\text{Basic}/\text{acid}) \times \text{Water Soluble Sodium ในเชื้อเพลิง} \tag{2.25}$$

โดยที่ Modified Fouling Factor หาได้โดยการเตรียมเถ้าโดยใช้ Low Temperature Method เพื่อไม่ให้โซเดียมและโพแทสเซียมกลายเป็นไอ เนื่องจากอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.9 แสดงค่า Fouling Index (Rf)ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

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

ตารางที่ 2.10 แสดงค่า%ของ Active Alkali ในถ่านหินที่มีผลต่อการเกิด Fouling

% 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 โซเดียม (Na) และโพแทสเซียม (K)พบอยู่ในรูปโซเดียมคลอไรด์(NaCl)และโพแทสเซียมคลอไรด์(KCl)ดังนั้น สามารถหาความสัมพันธ์ของการเกิด Fouling กับปริมาณ Chlorine ในถ่านหินได้ซึ่งปริมาณคลอรีนจะเป็นตัวบอกแนวโน้มการเกิด Fouling ได้

ตารางที่ 2.11 แสดงปริมาณคลอรีน (Chlorine) ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

% Chlorine	แนวโน้มการเกิด Fouling

น้อยกว่า 0.2 %	ต่ำ
0.2-0.3 %	ปานกลาง
0.3-0.5%	สูง
มากกว่า 0.5%	รุนแรงมาก

Barisic, V., et al(2009) ศึกษาการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสในอัตราส่วนร้อยละ 5 ร่วมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆเช่นแกลบและถ่านหินพบว่าการเกิดตะกรันและกัดกร่อนไม่รุนแรงมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าการเติม สารประกอบประเภทหินปูนหรือดินขาว(kaolionite) ผสมลงไปในเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงยังสามารถลดการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนเนื่องจากก๊าซคลอรีนได้อีกทางหนึ่งด้วย

ปัจจุบัน มีการนำเอาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้ประโยชน์ เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าและความร้อน แต่อาจจะมีสัดส่วนที่น้อยมากหากเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์อื่นๆ เนื่องจากปัญหาตามที่กล่าวมาในข้างต้น ทั้งนี้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ถือเป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพ การพัฒนากระบวนการหรือวิธีการเพื่อที่จะนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมผลิตพลังงานความร้อน ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นถือเป็นประเด็นที่ต้องศึกษา

2.8.2 มลพิษอากาศที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

การเผาไหม้หรือการสันดาปเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อนในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆแต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21%โดยปริมาณ หรือ 23%โดยน้ำหนัก

เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่างๆ ดังนี้คือคาร์บอน(C) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจน (H_2) และธาตุอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เมื่อเกิดปฏิกิริยาอุณหเคมีในสภาวะที่ใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ จะทำให้ปลดปลดก๊าซไอเสียในรูปก๊าซออกไซด์ต่างๆ ได้แก่ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_X) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาอุณหเคมี เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้จะมีขั้นตอน การเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO \ + \ 110,380 \text{ kJ} / \text{kg} - \text{mol} \qquad (2.26)$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + \ 283{,}180 \ kJ/kg - mol \tag{2.27}$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \ 286{,}470 \ kJ/kg - mol \tag{2.28}$$

กลไกการเกิด SO_2คือ เมื่อนำเชื้อเพลิงที่มีธาตุ S เป็นองค์ประกอบไปเผาไหม้จะเกิดเป็น SO_2โดยการเผาเชื้อเพลิงประมาณ 94-95% ของสารประกอบซัลเฟอร์จะเป็นเปลี่ยน SO_2และเพียง 0.5-2.0% จะถูกเปลี่ยนเปลี่ยนเป็น SO_3และในกรณีที่อุณหภูมิของไอเสียลดลงต่ำกว่า 316ºC SO_3จะรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นไอกรดซัลฟูริค

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \ + \text{ความร้อน} \tag{2.29}$$

กลไกการเกิด Thermal NO_xเมื่อนำเชื้อเพลิงการเผาในอากาศ ออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศบางส่วนจะรวมตัวกันเกิดเป็นไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)

$$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO + \text{ความร้อน} \tag{2.30}$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO_2 + \text{ความร้อน} \tag{2.31}$$

อย่างไรก็ดี เชื้อเพลิงชีวมวลก็ยังถือว่ามีปริมาณซัลเฟอร์ต่ำกว่ากว่าถ่านหินจึงมีการนำชีวมวลมาใช้เป็นส่วนผสม (Blend) กับถ่านหินคุณภาพต่ำ หรือใช้งานในลักษณะที่เรียกว่า Co-firing Combustion (Xie, J.J., et al., 2007)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.9 แนวทางการนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิง

1. การลดความชื้นเชื้อเพลิง (Biomass Drying)

การลดความชื้นเป็นขั้นตอนหนึ่งในการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านกระบวนการแปรรูป จะมีความชื้นค่อนข้างสูง ความชื้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะมีแนวโน้มเสื่อมคุณภาพ ถูกทำให้ย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่จะคงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลสั้นลง ส่งผลต่อการวางแผนการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลของโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นการลดความชื้นโดยใช้เครื่องอบแห้งจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล มีอยู่หลายประเภทจำแนกตามวิธีการ และชนิดของถังอบแห้งสามารถแบ่งได้ 5 ประเภท

1. Rotary Dryers
2. Flash Dryers
3. Disk Dryers
4. Cascade Dryers
5. Superheated Steam Dryers

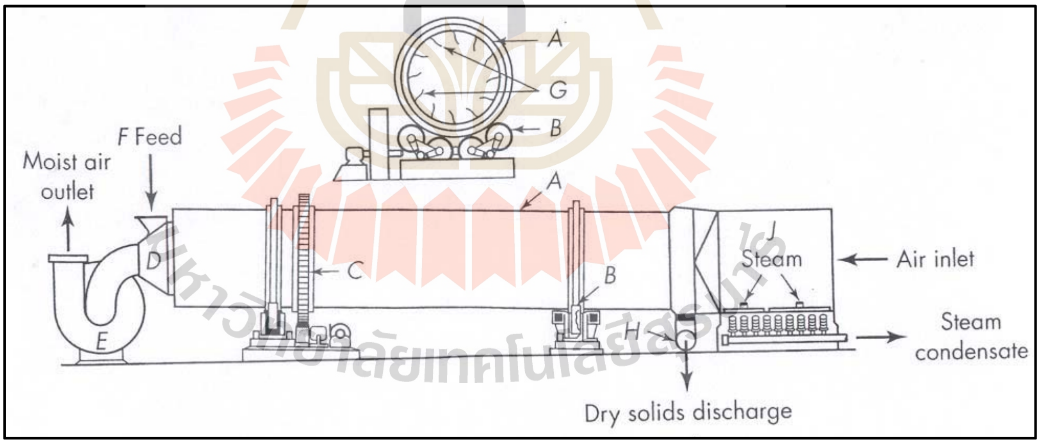
การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด ดังแสดงใน ตารางที่ 2.12และตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล ดังแสดงใน รูปที่ 2.15

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.12 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสีย ของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด

ชนิดเครื่องอบแห้ง	ต้องการวัสดุขนาดเล็ก	ต้องการขนาดวัสดุใกล้เคียงกัน	ความสะดวกในการนำความร้อนกลับมาใช้	เสี่ยงต่อประกายไฟ	ใช้ไอน้ำ	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

ที่มา: (Amos, W.A., 1998)



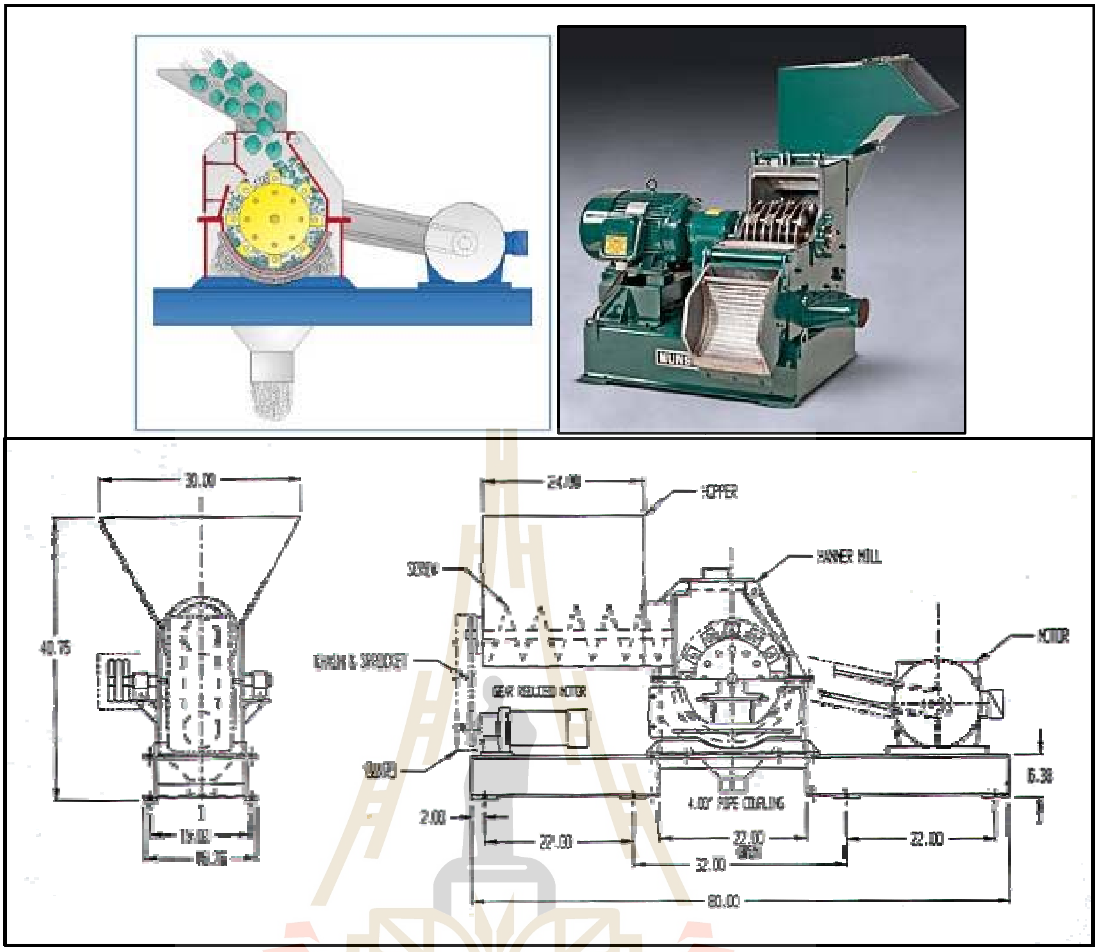
รูปที่ 2.15ตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบโรตารีขนาด 150 kg/h

ที่มา:วรพจน์ ขำพิศและคณะ.(2553)

รูปที่ 2.16ตัวอย่างเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบโรตารีขนาด 150 kg/h (ต่อ)
ที่มา:วรพจน์ ขำพิศและคณะ.(2553)

2. การบด/ย่อยลดขนาด (Size reduction)

กระบวนการบด/ย่อย ลดขนาด มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กเป็นผงละเอียด ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในเตาเผาบางประเภท โดยทั่วไป ขั้นที่ 1จะเป็นการลดขนาดโดยการสับ/ย่อย ให้มีขนาดเล็กนิยมใช้เครื่อง Chipper/Chopper หากต้องการ บด/ย่อย ละเอียด จะมีขั้นที่ 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 วัสดุที่แข็งและความชื้นต่ำการบด/ย่อยขั้นที่ 2 จึงเหมาะสมที่จะใช้เครื่องบด/ย่อยลดขนาดแบบ Hammer Mill มากกว่า ดังรูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของ เครื่อง Hammer Mill โดยเครื่องจักรจะทำงานที่ความเร็วสูง 1500-4000 rpm ทำการตีเชื้อเพลิงชีวมวลจนกว่าจะได้ขนาดที่เล็กลงตามต้องการที่กำหนดผ่านรูตะแกรงลงสู่ส่วนล่างของตัวเครื่อง โดยที่ตัวใบมีดตีจะยึดติดกับแกนเพลามีทั้งแบบหมุนได้ (Swing Type) และแบบอยู่กับที่ (Fixed Type)



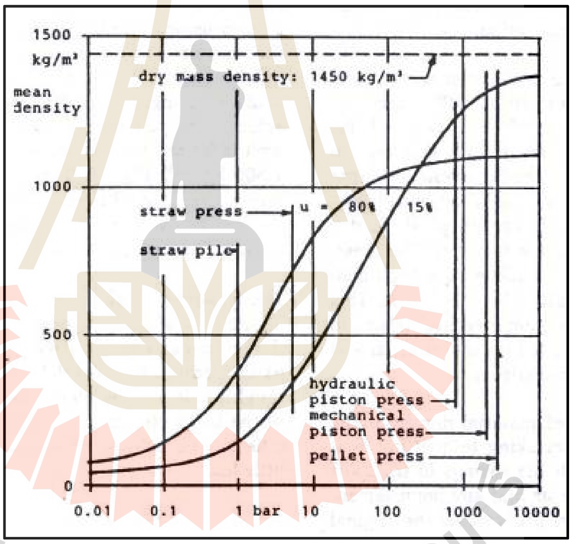
รูปที่ 2.17 เครื่อง Hammer Mill (ที่มา:วรพจน์ ขำพิศและคณะ,2553)

3. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง (Biomass Densification)

การอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass Densification) เป็นการลดปริมาตรและเป็นการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีการกระจายตัวกันอย่างหลวมๆ การอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น อัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆ (Pelleting or Briquette) อัดเป็นลูกบาศก์ (Cubing) อัดเป็นแท่ง (Extruded Log) อัดเป็นฟ่อน (Baling) ในที่นี้ จะอธิบายในส่วนของการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง โดยวิธีการอัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆเนื่องจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยที่ผ่านกระบวนการสับ/ย่อย หรือ บด/ย่อย เมื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงโดยวิธีการอัดเม็ด หรืออัดแท่ง จะช่วยเพิ่มความหนาแน่น ซึ่งสะดวก เหมาะแก่การขนส่ง และการนำไปใช้ผลิตพลังงานในเตาเผาหลายๆ ประเภทด้วย

จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า แรงดันที่ใช้มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งชีวมวล โดยเราสามารถอัดแท่งได้โดยถ้าทำการอัดภายใต้แรงดันที่ต่ำ 0.2-5MPa ซึ่งจะทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มแรงกดให้สูงมากกว่า 100MPa จะทำให้ผนังเซลล์ของเซลลูโลสสลายตัวและจับตัวกันมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเลือกใช้วิธีการอัดภายใต้แรงดันต่ำหรือสูงนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นของแท่งชีวมวล ขึ้นอยู่กับ 1) ประเภทของชีวมวล และ 2) เครื่องมือและอุปกรณ์การอัด สำหรับการอัดที่แรงดันสูงสุดจะได้ความหนาแน่นของชีวมวลสูงสุดคือ 1,200-1,400kg/m^3 โดยวิธีการอัดที่มีความหนาแน่นสูงสุดคือ วิธีการอัดเป็นเม็ดหรือแท่งเล็กๆ (Pelleting) จะมีความหนาแน่นที่ 1,450-1,500kg/m^3 และวิธีที่น้อยที่สุดคือวิธีอัดแบบใช้สกรูอัด ดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความหนาแน่น[5]

ที่มา:วรพจน์ ขำพิศและคณะ.(2553)

ความหนาแน่นปรากฏ (Appearance Density) ของแท่งชีวมวลจะมีค่ามากกว่าความหนาแน่นบรรจุ (Bulk Density) เนื่องมาจากการเรียงตัวบรรจุอย่างไม่ชิดติดกันของวัสดุชีวมวล โดยขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ ขนาดและรูปร่างของวัสดุชีวมวล โดยความหนาแน่นบรรจุส่วนใหญ่จะอยู่ประมาณ 600-700 kg/m^3 หรือน้อยกว่านั้น ลักษณะการจับตัวกันของชีวมวลในขณะถูกอัดสามารถอธิบายได้โดยขึ้นกับระดับแรงดันที่ใช้ในการอัดและความร้อนที่ให้หรือที่เกิดขึ้นขณะทำการอัด กรณีระดับแรงดันที่ใช้สูงๆซึ่งเกิดความร้อนและมีผลต่อการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมี ที่มีอยู่ในผนังเซลล์ของชีว

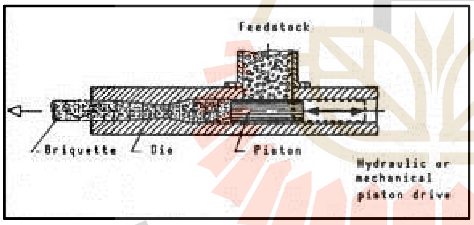
มวลไปเป็นตัวประสานธรรมชาติ และพบว่า Lignin เป็นตัวประสานธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะให้ความร้อน 130-190ºCซึ่งนักวิจัยบางท่านก็ไม่เห็นด้วยโดยพบว่าอิทธิพลที่มีผลต่อการรวมตัวของชีวมวลก็คือ Pectin ส่วนกรณีระดับแรงดันต่ำๆ จะมีการผสมตัวประสานเข้าไปในชีวมวลขณะอัด เช่น แป้งมันหรือโมลาส เป็นต้น

โดยทั่วไปเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

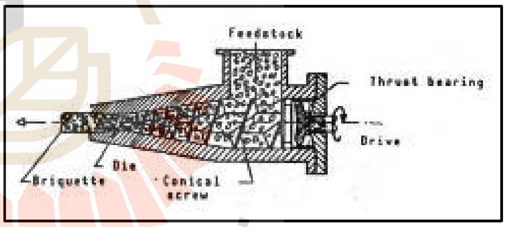
ก) เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston Presses)ลูกสูบจะทำหน้าที่อัดชีวมวลเข้าสู่กระบอกอัดและถูกอัดออกมาทางหัวดาย (Die) โดยส่งกำลังด้วยฟลายวิลและคับปลิงดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.19(ก)

ข) เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Presses)การลำเลียงวัสดุเข้าสู่เกลียวอัดจะทำให้วัสดุถูกกดอัดอย่างต่อเนื่องให้มีปริมาตรเล็กลงโดยใช้สกรูแบบกรวย และจะใช้แหล่งความร้อนจากภายนอกเพื่อสลายลิกนินหรือไม่ก็ได้ดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.19(ข)

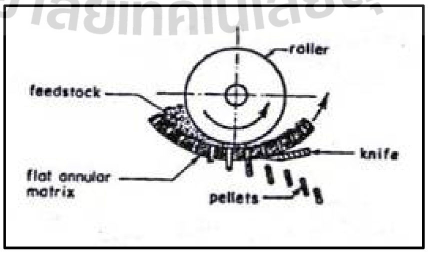
ค) เครื่องอัดแบบแท่ง(Pellet Presses)การอัดลักษณะนี้จะใช้ลูกกลิ้งหมุนกดทับวัสดุชีวมวลผ่านหน้าแปลนที่ถูกเจาะเป็นรูเล็กๆเอาไว้ โดยวัสดุจะถูกอัดออกมาผ่านรูเหล่านั้นเมื่อลูกกลิ้งวิ่งกดทับผ่าน ซึ่งหัวดายจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานหรือแผ่นวงแหวนดังแสดงเอาไว้ใน รูปที่ 2.19(ค) และลักษณะของเครื่องอัดแท่งชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 2.20



ก.เครื่องอัดแบบลูกสูบ (Piston Presses)



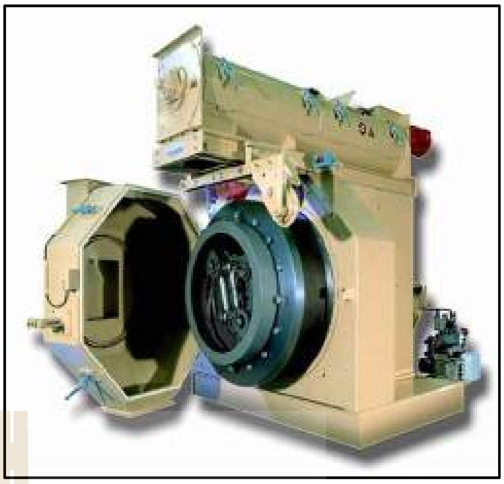
ข. เครื่องอัดแบบสกรู (Screw Presses)



ค. เครื่องอัดแบบเม็ด (Pellet Presses)

รูปที่ 2.19เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่างๆ(ที่มา:วรพจน์ ขำพิศและคณะ,2553)

ก) Flat Die Pellet Presses



ข) Pellet Mill

ค) Briquetting Machine

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.20ลักษณะของเครื่องแท่งชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
ที่มา:วรพจน์ ขำพิศและคณะ.(2553)

ง) Flat Die Pellet Presses

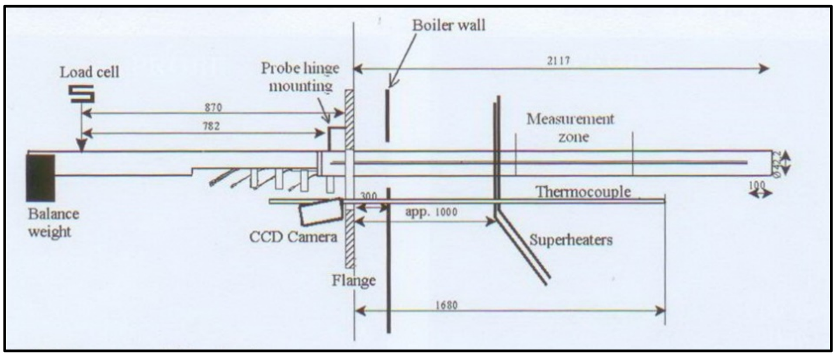
Akkaya, A.V.(2009)ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองของการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) โดยใช้multiple nonlinear regressionmodels เพื่อประมาณค่าความร้อนสูงสุด (HHV) ซึ่งมีความแม่นยำในการให้ค่า HHV ซึ่งได้จากค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ

Romeo, L.M., and Gareta, R. (2009) ศึกษาการควบคุมสิ่งสกปรกจากหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้Neural Network and Fuzzy Logic Expert System ในการหาจุดที่เหมาะสมในการทำความสะอาดและการใช้พลังงานในการถ่ายเทความร้อนของหม้อไอน้ำซึ่งสามารถทำให้ประหยัดพลังงานได้ถึง 12 GWh/year ในอัตราพลังงานที่ออกจากTurbine เพิ่มขึ้น 3.5%

Theis, M.,et al.(2006) ศึกษาแนวโน้มของสิ่งสกปรกของเถ้าจากการทดสอบเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและฟางข้าวโอ๊ตตั้งแต่ 0-100% ที่อุณหภูมิเตาและอากาศร้อน 1000ºCความเร็วก๊าซ 2 เมตรต่อวินาทีโดยอุปกรณ์การวัดมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 25 มิลลิเมตรและผิวท่อมีอุณหภูมิ 550ºCพบว่า พฤติกรรมการสะสมสิ่งสกปรกที่ผิวท่อเป็นลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น(Non Linear) โดยอัตราส่วนที่สามารถผสมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับถ่านหินได้สูงสุดคือ 30% และสำหรับฟางข้าวโอ๊ตสามารถผสมได้สูงสุด70%

Pronobis, M.(2006)ศึกษาสิ่งสกปรกที่สะสมผิวท่อไอน้ำและประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิด ฟางข้าว ไม้ และกากตะกอนผสมถ่านหิน(Bituminous) พบว่าส่วนประกอบของเถ้าฟางข้าวจะประกอบไปด้วย ซิลิกา และโปแตสเซียม ส่วนจำนวนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสจะมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหิน โดยระดับ คลอไรด์ในฟางข้าวจะขึ้นอยู่กับดินที่ปลูกซึ่งอาจสูงถึง 0.5%ซึ่งจะอยู่ในเถ้า โดยคลอไรด์จะสะสมในบริเวณที่เป็นบริเวณผิวท่อร้อนยิ่งยวด(Superheat Area) และจะเกิดการกัดกร่อนเป็นชั้นๆ ในทางที่ดีการใช้ฟางข้าวผสมถ่านหินควรมีซัลเฟอร์เข้าไปด้วยเพื่อลดการกัดกร่อน เพราะความหนาแน่นของชั้นโพแทสเซียมซัลเฟต(K_2SO_4) จะป้องกันการกัดกร่อนผิวท่อได้ และเมื่อสัดส่วนของ S/Cl molar สูงถึง 4จะสามารถทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อน โดยถ้าS/Clmolarน้อยกว่า 2 การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้

Zbogar, A. et al.(2006)ศึกษาทดสอบการเกิดตะกรันจากหม้อไอน้ำโดยใช้ฟางข้าวเป็นเชื้อเพลิง และได้ออกแบบอุปกรณ์การวัดการเกิดตะกรันดังรูปที่2.21ซึ่งอุปกรณ์เครื่องมือวัดปริมาณการเกิดตะกรันจะเป็นลักษณะเครื่องชั่งวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักท่อโดยมีการวัดอุณหภูมิภายในผิวท่อ อุณหภูมิเปลวไฟ อุณหภูมิน้ำเข้า-ออกของชุดหล่อเย็น เพื่อรักษาอุณหภูมิผิวท่อให้คงที่ประมาณ500ºC โดยมีกล้องจับเปลวไฟในเตาเพื่อวิเคราะห์พลังงานของเปลวไฟในเตาด้วยสีที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.21แสดงอุปกรณ์การวัดการเกิดตะกรันพัฒนาโดยZbogar, A.,et al.
ที่มา:Zbogar, A.,et al.(2006)

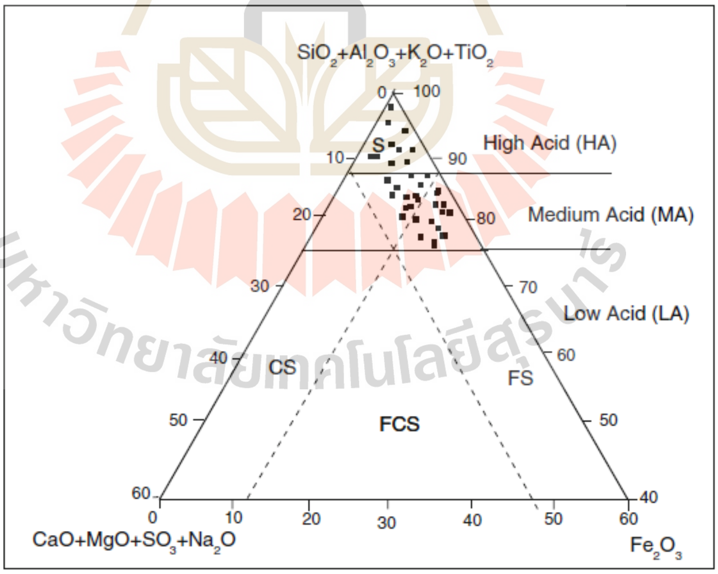
Zabetta, E.C., et al(2009) ศึกษาแบบจำลองการเกิดแนวโน้มตะกรันและสะสมสิ่งสกปรกที่ผิวท่อและการกัดกร่อนที่บริษัท Foster Wheeler โดยใช้ระบบ CFBs ทำการทดสอบมากกว่า 1,000 ครั้ง พบว่าแบบจำลองของการจับตัวของเถ้าเกิดจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โซเดียม(Na), โพแทสเซียม(K)ฟอสฟอรัส(P) และทราย (SiO_2) จากเตาและสามารถมีการจับตัวเป็นก้อนที่อุณหภูมิต่ำได้ เนื่องจากปริมาณด่างที่สูงที่สามารถวิเคราะห์ได้จากสารละลายมีค่าเป็นด่าง pH 3 โดยสาเหตุดังกล่าวสามารถลดได้โดยใช้Aluminosilicatesหรือแร่กลุ่ม kaolinite ส่วนการสะสมสิ่งสกปรกที่ผิวท่อเกิดจากองค์ประกอบของเชื้อเพลิง โซเดียม(Na)โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca)และแมงกานีส (Mg) โดยสาร อลูมิเนียม (Al) และ ซิลิกอล(Si) สามารถลดการสะสมของสิ่งสกปรกได้โดยลดความเป็นด่าง(Alkali)ส่วนการกัดกร่อนจะเกิดจากปริมาณ คลอรีน (Cl) ในเชื้อเพลิง ซึ่งการกัดกร่อนจะมีความสัมพันธ์กับการสะสม fouling ซึ่งการลดปริมาณ คลอรีนสามารถทำได้โดยsulfur oxides (SO_2, SO_3) ระหว่างการเผาไหม้

จากปัญหาการเกิด foulingและ deposit บนผิวท่อไอน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณ KCl สามารถแก้ปัญหาของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้จากสมการ 2.1 โดยการเติมดินขาวซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 47% โดยมวลและ Al_2O_3 38% โดยมวล ปฏิกิริยาการเผาไหม้จะได้ดังสมการที่ (2.32)

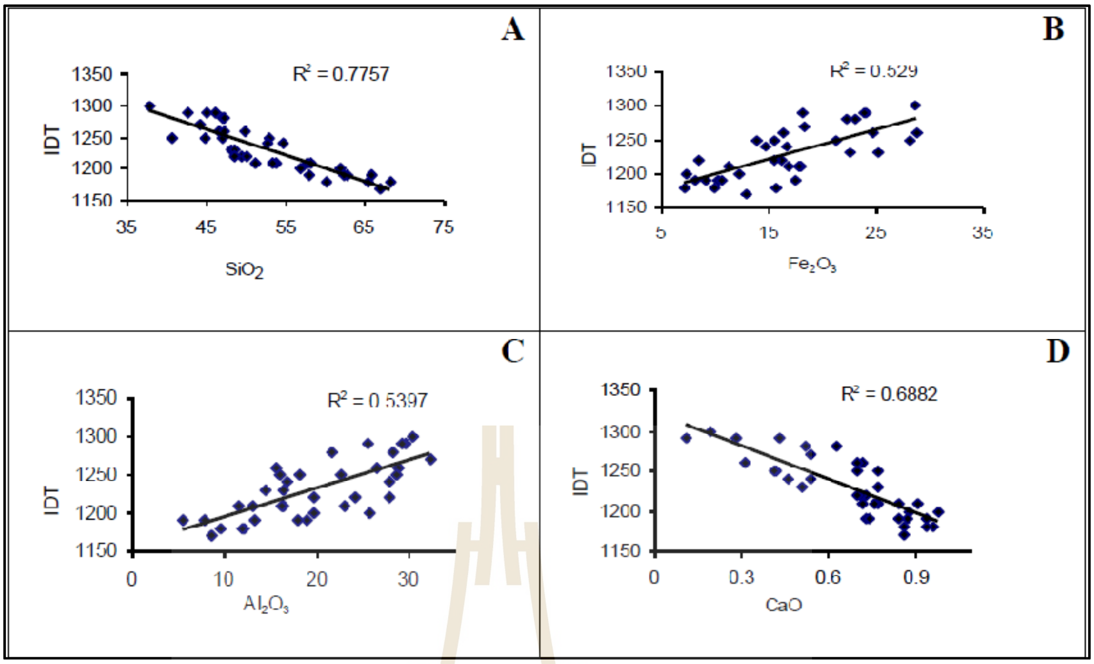
$$Al_2O_3 + 2SiO_2 + 2KCl + H_2O \rightarrow 2KAlSiO_4 + 2HCl \qquad (2.32)$$

Sharma, A., et al (2014)ศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหินชั้น 3 ของอินเดีย พบว่า ประมาณ Initial Deformation Temperature, IDT จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นอยู่กับปริมาณ Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2และ CaO ตามลำดับ และ Vassilev, S.V., and Vassileva, C.G.(2009); Singh, P.K., et al(2011,2012) ได้ทำการศึกษาตัวอย่างของถ่านหินที่มีปริมาณเถ้าที่เป็นกรดสูงและปานกลาง ดังรูปที่ 2.22พบว่าอิทธิพลจากองค์ประกอบของเถ้า Fe_2O_3มีค่าความสันพันธ์ (R^2=0.529), SiO_2มีค่าความสัมพันธ์(R^2=-0.7757),Al_2O_3มีค่าความสัมพันธ์(R^2=0.5397) และ CaOมีค่าความสัมพันธ์(R^2=-0.6882) จากรูปที่2.23-2.25แสดงถึงปริมาณออกไซด์ชนิดต่างๆของเถ้าที่มีผลต่อ initial deformation temperature(IDT)

ซึ่งจากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการนำเอาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำสามารถทำได้แต่จำเป็นต้องมีการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพที่ส่งผลต่อต่อประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำ โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เพื่อลดอิทธิพลของการจับตัวเป็นก้อน การสะสมสิ่งสกปรกภายในห้องเผาไหม้ และการกัดกร่อนของผิวท่อหม้อต้มไอน้ำ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำต่อไป

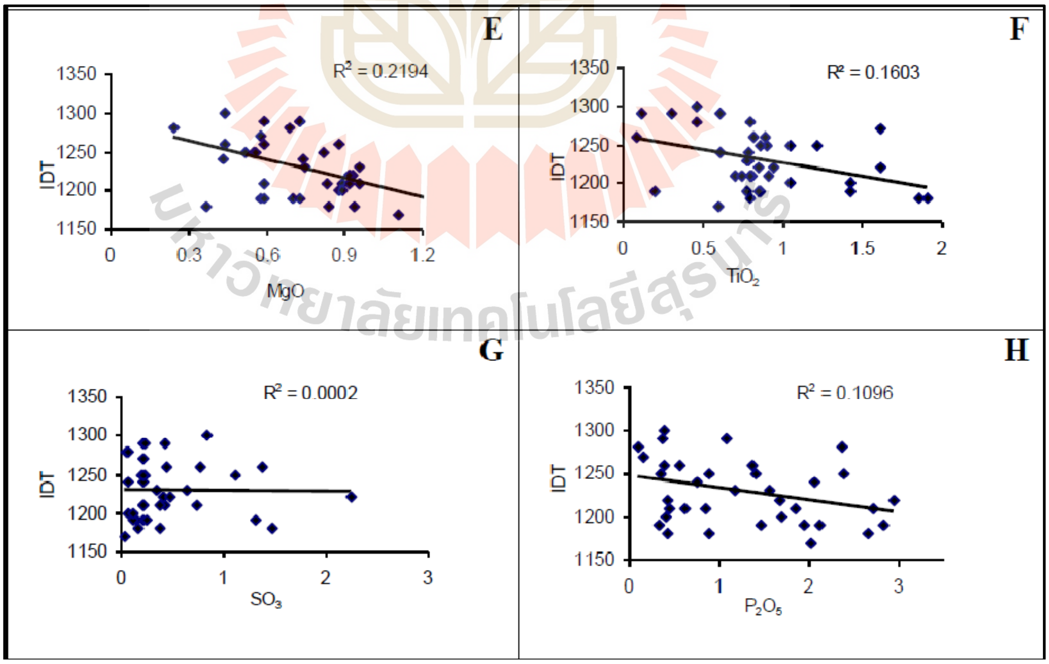


รูปที่ 2.22. Chemical classification and genetic mineral classification systems of high temperatureash.(S: Sialic, FS:Ferrisialic, FCS: Ferricalsialic, CS: Calsialic)



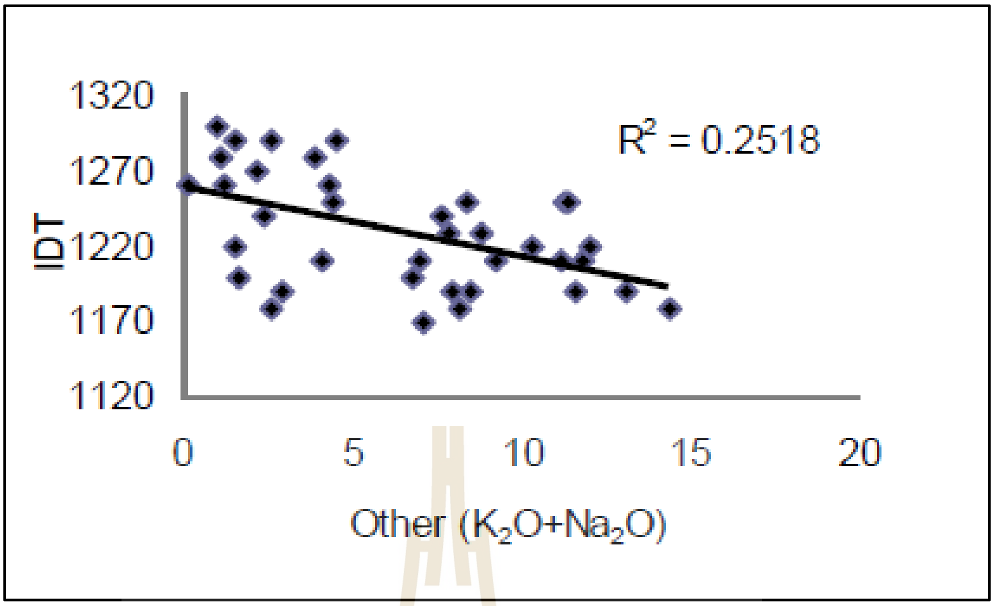
รูปที่ 2.23สหสัมพันธ์ของ SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3และ CaO ต่อ initial deformation temperature

(S: Sialic, FS:Ferrisialic, FCS: Ferricalsialic, CS: Calsialic)



รูปที่ 2.24สหสัมพันธ์ของ MgO, TiO_2, SO_3และ P_2O_5ต่อ initial deformation temperature

(S: Sialic, FS:Ferrisialic, FCS: Ferricalsialic, CS: Calsiali)



รูปที่ 2.25 สหสัมพันธ์ของ K_2O_3+Na_2O ต่อ initial deformation temperature

(S: Sialic, FS:Ferrisialic, FCS: Ferricalsialic, CS: Calsialic)

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย

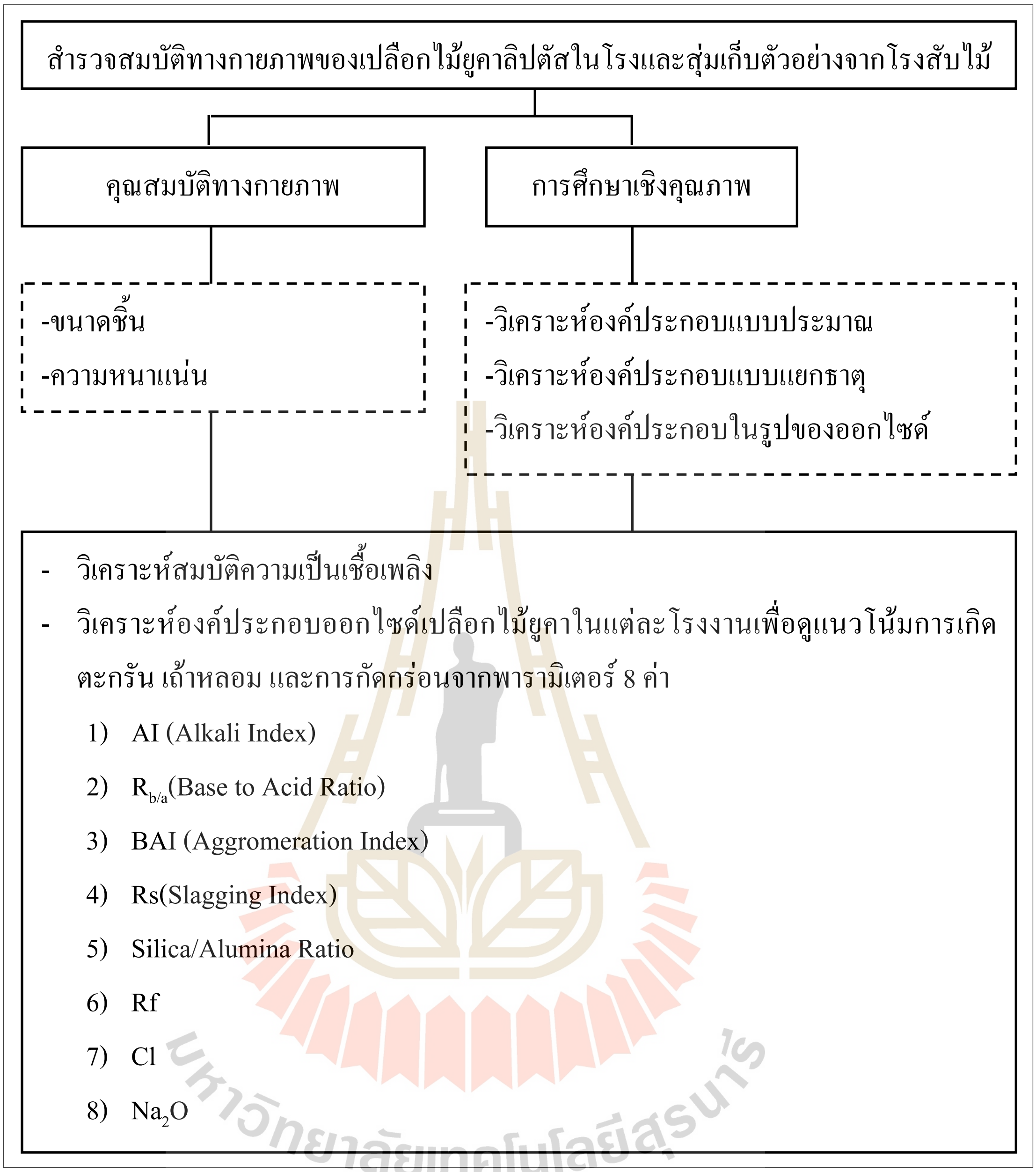
3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นวิจัยงานต่อยอดจากงานวิจัยเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ของกฤษกร รับสมบัติ (2555)ซึ่งได้ทำการศึกษาการใช้เปลือกยูคาลิปตัสแบบสับย่อยผสมกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 4 ระดับ คือ แบบสับย่อย 100% ความชื้น 13% wb., แบบสับย่อยผสมอัดแท่งอัตรา 80:20 ความชื้น 12.6% wb., แบบสับย่อยผสมอัดแท่งอัตรา 40:60 ความชื้น 11.8% wb. และอัดแท่ง 100% ความชื้น 11% wb. พบว่าการใช้เชื้อเพลิงจากเปลือกยูคาลิปตัสที่มีความหนาแน่นต่ำส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำและการใช้งาน เนื่องจากการป้อนต้องป้อนบ่อยครั้งและขนาดของห้องเผาไหม้ที่มีขนาดสั้นทำให้เผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดและส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับอบแห้งเพียงอย่างเดียวในการผลิตไอน้ำที่ความดัน 12 บาร์ เปรียบเทียบกับการผสมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะมีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 18.13% ทั้งที่ค่าความร้อนสุทธิใกล้เคียงกัน ซึ่งในทางกลับกันเมื่อนำเชื้อเพลิงไปอัดแท่งเชื้อเพลิงประสิทธิภาพสูงขึ้น 1.25 เท่าที่เงื่อนไขความดันเท่ากัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการสับและอบแห้ง แต่จากบทที่ 2 ได้กล่าวถึงปริมาณด่างในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณสูงจึงเป็นสาเหตุให้ไม่มีการนำไปใช้ เนื่องจากอิทธิพลด่างจะก่อให้เกิดเถ้าหลอม ตะกรันและการกัดกร่อนที่ผิวท่อภายในห้องเผาไหม้เพราะฉะนั้นการศึกษาการเพิ่มสารเติมแต่งเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับหม้อต้มไอน้ำจะมุ่งเน้นการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส 100% และปรับสัดส่วนของ สารเติมแต่งเพื่อลดอิทธิพลทางเคมีที่เกิดจากออกไซด์ของเชื้อเพลิงและเพิ่มประสิทธิภาพจากการลดอิทธิพลของการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนในหม้อต้นไอน้ำแบบท่อน้ำ จากการศึกษาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ 1) สำรวจโรงงานสับไม้ 19 จังหวัด ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาในโรงงานสับไม้และเก็บตัวอย่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินความเป็นเชื้อเพลิงและแนวโน้มของการ เถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อน 2) การศึกษาเปรียบเทียบการประเมินแนวโน้มการเกิด เถ้าหลอมตะกรันและ การกัดกร่อนจากออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงาน เปรียบเทียบกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ที่ผ่านการแปรรูปแล้ว (อัดแท่ง) และเปรียบเทียบกับเถ้าหนักของเชื้อเพลิงจากการทดสอบหม้อไอน้ำ โดยทำการประเมินจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 3)ทำการทดสอบการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมสารเติมแต่งโดยใช้ดินขาวในอัตราส่วน 5, 10 และ 12% ผสมก่อนป้อนเข้าห้องเผาไหม้ของหม้อต้มไอน้ำชนิดท่อน้ำในระดับ Pilot Scale ขนาด 500 กิโลกรัมไอน้ำต่อชั่วโมง และความดันสูงสุด 22 บาร์ โดยการทดสอบจะประเมินประสิทธิภาพการผลิตไอน้ำ และปริมาณไอเสียเทียบกับมาตรฐานประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

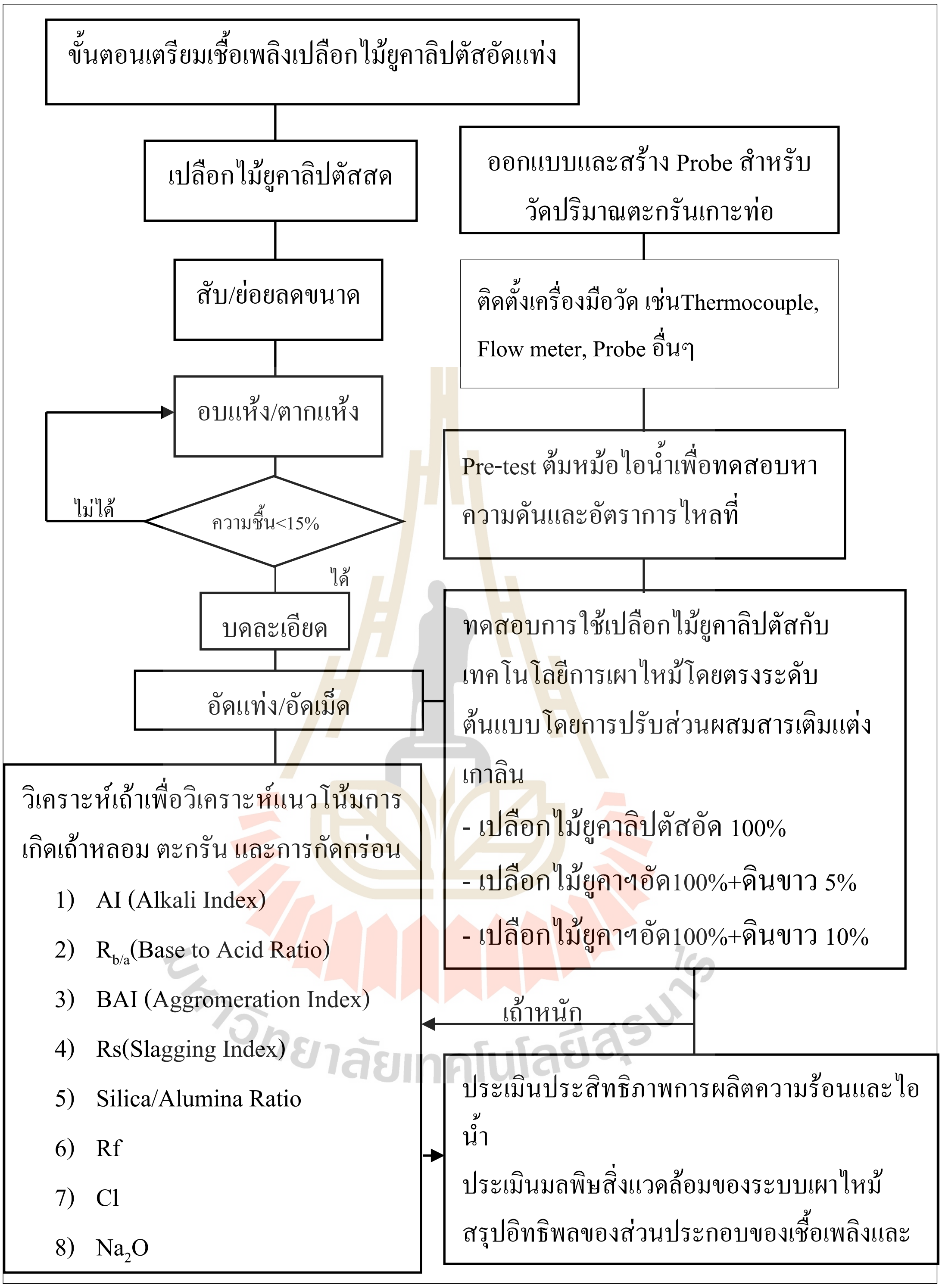
3.2 ขั้นตอนการวิจัย

การศึกษาการเพิ่มสารเติมแต่งเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับหม้อต้มไอน้ำเป็นส่วนหนึ่งของโครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำด้วยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิงของกฤษกร รับสมบัติ (2555)เป็นการศึกษาขั้นต้นจากการทดสอบพบว่าการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดทั้งในสภาพเป็นชิ้นและฝอยไม่สามารถนำมาใช้ในหม้อต้นไอน้ำที่ใช้ในการทดสอบได้ทำให้เงื่อนไขการใช้เชื้อเพลิงจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจำเป็นต้องมีการแปรรูป โดยการอบแห้งและอัดแท่ง ซึ่งจากการทดสอบการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% จะมีประสิทธิภาพสูงสุด เพราะฉะนั้นการศึกษาของโครงการนี้จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และนำมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินความเชื้อเพลิงและแนวโน้มของการ เถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อน โดยขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.1ซึ่งในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเตรียมเชื้อเพลิงโดยการอัดแท่งและผสมดินขาวเพื่อใช้ในการทดสอบหม้อต้มไอน้ำ โดยหม้อต้มไอน้ำจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณการเกิดตะกรันที่เกาะผิวท่อโดยท่อที่เลือกใช้เป็นชนิดเดียวกับท่อไอน้ำของหม้อต้มไอน้ำ (Pilot Scale) คือ ท่อไอน้ำชนิด Sch40เพื่อทำ Probeโดยจะมีก๊าซร้อนที่เกิดการเผาไหม้ไหลผ่านและถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศและน้ำที่ไหลอยู่ภายใน Probe ภายในห้องเผาไหม้จะทำการติดตั้ง Thermocouple Type R ชนิดหัวเซรามิค เนื่องจากมีอุณหภูมิสูง และทำการติด Thermocouple Type K ที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อบันทึกอุณหภูมิ ซึ่งขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานแสดงดังรูป 3.2



รูปที่ 3.1ขั้นตอนการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในโรงงานสับไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเพื่อประเมินความเป็นเชื้อเพลิงและแนวโน้มการเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพและอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในการผลิตพลังงานของ
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับดินขาว 5% 10% และ 12%
ของหม้อต้มไอน้ำขนาดPilot scale

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 วัสดุในการทดสอบและเครื่องจักรสำหรับการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

3.3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) เปลือกไม้ยูคาลิปตัสชนิดสับฝอยจากโรงสับไม้ในจังหวัดนครราชสีมา

2) ดินขาวจากบริษัทสยามซอยล์ จำกัด เป็นสารเติมแต่ง (Additive)จำนวน 500 กิโลกรัม สมบัติทางกายภาพและเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารเติมแต่งของดินขาวจากบริษัทสยามซอยล์ จำกัด

ชื่อทางการค้า		CHINA CLAY, Refined Kaolin, C-400
ลักษณะทางกายภาพ		ผงสีขาว
ความชื้น		ความชื้นสูงสุด 1%
ขนาดอนุภาคผ่าน Mesh 325		99.99%
pH 20% ของแข็ง		6.2±1
Silica	(Sio_2)	65.00 – 70.00
Alumina	($Al_2 O_3$)	17.00 – 20.00
Ferric Oxide	($Fe_2 O_3$)	< 1.60
Titania	(TiO_2)	0.10
Soda	(Na_2O)	3.30
Potash	($K_2 O$)	4.20
Magnesia	(MgO)	1.66
Calcium Oxide	(CaO)	0.07

3.3.1.2 เครื่องจักรสำหรับการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาว

1) เครื่องบดละเอียด (Hammer mill) คุณลักษณะสำคัญของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 ตามลำดับ

2) เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง (Pelletizing Machine) คุณลักษณะสำคัญแสดงไว้ในตารางที่ 3.3และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ

3) สายพานลำเลียงสำหรับป้อนเครื่องอัดแท่ง

4) อุปกรณ์ใช้ในการผสม เช่น จอบ หรือพลั่วในการผสม

5) เครื่องชั่งพิกัดสูงสุด 60 กิโลกรัม ความละเอียด 100 กรัม

ตารางที่ 3.2 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อยแบบละเอียด (Hammer mill)

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
ขนาดเครื่อง(มม.)	660 mm x 640 mm x 800 mm (กว้างxยาวxสูง)
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 40 แรงม้า (30kw)
ความเร็วรอบ	2000-2400 rpm
ลักษณะชุดใบมีด	ชุดใบมีด 4 แถว แถวละ 5 ใบ ขนาดลูกตีเส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm
กำลังการผลิต	0.3 ton/hr

รูปที่ 3.3 เครื่องบดละเอียด (Hammer mill)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.3ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องอัดแท่ง (Pelletizing Machine)

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
รุ่น	TPM 520-138
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 200 kw
ขนาดรูอัด	8 mm
กำลังการผลิต	2ton/hr

รูปที่ 3.4 ลักษณะของเครื่องอัดแท่งชีวมวล(Pelletizing Machine)

3.3.2 เครื่องมือในการทดสอบและเครื่องมือวัดของหม้อต้มไอน้ำ

1) เครื่องบันทึกข้อมูล(Data Logger รุ่น midi Logger GL 820) ของบริษัท Graphtec คุณลักษณะสำคัญแสดงดังตารางที่ 3.4

2) เซ็นต์เซอร์วัดอุณหภูมิ Thermocouple Type R, K

3) เครื่องวัดอัตราการไหล ขนาด 2 นิ้ว รุ่น DN50 ยี่ห้อ Spirax Sarco ค่า uncertainty 95% confidence, ± 2% of measured value from 10% to 100% of maximum rated flow ความสามารถในการวัดแสดงดังตารางที่ 3.5

4) อุปกรณ์วัดการเกาะของตะกรันภายในเตาดังรูปที่ 3.5

5) เครื่องหล่อเย็นด้วยน้ำ ดังรูปที่ 3.6

6) ปั๊มลมสำหรับหล่อเย็น ดังรูปที่ 3.7

7) หม้อต้มไอน้ำชนิดท่อน้ำ คุณลักษณะของหม้อต้มแสดงดังตารางที่ 3.6

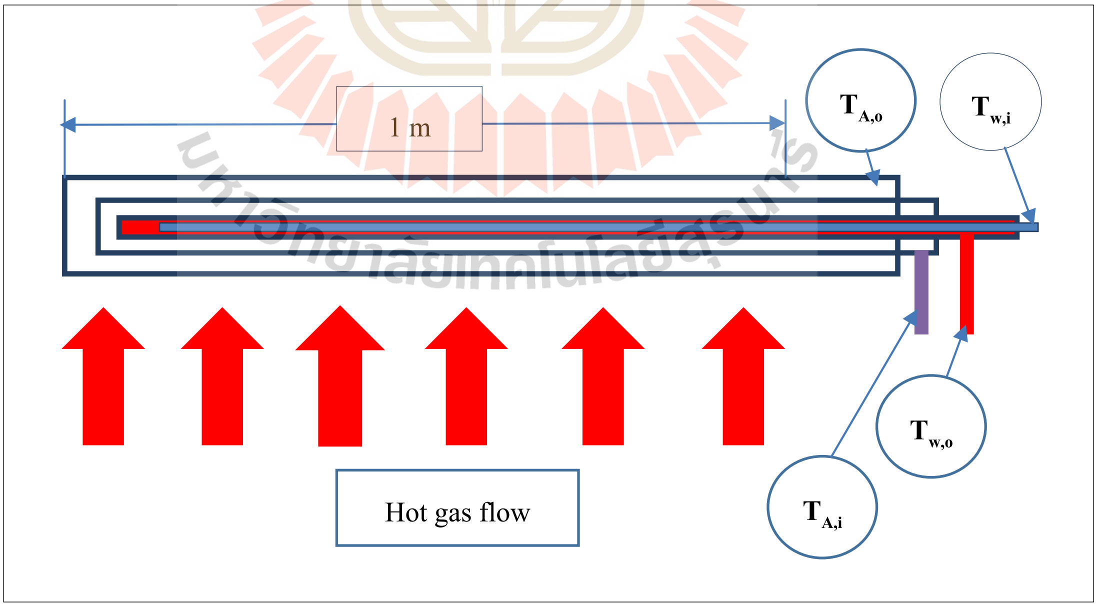
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.4 คุณลักษณะของเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger รุ่น midi Logger GL 820 ของบริษัท Graphtec

item		Description
Number of analog input channels		20 ch, Expandable up to 200 ch by unit of 20 ch
Sampling interval		10 ms to 1 h (in 10 ms to 50 ms, voltage only and limited channel), External
Time scale		1 sec to 24 hour/division
Calculation function	Between channels	Addition, Subtraction, Multiplication and Division for analog input
	Statistical	Select two calculations from Average, Peak, Max., Min., RMS
Interface to PC		Ethernet (10 BASE-T/100 BASE-TX), USB (Full speed)
Storage device		Built-in Flash memory (2 giga-bytes), USB memory device
USB memory device emulation		USB Memory emulation mode (Transfer or delete the file in built-in memory)
Display	Size	5.7 inch TFT color LCD (VGA: 640 x 480 dots)
Operating environment		0 °C to 45°C, 5 % to 85 % RH (When operating with battery pack 0 °C to 40 °C, charging battery 15 °C to 35°C)
External dimensions (WxDxH)		approx. 232 x 152 x 50 mm
Weight		approx. 900 g (Excluding AC adapter and battery pack)

ตารางที่ 3.5 ความสามารถในการวัดอัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุดที่ความดันต่างๆ ของ flow meter รุ่น DN50 ของ ยี่ห้อ Spirax Sarco

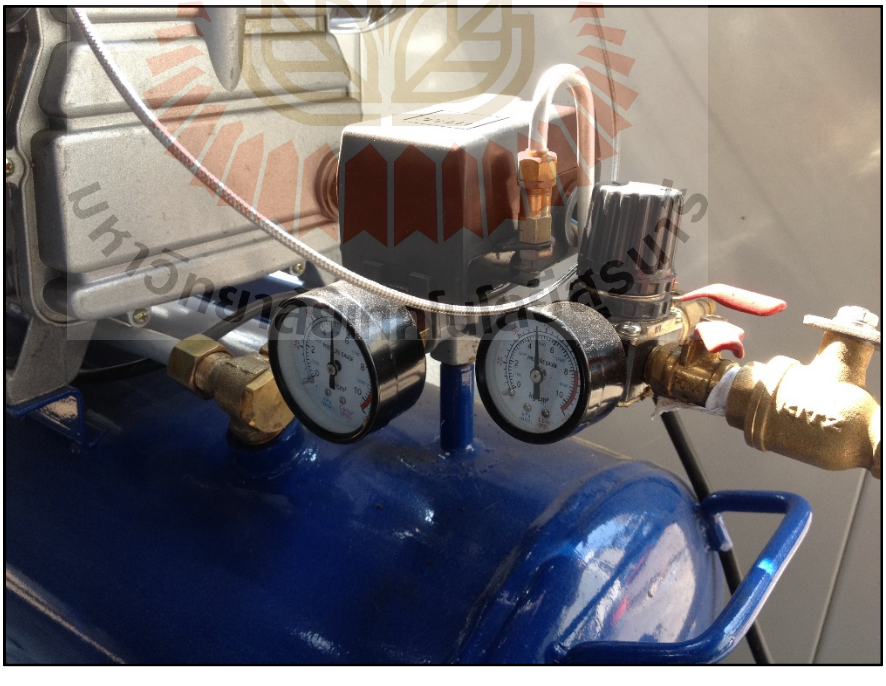
Pressure	Minimum flow	Maximum flow
bar	kg/h	kg/h
1	12	619
3	17	859
5	21	1042
7	24	1196
10	28	1395
12	30	1513
15	33	1676
20	38	1918
25	43	2135
30	47	2335
32	60	2409



รูปที่ 3.5อุปกรณ์วัดการเกาะของตะกรันภายในเตา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.6เครื่องหล่อเย็นด้วยน้ำ



รูปที่ 3.7ปั๊มลมสำหรับหล่อเย็น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.8หม้อต้มไอน้ำชนิดท่อน้ำ

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน

รายการ	รายละเอียด
ชนิดของเครื่องกำเนิดไอน้ำ	ชนิด Water Tube Boiler
แรงดันใช้งานสูงสุด	22 Bar
กำลังการผลิตไอน้ำสูงสุด	500 kg/hr
ระบบเตาเผาและระบบป้อนเชื้อเพลิง	Grate stoker

ทั้งนี้ส่วนประกอบของ ต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำและความร้อน ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ระบบการผลิตพลังงานความร้อน
  - ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบตะกรับ (Grate stoker)
  - ระบบทำความสะอาดแก๊สไอเสีย ระบบดักเขม่า และไซโคลน
  - ระบบการวัดและควบคุม เซนเซอร์อุณหภูมิ เซนเซอร์แรงดัน เซ็นเซอร์ออกซิเจน
  - ระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบ Screw conveyor พร้อมถังพักเชื้อเพลิง
  - ระบบลำเลียงขี้เถ้า

ก.ห้องเผาไหม้แบบตะกรับ

ข.ระบบทำความสะอาดแก๊สไอเสีย ระบบดักเขม่า, ไซโคลน

ค. ระบบวัด ควบคุมอุณหภูมิและแรงดัน

ง.ระบบป้อนเชื้อเพลิงพร้อมถังพัก

รูปที่ 3.9 ระบบผลิตพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- ระบบการผลิตและใช้ไอน้ำ

  - ชุดผลิตน้ำสะอาดด้วยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

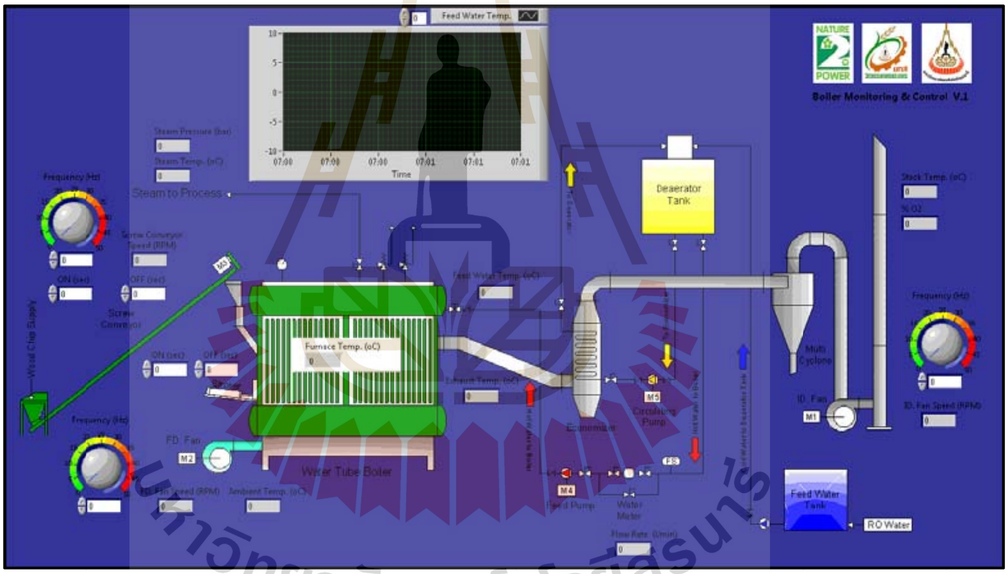
  - ชุดเครื่องกำเนิดไอน้ำ

  - ชุดระบบควบคุมอัตโนมัติระบบการวัดและควบคุม เซนเซอร์อุณหภูมิ เซนเซอร์แรงดัน อุปกรณ์วัดปริมาณน้ำ

  - ชุดเติมและควบคุมปริมาณสารเคมีเพื่อป้องกันตะกรัน

ก.ชุดผลิตน้ำสะอาด ข. ชุดควบคุม และวัดปริมาณน้ำอัตโนมัติ

รูปที่ 3.10 ระบบการผลิตและใช้ไอน้ำ



รูปที่ 3.11การทำงานของระบบผลิตไอน้ำ

3.3.3 เครื่องมือในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี

1) เครื่องชั่งน้ำหนัก

2) ตู้อบ

3) เตาเผา

4) เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์(Bomb Calorimeter)

5) เครื่องเอกซเรย์ X-ray–Diffraction (XRD)

6) เครื่อง Scaning Electron Microscope (SEM)

7) เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปคโตรมิเตอร์Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF)ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED 2000

8) เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ Elemental Analyser ยี่ห้อ LECO รุ่น Analyser CHNS-932

9) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียโดยวัดโดยใช้เครื่อง Testo-350 XL

3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัยโดยละเอียดมีดังต่อไปนี้

3.4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ และเคมีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากโรงงานสับไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อประเมินความเป็นเชื้อเพลิงและแนวโน้ม การเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน

3.4.1.1 ขั้นตอนการศึกษาเริ่มต้นจากการจัดทำแบบสอบถาม ดังภาคผนวก ก ซึ่งภายในแบบสอบถามจะประกอบด้วยข้อมูลทั่วไป และข้อมูลปริมาณผลิตและการใช้ประโยชน์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสภายในโรงงาน ซึ่งจำนวนโรงงานที่สำรวจ ได้จากข้อมูลโรงงานที่จดทะเบียนกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไม้สับ วิธีการสำรวจข้อมูลภาคสนาม จะสำรวจโรงงานที่ตั้งในพื้นที่ 19 จังหวัดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดกาฬสินธุ์, จังหวัดขอนแก่น, จังหวัดชัยภูมิ, จังหวัดนครพนม, จังหวัดนครราชสีมา, จังหวัดบุรีรัมย์, จังหวัดมหาสารคาม, จังหวัดมุกดาหาร, จังหวัดยโสธร,จังหวัดร้อยเอ็ด,จังหวัดเลย,จังหวัดศรีสะเกษ, จังหวัดสกลนคร,จังหวัดสุรินทร์,จังหวัดหนองคาย, จังหวัดหนองบัวลำภู, จังหวัดอำนาจเจริญ, จังหวัดอุดรธานี,จังหวัดอุบลราชธานี โดยการสำรวจจะทำการเก็บตัวอย่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในแต่ละโรงงานและทำการศึกษาขนาดความยาวชิ้นเปลือก ความหนาเปลือก และความหนาแน่นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่กำลังผลิต ทั้งชนิดเป็นแบบชิ้นและสับฝอย โดยความหนาแน่นจะใช้ภาชนะบรรจุ และชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นดังสมการที่ 3.1 และทำการเก็บตัวอย่างจากโรงสับไม้เพื่อนำวิเคราะห์เชิงคุณภาพต่อไป

$$\text{ความหนาแน่น } (kg/m^3) = \text{น้ำหนัก } (kg) \,/\, \text{ปริมาตรที่บรรจุ } (m^3) \quad (3.1)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.4.1.2 ศึกษาข้อมูลศักยภาพเชิงคุณภาพ (Quality) เน้นการศึกษาสมบัติของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส อันประกอบด้วย

1) การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ

ขนาด (Size) ความชื้น (Moisture Content) ความหนาแน่น (Appearance Density)

2) การศึกษาสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis)

- ความชื้น (Moisture) คือเปอร์เซ็นต์ของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุเริ่มต้นมีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก(%wb) ความชื้นมีผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้และคุณภาพของก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้เชื้อเพลิงที่มีขนาดความชื้นต่ำยิ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบผลิตก๊าซได้มากขึ้นเท่านั้น โดยวิธีการวิเคราะห์ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173
- เถ้า (Ash) คือปริมาณเถ้าที่มีอยู่ในชีวมวล ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิซึ่งปริมาณเถ้าในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้ เช่น ถ้ามีปริมาณเถ้าสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนต่ำ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3174
- ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter) คือปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณสารระเหยในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง ก็มีแนวโน้มที่ชีวมวลจะมีค่าความร้อนสูง เกิดผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เผาไหม้ได้สูง แต่ปริมาณของคาร์บอนคงตัวจะต่ำ ตามลำดับ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3175
- ปริมาณคาร์บอนคงตัว(Fixed Carbon) คือ ปริมาณองค์ประกอบคาร์บอนที่มีอยู่ในชีวมวล ซึ่งปริมาณคาร์บอนคงตัวในชีวมวลสามารถนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบอื่นๆ ของเชื้อเพลิงได้เดียวกัน เช่น ถ้ามีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ก็มีแนวโน้มที่จะให้ผลได้ของถ่านชาร์สูง เป็นต้น โดยใช้วิธีการคำนวณจากร้อยละกับผลต่างระหว่าง ความชื้น เถ้า และปริมาณสารระเหย (By difference)
- ค่าความร้อน (Hight Heating Value) คือค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบต่อ 1 หน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรของเชื้อเพลิงโดยมีหน่วยเป็น kJ/kg, kcal/kg, Btu/lb หรือ kcal/litre เป็นต้นจะเป็นค่าที่บ่งบอกว่าชีวมวลนั้นๆ มีความเหมาะสมที่จะนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงหรือไม่ โดยวิธีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานASTM D2015

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3) การศึกษาสมบัติทางเคมี (Chemical composition)

การศึกษาองค์ประกอบของปริมาณธาตุในตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อหาปริมาณธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ส่วนธาตุออกซิเจนใช้วิธีการคำนวณโดยหาจากผลต่างของธาตุ

4) การศึกษาองค์ประกอบเถ้าจากการเผาไหม้

การศึกษาองค์ประกอบเถ้าจากการเผาไหม้หรือ การวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อหาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเถ้าในรูปออกไซด์สำหรับนำไปประเมินผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้คือการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันและการกัดกร่อนเป็นต้น ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าโดยใช้เครื่อง X-ray –Diffraction (XRD) และศึกษาผลึกของเถ้าด้วย เครื่อง Scaning Eletron Microscopy (SEM) ประกอบการใช้วิเคราะห์สำหรับการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้พิจารณาแนวโน้มการเกิด ตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน 8 ค่า จากส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าที่ทำให้เกิด Slagging และ Fouling

1) AI (Alkali Index)

$$AI = \frac{kg(K_2O + Na_2O)}{GJ} \tag{3.2}$$

ค่า AI มีค่าอยู่ในช่วง 0.17-0.34 kg/GJอาจเกิด Fouling และ Slagging แต่ถ้าค่า AI มากกว่า 0.34 kg/GJ มีแนวโน้มการเกิด Fouling และ Slagging แน่นอน

2) BAI(Bed Agglomeration Index)

ค่า BAI นั้น ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.15 เบด(Bed) จะจับตัวเป็นก้อน

$$BAI(Bed \cdot Agglomeration \cdot Index) = \%\left(Fe_2O_3\right) / \%(K_2O + Na_2O) \tag{3.3}$$

3) Basic/Acid ratio หรือ (B/A ratio)

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$B/A \cdot ratio = \left(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O\right) / \left(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2\right) \tag{3.4}$$

4) Slagging Index (Rs)

Ratio นี้จะบอกถึงแนวโน้มในการเกิด Slag เช่นเดียวกับ Basic/Acid Ratio ถ้ายิ่งค่า Rs มีค่าสูง โอกาสที่จะเกิด Slagging ก็เพิ่มขึ้น

$$Rs = \left(Basic / Acid\right) \cdot \%Sulphur\ in\ Biomass\ \left(Dry\ Basis\right) \tag{3.5}$$

5) Silica/Alumina Ratio

Silica สามารถรวมตัวกับสารประกอบที่เป็นเบสแล้วเกิดเป็น Silicates ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำได้ มากกว่าโอกาสที่ Alumina จะรวมตัวเกิดเป็น Aluminate ดังนั้นเถ้าที่มีค่า B/A Ratio เท่ากัน แต่เถ้าที่มีค่า Silica/Alumina Ratio สูงกว่าจะมีลักษณะหลอมตัวได้ง่ายกว่า โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 4.0อัตราส่วนนี้ใช้เป็นข้อมูลพิจารณาเกี่ยวกับการหลอมตัวของเถ้าเนื่องจากส่วนประกอบทั้งสองเป็น Acidic Oxides ซึ่งถือว่า มีจุดหลอมเหลวสูง

$$Silica / Alumina\ Ratio\ =\ SiO_2 / Al_2O_3 \tag{3.6}$$

6) Fouling Index (Rf)

ใช้ในกรณีของเถ้าที่มีค่า $CaO + MgO < Fe_2O_3$ เท่านั้น

$$Rf = \left(Basic / Acid\right) \cdot \%Na_2O\ \text{ในเถ้า} \tag{3.7}$$

ตารางที่ 3.7 แสดงค่า Fouling Index (Rf)ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

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

ปริมาณ Sodium Oxide ในเถ้า

ใช้ในกรณีเถ้าที่มีค่า $CaO + MgO > Fe_2O_3$ ซึ่งปริมาณร้อยละของ Na_2O ใน เถ้าจะบอกถึงแนวโน้มการเกิด Fouling

ตารางที่ 3.8 แสดงปริมาณ Sodium Oxide (Na_2O)ในเถ้าที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

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

7)ปริมาณคลอรีน (Chlorine)

ถ่านหินบางแหล่ง Active Alkali โซเดียม(Na) และ โพแทสเซียม(K)พบอยู่ในรูปโซเดียมคลอไรด์(NaCl)และ โพแทสเซียมคลอไรด์(KCl)ดังนั้น สามารถหาความสัมพันธ์ของการเกิด Fouling กับปริมาณคลอรีนในถ่านหินได้ ซึ่งปริมาณคลอรีนจะเป็นตัวบอกแนวโน้มการเกิด Fouling ได้

ตารางที่ 3.9 แสดงปริมาณคลอรีน (Chlorine)ที่มีแนวโน้มการเกิด Fouling

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

3.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับดินขาว 5%, 10% และ 12% และอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในหม้อต้มไอน้ำ

3.4.2.1 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแบ่งได้ 4ขั้นตอน

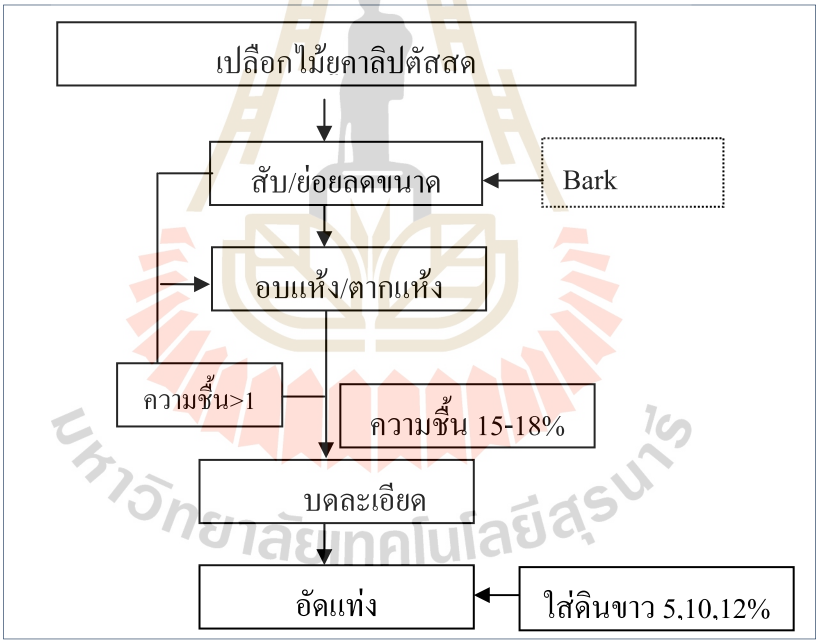
การเตรียมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพื่อเป็นเชื้อเพลิง

1) เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดถูกนำมาผ่านกระบวนการ สับ/ย่อย ลดขนาด โดยส่วนใหญ่จะมีการลดขนาดมาแล้วจากโรงงานแปรรูป โดยใช้เครื่องสับ(Bark Shredder)

2) นำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งหรือตากแห้งเพื่อลดความชื้นให้มีค่า 15-18%

3) นำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแห้งไปบดละเอียด

4) เข้าสู่กระบวนการอัดแท่งขนาดรูอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.11หลังจากนั้นนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่แปรรูปแล้วไปตรวจสอบคุณสมบัติด้านความหนาแน่น ขนาด ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ วิเคราะห์ออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง เพื่อนำไปวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อน หลังจากได้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งแล้วนำไปผสมดินขาวในอัตราส่วน 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการทดสอบหม้อต้มไอน้ำต่อไป

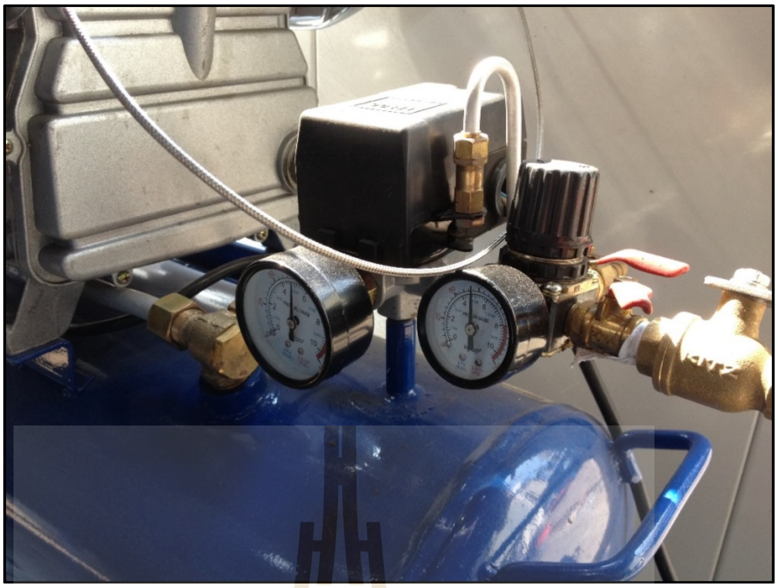


รูปที่ 3.12กระบวนการเตรียมเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง

3.4.2.2 การทดสอบการเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อต้มไอน้ำชนิดท่อน้ำเพื่อประเมินประสิทธิภาพการผลิตความร้อนและไอน้ำ มีหัวข้อที่ต้องศึกษา ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบ Probe สำหรับการเก็บข้อมูลการสะสมสิ่งสกปรกและการกัดกร่อนจากการเผาไหม้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและใช้สารเติมแต่งในเชื้อเพลิงโดยProbe เป็นท่อไอน้ำชนิด Sch40มีขนาด DN 50 (ท่อ 2 นิ้ว) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับหม้อไอน้ำที่ทดสอบ โดยการออกแบบต้องมีการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวท่อประมาณ 500ºCได้ออกแบบให้ใช้น้ำและอากาศเป็นตัวพาความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ผิวท่อให้คงที่ ซึ่งการออกแบบทำเป็น 3 ชั้น โดยชั้นในสุดเป็นท่อสแตนเลสขนาด 12 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร เป็นท่อน้ำเข้าและมีท่อสแตนเลสชั้นนอกขนาด 25.4 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร เป็นท่อน้ำออกเพื่อหล่อเย็นมี ซึ่งน้ำจะไหลวนผ่านเครื่องหล่อเย็นเพื่อถ่ายเทความร้อน ดังรูปที่ 3.12 และจะมีท่ออีกชั้นเพื่อเป็นการหล่อเย็นด้วยอากาศเป็นท่อสแตนเลสขนาด 38.1 มิลลิเมตร หนา 1.2 มิลลิเมตรเป็นท่อลมเข้า โดยจะมีปั๊มลมเป็นแหล่งผลิตลมและถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อ Probe ออกสู่ภายนอก ซึ่งจะมีการติด Thermocouple Type K ที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของท่อลมและน้ำ ซึ่งเครื่องหล่อเย็นจะควบคุมอุณหภูมิที่ 14±2ºCและจะรักษาอุณหภูมิคงที่และคอมเพรสเซอร์จะผลิตลมในอัตราการไหลที่ 250 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 3-4 บาร์ เข้าไปหล่อเย็นผิวท่อ Probe ดังรูปที่ 3.13 การติดตั้ง Probe จะทำการเจาะประตูเตาหม้อต้มไอน้ำเพื่อติดตั้ง Probe โดยกำหนดให้การติดตั้งจะสูงจากแผ่นตะกรับ 40 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะกับผิวท่อหม้อไอน้ำชั้นแรก พร้อมทั้งติดตั้ง Thermocouple Type R เพื่อวัดอุณหภูมิ โดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิจะต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล Data Logger ซึ่งจะบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที

รูปที่ 3.13แสดงลักษณะการติดตั้งและอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างการเกิด Deposit



รูปที่ 3.14ลักษณะคอมเพรสเซอร์ที่ใช้ในการผลิตลม

2) การติดตั้งเซนเซอร์เครื่องมือวัด

- การติดตั้ง Thermocouple จะติดตั้ง 7 ตำแหน่ง เพิ่มเติมจากหม้อต้มไอน้ำ

1. ทางเข้าลมเย็นที่ท่อ Probe
2. ทางออกลมร้อนที่ท่อ Probe
3. ทางเข้าน้ำหล่อเย็นที่ท่อ Probe
4. ทางออกน้ำหล่อเย็นที่ท่อ Probe
5. ห้องเผาไหม้
6. ก่อนไอเสียเข้า Economizer
7. ปล่องไอเสีย

- การติดตั้งเครื่องมือวัดอัตราการไหลของไอน้ำ ทำการติดตั้งตามเงื่อนไขคู่มือ

3) การทดสอบ Pre-test ทำการทดสอบเพื่อกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ โดยทำการใช้เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในการผลิตไอน้ำและปรับความเร็วห้องเผาไหม้และปรับอัตราการป้อนเพื่อหาอัตราการผลิตไอน้ำสูงสุด และความดันสูงสุดที่ทำได้ โดยกำหนดให้การเผาไหม้ให้มีอากาศเกิน 15-20% โดยทำการวิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์ไอเสียจากปริมาณ O_2 เมื่อมีภาระ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

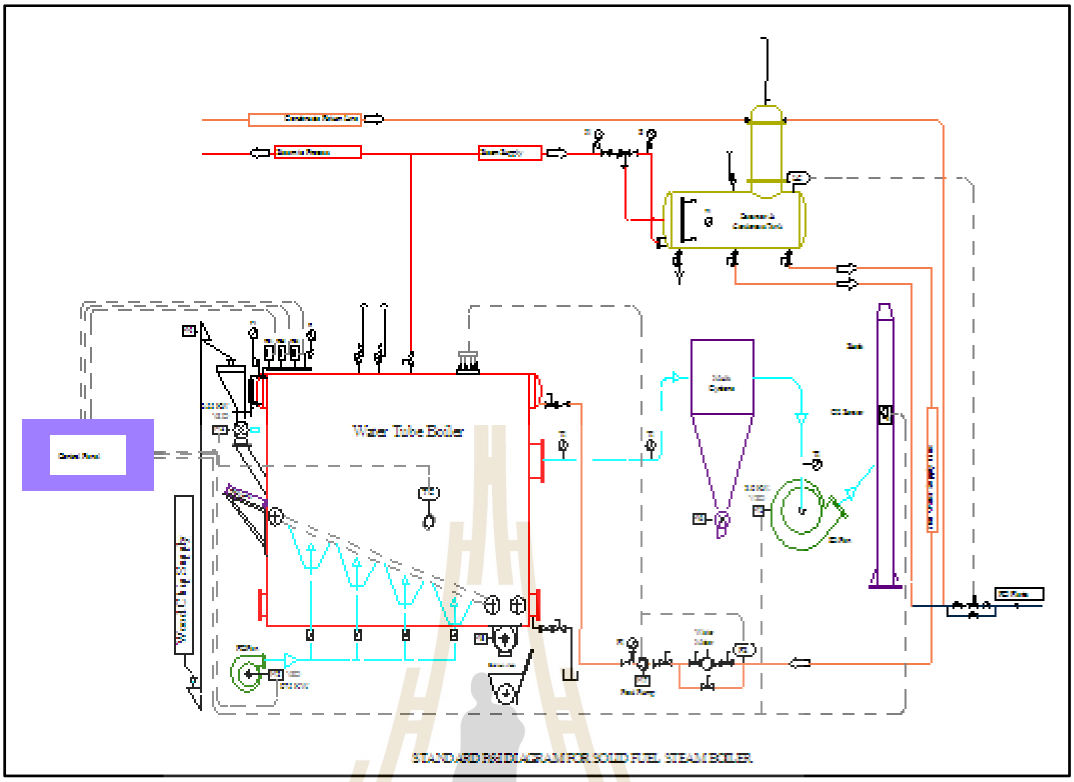
4) การทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งกับหม้อต้มไอน้ำเพื่อหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ (Thermal Efficiency %) หาได้จากค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำได้รับจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยเปิดตารางเอทาลปีที่เปลี่ยนไป โดยทางน้ำออกใช้เอทาลปีของไอน้ำที่สภาวะเป็นไออิ่มตัวที่ความดันหม้อไอน้ำ ส่วนทางเข้าใช้เอทาลปีของน้ำที่อุณหภูมิน้ำในถังคอนเดนเสตเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำและอัตราการใช้เชื้อเพลิงแล้วนำมาคำนวณหาดังสมการที่ (3.8) โดยรายการวัดและวิเคราะห์ ดังแสดงใน ตารางที่ 3.7

3.5.2.2 ประสิทธิภาพของ Boiler(Boiler Efficiency %)

$$\eta_{\text{Boiler}} = \frac{\dot{m}_{\text{Water}}\left(h_{\text{Steam}} - h_{\text{Water}}\right)}{\dot{m}_{\text{fuel}}\left(\text{LHV}\right)} \tag{3.8}$$

โดยที่	$\dot{m}_{Water}$	คือ	อัตราการผลิตไอน้ำมีหน่วยเป็น kg/h
	$\dot{m}_{fuel}$	คือ	อัตราการการป้อนเชื้อเพลิงมีหน่วยเป็น kg/h
	h_{water}	คือ	เอทาลปีของน้ำที่ป้อนมีหน่วยเป็น kJ/h
	h_{Steam}	คือ	เอทาลปีของไอน้ำอิ่มตัวมีหน่วยเป็น kJ/h
	LHV	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Low Heating Value, kJ/kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.15ระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.10การวัดและวิเคราะห์การผลิตความร้อนและอิทธิพลที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิง
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

รายละเอียดการเก็บข้อมูล	วิธีการเก็บข้อมูล	ตัวชี้วัด
ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนป้อน	ชั่งน้ำหนักก่อนป้อนเข้าระบบ	อัตราการป้อนเชื้อเพลิง
ใช้ Flow meter	บันทึกทุก 10 นาที	อัตราการไหลของไอน้ำ
อุณหภูมิน้ำเข้า	บันทึกข้อมูลจาก Condensate Tank ทุก 1 ชั่วโมง	เอนทาลปีของน้ำเข้า
อุณหภูมิไอน้ำ	บันทึกความดันหม้อไอน้ำทุก 10 นาที	เอนทาลปีของไอน้ำอิ่มตัว
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	วิเคราะห์ความชื้นเพื่อหา LHV จากกราฟ	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง
ปริมาณเถ้า	เก็บและชั่งปริมาณเถ้าหลังจากเผาไหม้	อัตราการเกิดเถ้าเป็นผง
		อัตราการเกิดเถ้าเป็นก้อน
ปริมาณตะกรัน	ติดตั้งและชั่ง Probe ก่อนและหลังการเผาไหม้และบันทึกน้ำหนักตะกรันที่เพิ่มขึ้นโดยชั่งหนักหลังจากเผาไหม้ และวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง SEM, XRD และXRF	ปริมาณการกัดกร่อน ปริมาณการเกิดตะกรัน ปริมาณเถ้าหลอม
ออกไซด์เถ้าหนัก โครงสร้างผลึกเถ้าหนัก	บันทึกน้ำหนักเถ้าโดยสุ่มเก็บไปวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง SEM, XRD และXRF	พารามิเตอร์แนวโน้มการเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน 8 ดัชนี
ออกไซด์เถ้าลอย โครงสร้างผลึกเถ้าหนัก	บันทึกน้ำหนักเถ้าโดยสุ่มเก็บไปวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง SEM, XRD และXRF	พารามิเตอร์แนวโน้มการเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน 8 ดัชนี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5).ศึกษามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยตรง

ในการเดินระบบเพื่อศึกษามลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงาน จะทำการศึกษาในเชิงคุณภาพจากเครื่องวัดไอเสีย โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงใน ตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11การวัดและวิเคราะห์มลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

รายการ	รายละเอียด
เถ้าหนัก (Bottom ash) และ เถ้าลอย (Fly ash)	การวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์โดยใช้วิธีการและเครื่องมือเช่นเดียวกับการวิเคราะห์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
ก๊าซไอเสีย	อุณหภูมิ, CO_2, CO, SO_2, NO_2, NO, NO_x, H_2S จะตรวจวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียโดยใช้เครื่อง Testo-350 XL

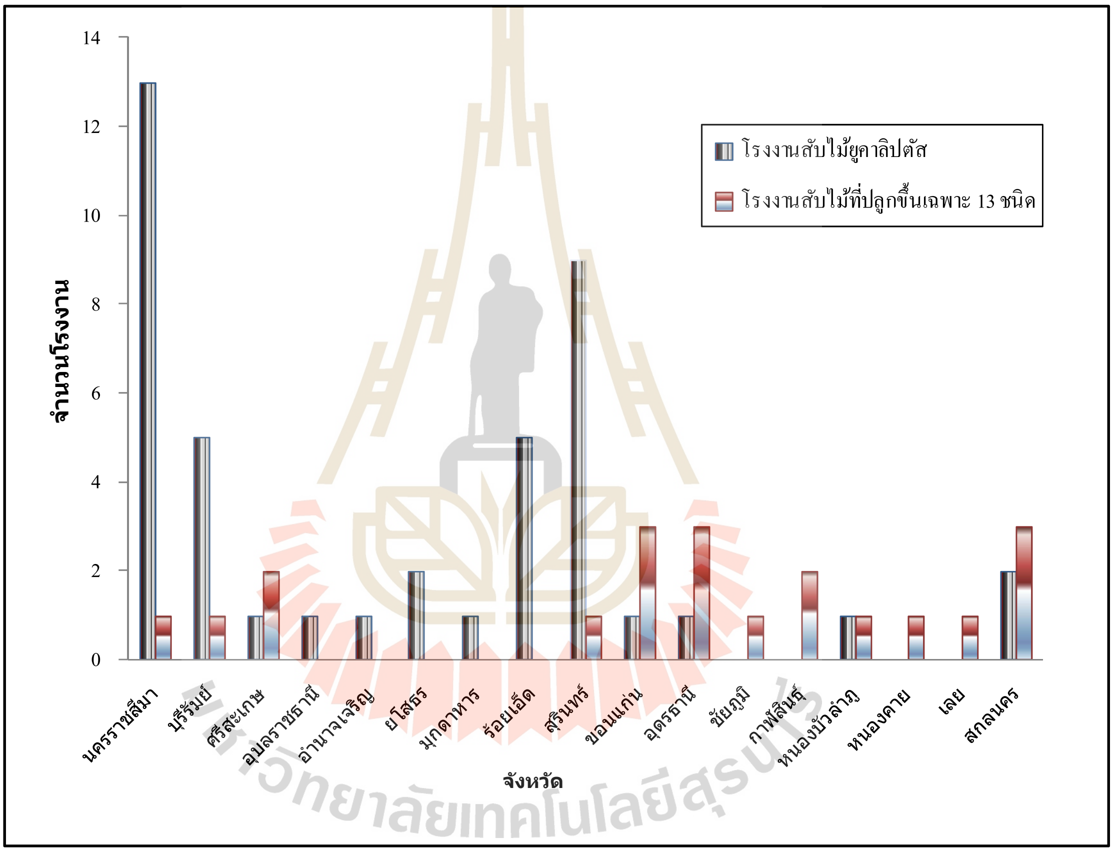
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 ผลการสำรวจปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ผลการสำรวจข้อมูลโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสของภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด 19 จังหวัดพบโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสรวม 17 จังหวัด จำนวน 64 โรงงาน จังหวัดที่ไม่มีโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส คือ จังหวัดนครพนม และจังหวัดมหาสารคาม โดยจังหวัดที่มีจำนวนโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสมากที่สุด 3ลำดับแรกคือ นครราชสีมา สุรินทร์ บุรีรัมย์ ตามลำดับโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ โรงงานที่สับเฉพาะไม้ยูคาลิปตัส จำนวน 44 โรงงาน และโรงงานที่สับไม้ที่ปลูกขึ้นเฉพาะ13 ชนิดอีก 20 โรงงาน ดังรูปที่ 4.1 โดยไม้ยูคาลิปตัสส่วนใหญ่จะมีขนาดตั้งแต่ขนาด 1-10 นิ้ว และในกระบวนการผลิตของโรงงานจะมีการแยกเปลือกออกจากเนื้อไม้โดยใช้เครื่องจักรโดยสัดส่วนระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสต่อเนื้อไม้มีค่าเฉลี่ย 20.5:79.5 และมีความหนาของเปลือกไม้เฉลี่ย 4-6 มิลลิเมตร จำนวนไม้ยูคาลิปตัสแต่ละโรงงานรับซื้อเพื่อมาแปรรูปในแต่ละปีประมาณ 5,092,392 ตัน เทียบเป็นทราบปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 1,043,940 ตันต่อปี ดังตารางที่ 4.1ในกระบวนการแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสเปลือกไม้ที่ออกมานั้นจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบชิ้น และแบบฝอย แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งโรงงานบางแห่งอาจจะมีเครื่องสับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทำให้มีเปลือกไม้เป็นแบบฝอยมีเพียง 31.4% แต่โรงงานส่วนใหญ่จะไม่มีเครื่องสับเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 68.6%โดยส่วนมากโรงงานจะอยู่ในจังหวัดนครราชสีมาและเป็นโรงงานที่มีกำลังผลิตสูง โดยข้อดีของการสับเปลือกไม้นั้นเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง ซึ่งจะส่งผลดีต่อการขนส่งเพื่อจำหน่าย แสดงดัง ตารางที่ 4.2 ส่วนเรื่องการจัดการเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของแต่ละโรงงานจากแบบสอบถาม พบว่าจะจำหน่ายให้แก่โรงไฟฟ้าเพื่อเป็นเชื้อเพลิง 49.82% หรือ 520,130 ตันต่อปี ซึ่งมีบางส่วนจำหน่ายให้แก่เกษตรกรแต่เป็นจำนวนที่น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่จำหน่ายให้แก่โรงไฟฟ้าและยังมีโรงงานสับไม้ที่ไม่เคยจำหน่าย คิดเป็น 50.18% หรือ 523,810 ตันต่อปี ดังตารางที่ 4.1 ส่วนเรื่องการนำไปใช้ประโยชน์สัดส่วนที่ทางโรงงานสับไม้จำหน่ายให้แก่โรงไฟฟ้านั้นจะนำไปเป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด แต่สำหรับในส่วนที่ไม่ได้จำหน่ายสามารถแบ่งแยกออกเป็น 2 แบบ คือ การนำไปใช้ทำเป็นปุ๋ยซึ่งทางโรงงานสับไม้บางแห่งที่ไม่เคยจำหน่ายหรือใช้ประโยชน์ในจังหวัดสุรินทร์และนครราชสีมาจะนำเปลือกไม้บางส่วนที่เหลือจากการขายเป็นเชื้อเพลิงมาหมักและผลิตปุ๋ยเพื่อจำหน่ายโดยคิดเป็นปริมาณ 1,043 ตันต่อปี ส่วนโรงงานบางแห่งก็จะกองเปลือกทิ้งไว้ภายในพื้นที่โรงงานโดยคิดเป็น

522,766 ตันต่อปี เนื่องจากราคารับซื้อเปลือกไม้ของโรงไฟฟ้ามีราคาที่ถูกไม่คุ้มที่จะนำไปขายอันผลเนื่องมาจากเปลือกไม้มีความชื้นสูง จึงทำให้ราคาเชื้อเพลิงราคาถูกโดยราคาขายหน้าโรงสับไม้จะอยู่ประมาณ 50-80 บาท และถ้านำไปขายที่โรงไฟฟ้า (รวมค่าขนส่ง) จะอยู่ประมาณ 100-250 บาท แสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งจากภาพรวมของการสำรวจข้อมูลพบว่าทางผู้ประกอบการโรงสับไม้ยูคาลิปตัสมีความสนใจที่ต้องการให้มีการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสก่อนที่จะออกจำหน่ายเพื่อเพิ่มมูลค่าเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ประกอบการ



รูปที่ 4.1 จำนวนโรงงานสับไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 ผลการสำรวจแบบสอบถามโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือปี 2554

สัดส่วนเปลือกไม้ต่อเนื้อไม้	ปริมาณเปลือกไม้ทั้งหมด (ตันต่อปี)	ราคา (บาท)	สัดส่วนการจัดการ (%)		สัดส่วนลักษณะเปลือกไม้ของโรงงาน (%)		สัดส่วนการใช้ประโยชน์ (%)		
			ขายบริษัทใช้เชื้อเพลิงและเกษตรกร	ไม่เคยขาย	ชิ้น	ชิ้นและฝอย	เชื้อเพลิง	ปุ๋ย	ไม่ใช้ประโยชน์
20.5:79.5	1,043,940.36	50 –80[1] 100 -250[2]	49.82	50.18	68.6	31.4	49.82	0.1	50.08

[1] ราคาขายหน้าโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัส

[2] ราคาขายให้กับโรงงานผลิตไฟฟ้า (รวมค่าขนส่ง)

รูปที่ 4.2 โรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสของในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แบบชิ้น แบบฝอย

รูปที่ 4.3 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ผลิตปุ๋ย กองทิ้งไว้ไม่ใช้ประโยชน์

รูปที่ 4.4 การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ(ขนาด ความหนาแน่นและความชื้น)

เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้ออกมาจากโรงงานแปรรูปจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบชิ้นและแบบฝอยแสดงดังรูปที่ 4.3ซึ่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของแต่ละโรงงานจะมีลักษณะเป็นชิ้นหรือเป็นฝอยจะมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากลักษณะของชิ้นไม้ยูคาลิปตัสที่มีขนาดใหญ่จะทำให้ความหนาแน่นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสน้อยส่วนเปลือกไม้ที่มีลักษณะเป็นฝอยจะมีความหนาแน่นมากกว่า ซึ่งโดยรวมก็ยังมีค่าความหนาแน่นน้อย (Bulk Density) เมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมี

ความชื้นค่อนข้างสูงคือ 59.63-62.97% ค่าความหนาแน่นของเปลือกไม้ชิ้น 127.45kg /m^{3}และแบบฝอย 215.4 kg /m^{3}ดังตารางที่ 4.2 จึงทำให้ไม่คุ้มค่าในการขนส่งเพื่อจำหน่ายกับโรงงานที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

รูปที่ 4.5 การเก็บข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ตารางที่ 4.2สมบัติทางกายภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ลักษณะเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ความชื้น (%wb)	ความหนาแน่น (kg /m^3)	ลักษณะทั่วไป
ชิ้นจากต้น	65.9	-	หนา 4-6 มม.
ชิ้น	59.53	127.45	ยาว 20-40 ซม. หนา 4-7 มม.
ฝอย	62.97	215.40	เส้นใย

4.1.2 องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Value)

จากการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าปริมาณสารระเหยที่มีในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าเฉลี่ย 69.23%มีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดอื่นๆ เช่น ฟางข้าว, ยอดและใบอ้อย, เหง้ามันสำปะหลัง และทะลายปาล์ม มีค่า 77.09, 81.38, 80.0 และ 76% ตามลำดับ แต่ปริมาณคาร์บอนคงตัวของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าเฉลี่ย 21.61% ซึ่งสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้น มีค่า 12.24, 8.57, 13.00 และ 4.07% ตามลำดับ แต่ปริมาณเถ้าอยู่ในเกณฑ์สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้น มีค่า 2.73-4.76 จากงานวิจัยของ วรพจน์ ขำพิศ และคณะ(2553)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง		งานวิจัยนี้	อ้างอิง[1)]	อ้างอิง[2)]
ร้อยละของความชื้นเริ่มต้น(Wet basis)		47.65	-	-
องค์ประกอบแบบประมาณ (Dry basis)	ร้อยละของสารระเหย (%VM)	69.23	78.00	65.70
	ร้อยละของเถ้า (%Ash)	9.17	4.80	19.00
	ร้อยละของคาร์บอนคงตัว(%FC)	21.61	17.20	15.30
องค์ประกอบแบบละเอียด (Dry basis)	ร้อยละของคาร์บอน (%C)	39.13	48.70	43.68
	ร้อยละของไฮโดรเจน (%H)	3.91	5.70	8.14
	ร้อยละของไนโตรเจน (%N)	0.53	0.30	0.43
	ร้อยละของซัลเฟอร์(%S)	0.41	0.05	-
	ร้อยละของออกซิเจน (%O)	46.85	45.3	47.75
ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)		16,533	-	-
ร้อยละของคลอรีน(Dry basis)		0.98	0.26	-

หมายเหตุ [1)]จากงานวิจัย ของ Vassilev, S.V., et al.(2010)

[2)]จากงานวิจัย ของ Sarin, V., and Pant, K.K. (2006)

4.1.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยใช้เครื่อง Carbon, Hydrogen, Nitrogen and Sulfur Analyzer; CHNS-932พบว่า ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์และออกซิเจน มีค่าเฉลี่ย 39.13%, 3.91%, 0.53%, 0.41% และ 46.85% ตามลำดับแสดงดังตารางที่ 4.3ทั้งนี้ธาตุองค์ประกอบที่สำคัญ และมีผลต่อค่าความร้อนโดยเฉพาะปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจน เนื่องจากคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วเกิดเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานในกระบวนการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ถ้ามีปริมาณไฮโดรเจนมาก ในปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ จะเกิดน้ำมากเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำส่วนนี้ดูดซับพลังงานไว้บางส่วน พลังงานที่ระบบปลดปล่อยออกมาจึงลดลง

4.1.4 ค่าความร้อน (Heating Value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง แสดงถึงปริมาณพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาขณะเผาไหม้เชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนักในรูปของความร้อน ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยพบว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการเปลี่ยนคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงชีวมวลไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับและสมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้มีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของชีวมวลแต่ละชนิดSenelwa, K., and Sims, R.E.H. (1999)สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Demirbas, A. (2007) ซึ่งได้ทำการศึกษากับวัสดุชีวมวลถึง 16 ชนิด และ Demirbas, A. (2007) ทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความชื้น กับค่าความร้อน พบว่าค่าความชื้นในวัสดุชีวมวลเป็นผลทำให้ค่าความร้อนลดลง เพราะความชื้นในเชื้อเพลิงชีวมวลจะอยู่ระหว่างช่องว่างในเซลล์ที่ตาย และผนังเซลล์ เมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลถูกเผาไหม้ความชื้นจะเป็นตัวดูดซับความร้อนบางส่วน ทำให้พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาลดลง

4.1.5 ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ (High and Low Heating Value; HHV and LHV)

นิยามของค่าความร้อนสูง (High Heating Value; HHV) หมายถึงพลังงานความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบสมบูรณ์ (Gross Calorific Value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C และผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 25°C ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่รวมถึงพลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (Latent Heat of Vaporization) ซึ่งจากการศึกษาค่าความร้อนสูงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า ค่าความร้อนสูงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าเฉลี่ย 16,533 kJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เช่น ฟางข้าว, ยอดและใบอ้อย, เหง้ามันสำปะหลัง และ ทะลายปาล์ม มีค่าความร้อนสูงที่ 17,844, 19,881, 14,591 และ 20,938 kJ/kg ตามลำดับ จากงานวิจัย วรพจน์ ขำพิศ และคณะ(2553) เมื่อเปรียบเทียบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่า ค่าความร้อนสูงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากปริมาณคาร์บอนในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆที่เปรียบเทียบข้างต้น ซึ่งในการพิจารณาความเป็นเชื้อเพลิงจำเป็นต้องพิจารณาค่าความร้อนต่ำต่อไป

ส่วนค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value; LHV) หมายถึงพลังงานความร้อนสุทธิที่ปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (Net Calorific Value) โดยเริ่มจากเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิ 25°C และผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีอุณหภูมิ 150°C ซึ่งไม่รวมถึงพลังงานที่ได้จากการควบแน่น (Condensate) ไอน้ำมาใช้งาน โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำและค่าความร้อนสูงแสดงไว้เป็นสมการที่ (4.1)

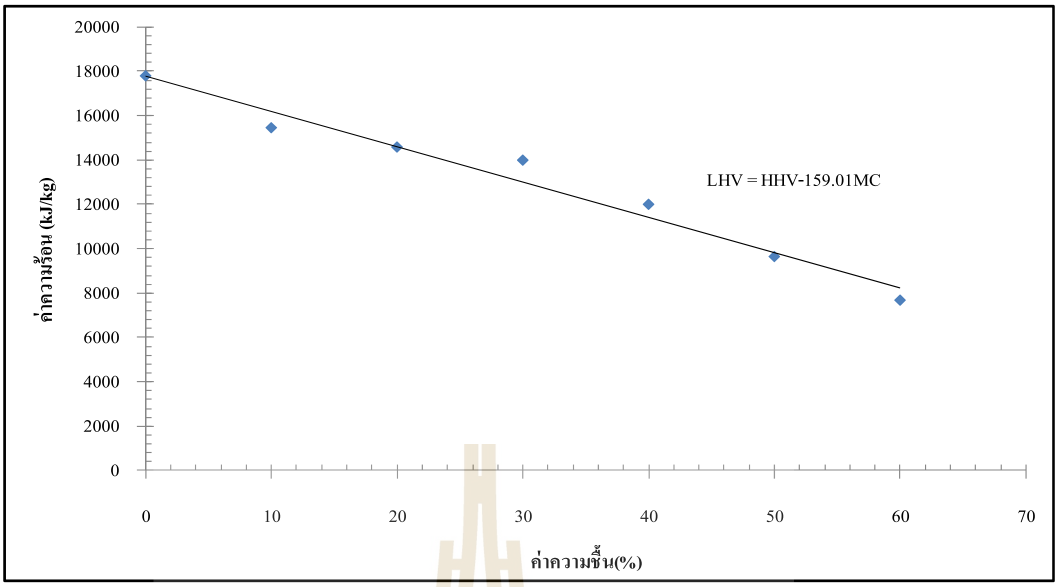
$$LHV(kJ/kg) = HHV(kJ/kg) - 23.95(9H + MC) \tag{4.1}$$

เมื่อ H และ MC เป็นค่าของไฮโดรเจน(%) และ ความชื้น(%wb) ตามลำดับ

จากนิยามของค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำข้างต้น เราสามารถหาค่าดังกล่าวได้ โดยใช้ เครื่อง Bomb Calorimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดมาตรฐานที่ใช้สำหรับการหาค่าความร้อน ภายใต้สภาวะที่เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ตามมาตรฐาน ASTM D2015 โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแห้ง (ความชื้น 0%) ถือได้ว่าเป็นค่าความร้อนสูงส่วนค่าความร้อนที่วัดได้เมื่อเชื้อเพลิงมีค่าความชื้นต่างๆ จากเครื่อง Bomb Calorimeter จะเป็นค่าความร้อนต่ำ

จากงานวิจัยของ สาวิตรี คำหอม และ วีรชัย อาจหาญ (2551) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำกับค่าความร้อนสูงและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยทำการวิเคราะห์หาค่าความร้อนต่ำของตัวอย่าง ที่ความชื้นต่างๆ ดังแสดงไว้ในกราฟ รูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถนำมาทำเป็นสมการที่ 4.2จากความสัมพันธ์ของค่าความร้อนและปริมาณความชื้น เมื่อพิจารณาผลการสำรวจเปลือกไม้ยูคาลิปตัสความสัมพันธ์ของค่าความร้อนสูงกับความชื้น ดังสมการที่ 4.2 พบว่าค่าความร้อนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่า 8,956kJ/kg ที่ความชื้นเฉลี่ย 47.65 %wb และค่าความร้อนสูงเฉลี่ย 16,533 kJ/kg ดังภาคผนวก ค 1 และจากการสำรวจพบว่าความชื้นสูงสุดคือ 67.13 %wb

$$LHV(kJ/kg) = HHV(kJ/kg) - (159.01 \text{ x } MC(\%wb)) \tag{4.2}$$

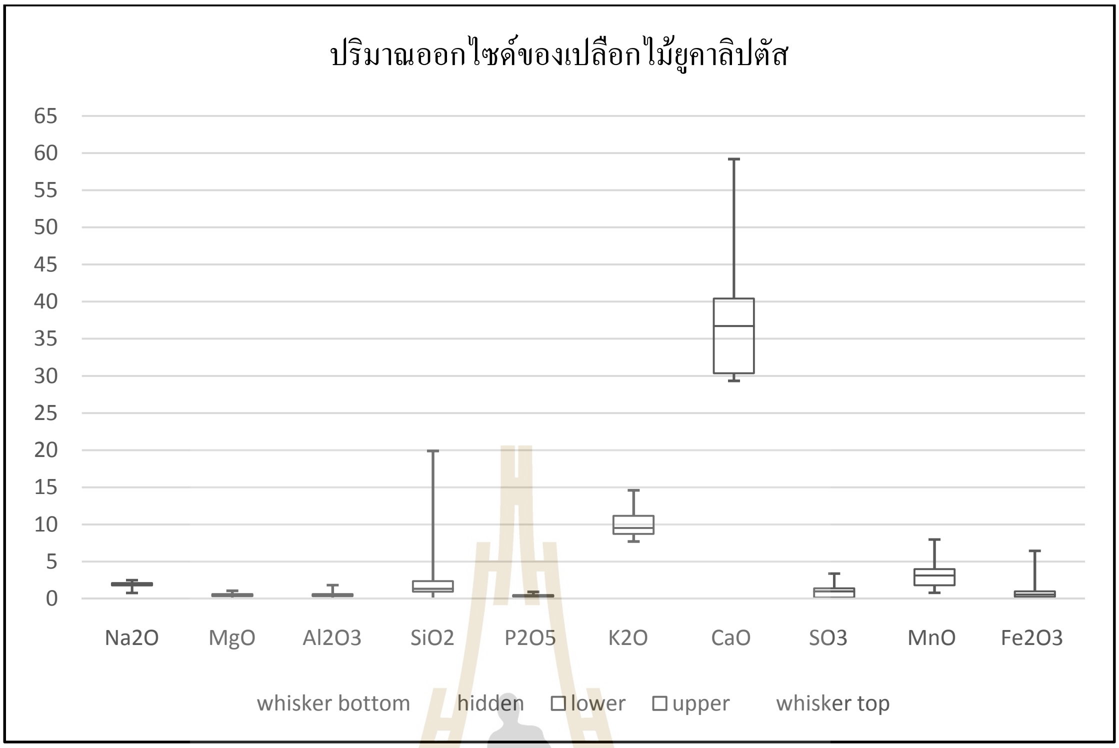


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ

ที่มา: สาวิตรี คำหอมและวีรชัย อาจหาญ (2551)

4.1.6 การศึกษาองค์ประกอบเคมีในรูปของออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ผลการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเถ้าด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ในรูปออกไซด์ ดังรูปที่ 4.7 เพื่อนำไปประเมินผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่น การเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนเป็นต้น โดยผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Vassilev, S.V.,et al.(2010) ดังตารางที่ 4.4 พบว่าออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์(CaO) สูงเช่นเดียวกัน คือ 62.66% และ 57.74% ตามลำดับและ โพแทสเซียมออกไซด์(K_2O)17.09% และ 9.29% ตามลำดับซึ่งออกไซด์ทั้งสองชนิดนี้มีฤทธิ์เป็นด่าง โดยเฉพาะปริมาณ โพแทสเซียมออกไซด์(K_2O)จะเป็นสาเหตุให้เกิดการจับตัวและการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนได้ง่ายส่วนปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) พบว่าสูงกว่างานวิจัยของVassilev, S.V.,et al.(2010)เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำการสำรวจในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้รับอิทธิพลจากพื้นที่เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะประสพปัญหาพื้นที่ดินเค็ม ทำให้มีการสะสมเกลือในพืชส่วนปริมาณของซิลิคอนออกไซด์จะขึ้นอยู่ประมาณสารที่เจือปน เช่น ดิน และทราย เนื่องจากการจัดเก็บเปลือกไม้ยูคาลิปตัสบนดินซึ่งบ้างที่จะมีปริมาณสูงมาก โดยผลของแมกนีเซียมออกไซด์จะมีความแตกต่างจากงานวิจัย Vassilev, S.V.,et al.(2010) เนื่องจากยูคาลิปตัสสามารถรับธาตุอาหารรองแมกนีเซียมจากดินได้มาก ทำให้มีการสะสมในพืชส่งผลให้ปริมาณแมกนีเซียมมีความแตกต่าง



รูปที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส จากการสำรวจภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในรูปออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเปรียบเทียบกับงานวิจัยของVassilev, S.V.,et al.(2010)

	%wt									
องค์ประกอบ	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	CaO	Na_2O	P_2O_5	SO_3
งานวิจัยนี้	4.62	0.93	2.05	17.09	0.53	0.86	62.66	3.28	0.73	1.85
Stanislav V. Vassilev[1)]	10.04	3.1	1.12	9.29	0.12	10.91	57.74	1.86	2.35	3.47

หมายเหตุ [1)]งานวิจัยของ Vassilev, S.V.,et al.(2010)

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ดังตารางที่ 4.4 สามารถทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิดตะกรันแลการจับตัวเป็นก้อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1) พารามิเตอร์AI (Alkali Index)มีค่า AI >0.34 จะมีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนสูง

2) พารามิเตอร์ BAI (Bed Agglomeration Index) มีค่า 0.1 ซึ่งน้อยกว่า 0.15 Bed แนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน

3) พารามิเตอร์ $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) มีค่า 15.02 ซึ่งมีค่ามากกว่า 2.6 แนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนสูง

4) พารามิเตอร์ Rs มีค่า 6.16 ซึ่งมีค่ามากกว่า 2.6 แนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนสูงและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ $R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีค่า 4.97 ซึ่งมีค่ามากกว่า 4.0 แนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย และมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ $R_{b/a}$ ในเชิงสนับสนุน

6) พารามิเตอร์ Rf จะพิจารณาค่าของ CaO+MgO เทียบกับ Fe_2O_3ถ้าน้อยกว่าจะคำนวณค่า Rf เนื่องจากผลการวิเคราะห์ออกไซด์ CaO+MgO เทียบกับ Fe_2O_3 มากกว่าจะพิจารณาแนวโน้มจากปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O) มีค่า 3.29 ซึ่งสูงกว่า 3% แนวโน้มการจับตัวที่ท่อจะมีในระดับ ต่ำถึงปานกลาง

7) พารามิเตอร์คลอรีน มีค่า 0.98 ซึ่งแนวโน้มการการจับตัวที่ท่อจะรุนแรงมากสนับสนุนกับพารามิเตอร์ Rf โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Vassilev, S.V.,et al.(2010) พบว่าค่าพารามิเตอร์ AI, BAI และ $R_{b/a}$ มีแนวโน้มเดียวกับผลการวิจัย ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าของพารามิเตอร์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำให้เกิด Slaggingและ Fouling

พารามิเตอร์	AI	BAI	$R_{b/a}$	Rs	Silica/Alumina Ratio	Rf	Cl	Na_2O
งานวิจัยนี้	1.13	0.10	15.02	6.16	4.97	-	0.98	3.29
Stanislav V. Vassilev[1]	7.16	0.10	6.10	0.305	3.24	0.11	0.26	1.86
แนวโน้มเกิด Slagging และ Fouling[2]	>0.34	<0.15	>2.6	>2.6	>4.0	>0.2	>=0.3	>=3.0

หมายเหตุ [1]งานวิจัยของ Vassilev, S.V.,et al.(2010)

[2]ประเสริฐ ชุมรุม และคณะ (2554)

4.2 การเตรียมเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

การเตรียมเชื้อเพลิงจะนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการสับหยาบจากโรงงานมาลดความชื้น โดยการตากและเข้าเครื่องสับย่อยแบบ Hammer Mill ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชุดใบมีด 500mm ชุดใบมีดมี 4 แถว แต่ละแถวมีใบมีดจำนวน 5 ใบ ใช้มอเตอร์ต้นกำลังขนาด 30kW(40 Hp) ผ่านชุดถ่ายทอดกำลังและทดความเร็วรอบให้เป็น 2400 รอบ/นาที ให้มีลักษณะเป็นเส้นใยฝอยขนาดเล็ก ซึ่งมีความหนาแน่นกองวัสดุ(Bulk Density) เท่ากับ 110kg/m^3 ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ต่อจากนั้นต้องเอาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่บดมาตากแห้งและนำไปอัดแท่งต่อไป ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งใช้เครื่องอัดแท่งชีวมวล (Pelletizing Machine) รุ่น TPM 520-138 ใช้หลักการกดอัดวัสดุผ่านรูอัดขนาดเล็กทำให้ได้เป็นเม็ดวัสดุ โดยเครื่องอัดแท่งชีวมวลนี้มีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขนาด 200kW และมีขนาดของรูอัดเท่ากับ 8mm การเตรียมโดยนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการทำแห้ง และสับย่อยให้มีขนาดเล็กลง และความชื้นประมาณ 15%wb มาเทลงในสายพานลำเลียงเพื่อลำเลียงเปลือกไม้ยูคาฯสับขึ้นไปยัง Hopper ของเครื่องอัดแท่ง จากนั้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะถูกชุดสกรูของเครื่องอัดแท่งลำเลียงส่งต่อไปยังชุดอัดแท่งต่อไป รูปที่ 4.10 แสดงวิธีการอัดแท่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส สมรรถนะในการอัดแท่งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีค่าประมาณ 2 ตัน/ชั่วโมง และความหนาแน่นกองวัสดุ (Bulk Density) เท่ากับ 715 kg/m^3 และมีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 11-13% w.b. มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 100.5kWh/ton รูปที่ 4.11 แสดงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการอัดแท่งแล้ว

รูปที่ 4.8 แสดงกระบวนการสับย่อยด้วยเครื่อง Hammer Mill

รูปที่ 4.9 แสดงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสก่อนและหลังการสับด้วยเครื่อง Hammer Mill

รูปที่ 4.10 แสดงวิธีการอัดเม็ดเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

รูปที่ 4.11 แสดงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการอัดเม็ดแล้ว

4.3 ผลทดสอบการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง กับระบบความร้อนระดับเครื่องต้นแบบ (Pilot scale)

4.3.1 การทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับสารเติมแต่งในหม้อต้มไอน้ำโดยเทคโนโลยีการเผาไหม้โดยตรง

การทดสอบการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งโดยการผลิตความร้อนและไอน้ำ จะใช้เตาเผาและชุดกำเนิดไอน้ำชนิดท่อน้ำซึ่งเป็นระบบผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของชีวมวลเพื่อผลิตไอน้ำ ได้ถูกออกแบบเพื่อผลิตไอน้ำที่มีสภาวะสูงสุด 22 บาร์ หรือกำลังการผลิตไอน้ำได้สูงสุด 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง มีระบบควบคุมน้ำป้อนเป็นแบบอัตโนมัติ มีระบบการควบคุมความปลอดภัยแบบอัตโนมัติซึ่งจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งสามารถทำความดันได้สูงสุด 13 บาร์

4.3.1.1 การทดสอบสมรรถนะของการผลิตไอน้ำ

ในการทดสอบสมถรรถนะของการผลิตพลังงานความร้อน สำหรับผลิตไอน้ำสำหรับเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสนั้น จะทำการศึกษาอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ(Thermal Efficiency %) ที่หาได้จาก ค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำสภาวะไอน้ำอิ่มตัวที่ได้รับเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยในการทดสอบได้หาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

อัดแท่งต่อปริมาณของไอน้ำที่สามารถผลิตได้กำหนดให้รักษาความดันในหม้อต้มที่ 10-12 บาร์ ดังรูปที่ 4.12 และเก็บข้อมูลอัตราการสิ้นเปลือกเชื้อเพลิง โดยปล่อยไอน้ำผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลดังรูปที่ 4.13 และบันทึกข้อมูลการผลิตไอน้ำ ความดันในหม้อไอน้ำ และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยขั้นตอนกระบวนการทดสอบหม้อต้มไอน้ำแสดงดังรูปที่ 4.14

รูปที่ 4.12 เกจวัดแสดงแรงความดันในหม้อต้มไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.13 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลไอน้ำ

รูปที่ 4.14 ไอน้ำที่ผลิตได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.15 กระบวนการทดสอบหม้อต้มไอน้ำ

ผลการศึกษาการผลิตไอน้ำด้วยเชื้อเพลิงอัดแท่ง และผสมสารเติมแต่ง โดยการทดสอบเบื้องต้นหม้อต้มไอน้ำสามารถทำความดันได้เพียง 10-13 บาร์ จึงกำหนดให้ควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงให้รักษาความดันไว้ที่ 10-12 บาร์ ต่อเนื่อง พบว่า เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งสามารถผลิตไอน้ำได้ 409.2kg-steam/hr โดยเมื่อผสมดินขาวกับเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในอัตรา 5, 10และ 12% โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการผลิตไอน้ำมีค่า 377.4, 366.3 และ 447.4 kg-steam/hr ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.6 โดยการใช้อัตราผสมดินขาว 12% ต้องใช้แรงงานในการช่วยงัดเตาเมื่อเวลาเถ้าใต้เตาหลอมและปิดช่องลม ทำให้ความดันของไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงผสมดินขาว 12% ไม่สามารถทำความดันได้ถึง 10-12 บาร์ ทำได้เพียงเฉลี่ย 7.4 บาร์ ซึ่งจะส่งผลต่อการนำไอน้ำไปใช้งานโดยประสิทธิภาพของหม้อต้มที่ใช้เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% และผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก มีค่า 53.61, 48.5, 39.2 และ 48.5% ตามลำดับ โดยผลของตะกรันที่เกาะท่อความยาวท่อ 1 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว (60 มิลลิเมตร)พื้นที่ผิวท่อทดสอบมีค่า 942.5 ตารางเซนติเมตร มีค่า 283.3, 115.7, 64.0 และ 53.3 g/m^2-hr ที่จะมีแนวโน้มของปริมาณตะกรันเกาะท่อลดลงตามปริมาณดินขาวตามลำดับ ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของTheis, M.,et al. (2006) ศึกษาปริมาณตะกรันที่สะสมผิวท่อของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและฟางข้าวโอ๊ตจะมีอัตรา 80 และ 160 g/m^2-hr ตามลำดับ พบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจากแหล่งวัตถุดิบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีปริมาณตะกรันสูงกว่างานวิจัยของ Theis, M., et al.(2006) 2.5 เท่า และเมื่อนำเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 5% อัตราการเกิดตะกรันสามารถลดลงจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 59.2% แต่ปริมาณอัตราการเกิดตะกรันยังสูงอยู่ และเมื่อนำเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 10% อัตราการเกิดตะกรันสามารถลดลงจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 77.4% โดยที่เมื่อนำเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 12% หม้อไอน้ำจะประสบปัญหาเรื่องอุณหภูมิภายในเตาส่งผลต่อการผลิตไอน้ำได้ความดันต่ำลง ดังตารางที่ 4.6

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของรายงานการวิจัยเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชนโดยใช้พลังงานจากไม้โตเร็ว, 2551 ซึ่งได้ทดสอบเครื่องกำเนิดไอน้ำเครื่องนี้ โดยใช้ไม้โตเร็ว คือไม้กระถินยักษ์ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า เครื่องกำเนิดไอน้ำดังกล่าว สามารถผลิตไอน้ำได้ 530 kg/hr ที่ความดันของไอน้ำเท่ากับ 22 บาร์ โดยไอน้ำมีสภาวะเป็นไอดง (Superheat steam) คือมีอุณหภูมิประมาณ 218°C โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์เท่ากับ 150 kg/hr โดยเชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์มีค่าความร้อนเท่ากับ 12,000 kJ/kg (ที่ความชื้นไม่เกิน 15 % w.b)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบสมรรถนะของการผลิตไอน้ำและประสิทธิภาพของ Boiler

ตัวอย่าง	เอทาลปีของน้ำ (KJ/kg)	อุณหภูมิไอน้ำ (ºC)	เอทาลปีของไอน้ำ (KJ/kg)	แรงดันไอน้ำ (Bar)	ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ (kg/hr)	อัตราเชื้อเพลิง (kg/hr)	ประสิทธิภาพ Boiler (%)
เปลือกยูคาฯอัดแท่ง	410.61	186.7	2783.5	11.7	409.2	128	53.6
ผสม kaolin 5%	402.18	185.5	2782.7	11.4	377.4	131	48.5
ผสม kaolin 10%	402.18	181.9	2779.8	10.5	366.3	157	39.2
ผสมkaolin 12%	389.34	167	2765.5	7.4	447.4	155	48.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบปริมาณตะกรันที่เกาะท่อ

Example	ตะกรันเกาะท่อ (g/m^2-hr)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	ปริมาณเถ้า(bottom ash) (%)		
			ผง	จับตัวเป็นก้อน	รวม
เปลือกยูคาอัดเม็ด	283.3	128	20.0	24.4	44.4
kaolin 5%	115.7	131	26.0	15.0	41.0
Kaolin 10%	64.0	157	22.4	13.6	36.0
Kaolin 12%	53.3	155	18.0	17.3	35.3

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเชื้อเพลิงโดยใช้เชื้อเพลิงไม้กระถินยักษ์กับ
เปลือกยูคาอัดแท่ง

รายการ	ผลการทดสอบ	อ้างอิง [1)]
แรงดัน	10-12 Bar	22 Bar
กำลังการผลิตไอน้ำ	409.2 kg/hr	530 kg/hr
อุณหภูมิไอน้ำ	186.7 ºC	218 ºC
สภาวะของไอน้ำ	Saturated vapor	Superheat steam
ประเภทของเชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ	เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง	ไม้กระถินยักษ์
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง	16,533 kJ/kg ที่ความชื้นไม่เกิน 15%	12,000 kJ/kg ที่ความชื้นไม่เกิน 15 %
อัตราการใช้เชื้อเพลิง	128 kg/hr	150 kg/hr

ที่มา [1)]ณัฐ วรยศ และคณะ, 2551

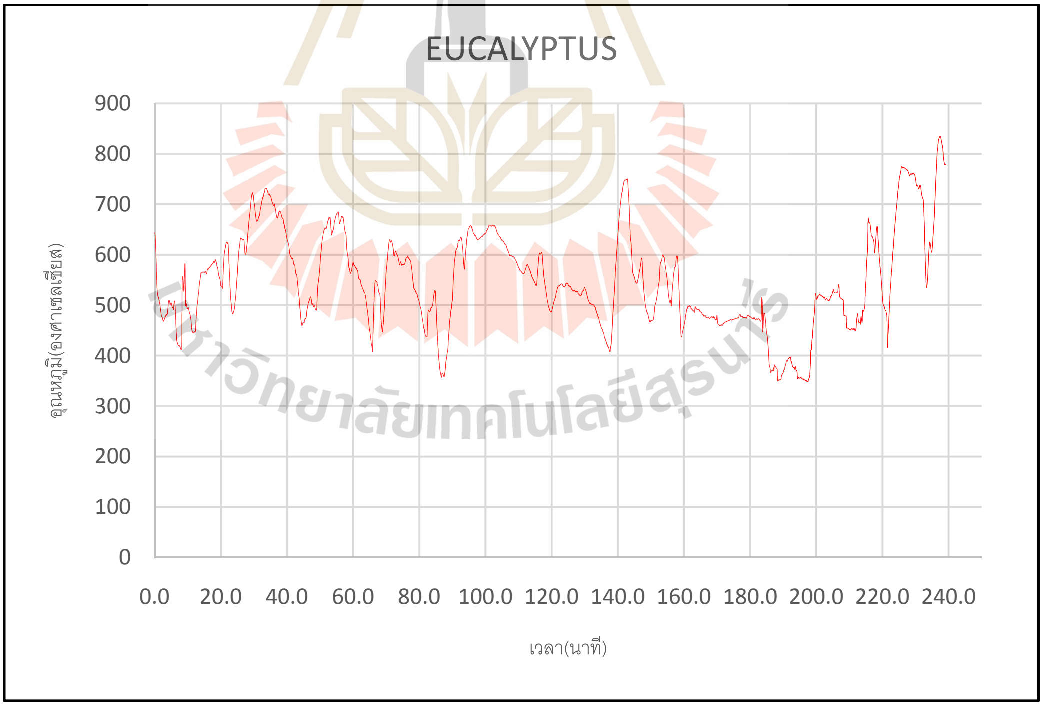
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4 การทดสอบอิทธิพลของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่ส่งผลต่อการกัดกร่อน การเกิดตะกรันเกาะท่อและเถ้าหลอม

การทดสอบได้สร้างอุปกรณ์จำลองลักษณะของท่อที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวท่อประมาณ 500°C เพื่อทำให้ไอของออกไซด์ของสารประกอบในเชื้อเพลิงเกิดการควบแน่นและเกิดสภาวะเป็นยางเหนียว ส่งผลต่อการจับตัวของเถ้าลอยโดยขั้นตอนการติดตั้งและการทดสอบแสดงดังหัวข้อ 3.4.2.2 ซึ่งจากการศึกษา พบว่าการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% หรือผสมสารเติมแต่งเข้าไปในเชื้อเพลิง ยังเกิดปัญหาเถ้าหลอมภายในห้องเผาไหม้ ดังรูปที่ 4.16เนื่องมาจากปริมาณของซิลิคอนออกไซด์ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาณสูงถึง 53.68-70.78% ดังภาคผนวก ง 2 ทำให้ปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก และการเกิดเถ้าหลอมภายในห้องเผาไหม้จะส่งผลต่อการป้อนอากาศอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ ตลอดจนส่งผลต่อการผลิตไอน้ำและความดันไอน้ำลดลง ส่วนปัญหาการเกิดตะกรันเกาะท่อและการกัดกร่อนท่อจะทำการวิเคราะห์จากอุปกรณ์วัดการเกิดตะกรันที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4.17(ซ้าย) โดยผลกระทบอื่นๆ จะทำการวิเคราะห์จากเถ้าหลังการเผาไหม้ ดังรูปที่ 4.17 (ขวา) และอุณหภูมิห้องเผาไหม้ซึ่งจากการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% อุณหภูมิห้องเผาไหม้จะมีค่าเฉลี่ย 549.13°C และลักษณะกราฟอุณหภูมิแสดงดังรูป 4.18ผลการเก็บตัวอย่างสิ่งสกปรกที่สะสมที่อุปกรณ์การวัดการเกิดตะกรัน ดังรูปที่ 4.19และการเก็บตัวอย่างจากเถ้าหนักและเถ้าลอยภายในเตาพบว่า

รูปที่ 4.16ลักษณะการเกิดของเถ้าหลอมภายในห้องเผาไหม้ (ซ้าย) การงัดเถ้าหลอมขึ้นเพื่อให้อากาศเข้าเผาไหม้ได้ตามปกติ (ขวา)

รูปที่ 4.17อุปกรณ์การเกาะเถ้าลอยภายนอกท่อที่ทำการทดสอบ(ซ้าย)
ลักษณะของเถ้าที่หลอมตัวภายในเตาของเถ้าหนัก(Bottom Ash)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

รูปที่ 4.19 ลักษณะของออกไซด์ของเถ้าทำปฏิกิริยาท่อไอน้ำ

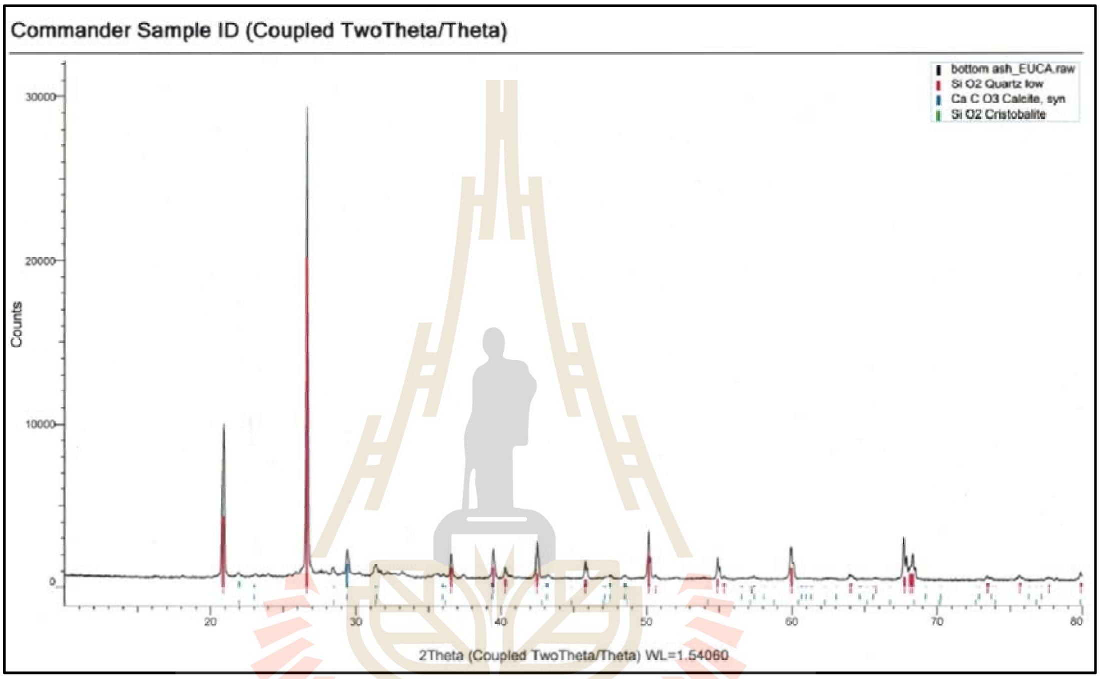
ผลการวิเคราะห์ของเถ้าหนัก(Bottom Ash) ซึ่งแยกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นผงและส่วนที่เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุใช้เครื่อง XRD ดังรูปที่ 4.19 พบว่า เถ้าหนักเป็นซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) ถ้าหมดกรณีที่จับตัวเป็นก้อน และมีเพียงบ้างส่วนของเถ้าที่เป็นผงมีแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ดังรูปที่ 4.20 และจากผลการวิเคราะห์เถ้าที่เป็นผงและจับตัวเป็นก้อนด้วยเครื่อง XRF ดังภาคผนวก ง พบว่า มีปริมาณซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) ในเถ้าที่เป็นผงและเป็นก้อนสูงถึง 56.527% และ 80.218% ตามลำดับ และมีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เท่ากับ 15.644% และ 6.47% ตามลำดับ ซึ่งการจำแนกของแร่ซิลิเกจ (Silicate) จะต้องมีส่วนประกอบแร่ซิลิกามากกว่า 1/3 ของแร่ทั้งหมด จึงสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าที่เกิดขึ้นเป็นแร่ซิลิเกจ และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า แร่ซิลิกาที่เกิดขึ้นเป็นชนิดของ Quartz และ Cristobalite ซึ่งแร่ทั้งสองชนิดนี้ จะมีอุณหภูมิเสถียรถึง 867ºCและที่อุณหภูมิ 1470-1713ºCตามลำดับ โดยทั้งสองชนิดมีลักษณะรูปแบบเดียวกันคือ จุดเปลี่ยนจากรูปแบบอุณหภูมิสูง(high) ไปสู่รูปแบบอุณหภูมิต่ำ (Low) คือ Quartz จุดเปลี่ยนจากรูปแบบอุณหภูมิสูงไปสู่รูปแบบอุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิ 573ºCที่ความดันบรรยากาศ และ High-Cristobalite เปลี่ยนเป็น Low-

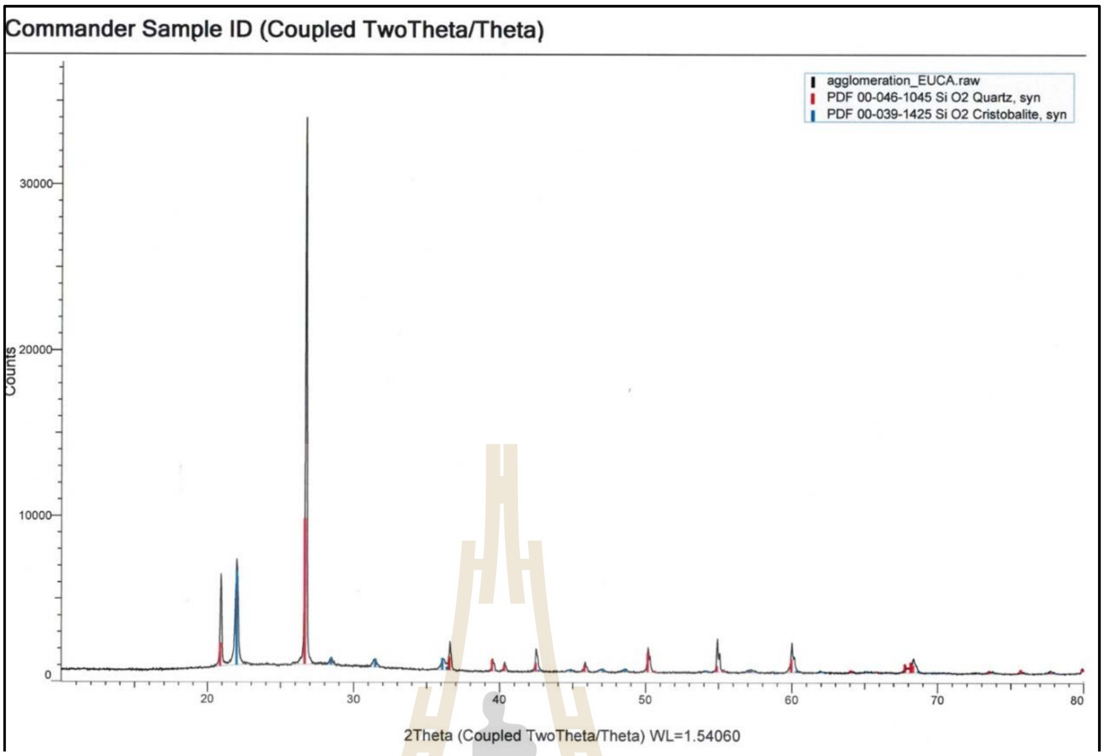
Cristobalite ระหว่างอุณหภูมิ200-275 ºC โดยในสภาวะอุณหภูมิปกติ Quartz จะอยู่ในรูปของ Low-Quartz เสมอ

ซึ่งจากปัญหาของเถ้าหลอมส่วนใหญ่ของถ่านหินจะเกิดจากซิลิคอนกับโพแทสเซียมทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้และเกิดเป็น eutectic compound ในเถ้าเป็นโพแทสเซียมซิลิเกท ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำประมาณ 700ºC โดยอุณหภูมิเผาไหม้ภายในเตาของเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งมีค่าเฉลี่ย 549.1ºC และบางครั้งมีอุณหภูมิสูงถึง 834.8ºC ดังรูปที่ 4.18 จะส่งผลทำให้องค์ประกอบของธาตุหลอมตัวและจับตัวเป็นก้อน ดังรูปที่ 4.21และเมื่อทำการชั่งน้ำหนักเถ้าที่เกิดการหลอมตัวกับเถ้าที่ไม่เกิดการหลอม พบว่า ปริมาณเถ้าที่หลอมตัวและจับตัวเป็นก้อนสูงถึง55% ของเถ้าทั้งหมด และอิทธิพลของการจับตัวเป็นก้อนแข็ง ส่งผลต่อการเผาไหม้ซึ่งอากาศจะไม่สามารถผ่านตะกรับขึ้นไปเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และประสิทธิภาพของการผลิตไอน้ำผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายขยายของเถ้าด้วยเครื่อง SEM พบว่าลักษณะของเถ้าหนักจะเกิดการหลอมตัว พบว่าซิลิกาดังรูปที่ 4.22 และจะจับตัวกับกลุ่มซิลิกาที่เกิดการหลอมตัวและเริ่มสะสมจับตัวกันเป็นก้อน รูปที่ 4.23 โดยบางส่วนของผงเถ้าหนักจะมีลักษณะเดียวกับเถ้าลอย ดังรูปที่ 4.24 เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกันแต่เป็นแร่ชนิดเดียวกันคือซิลิกา

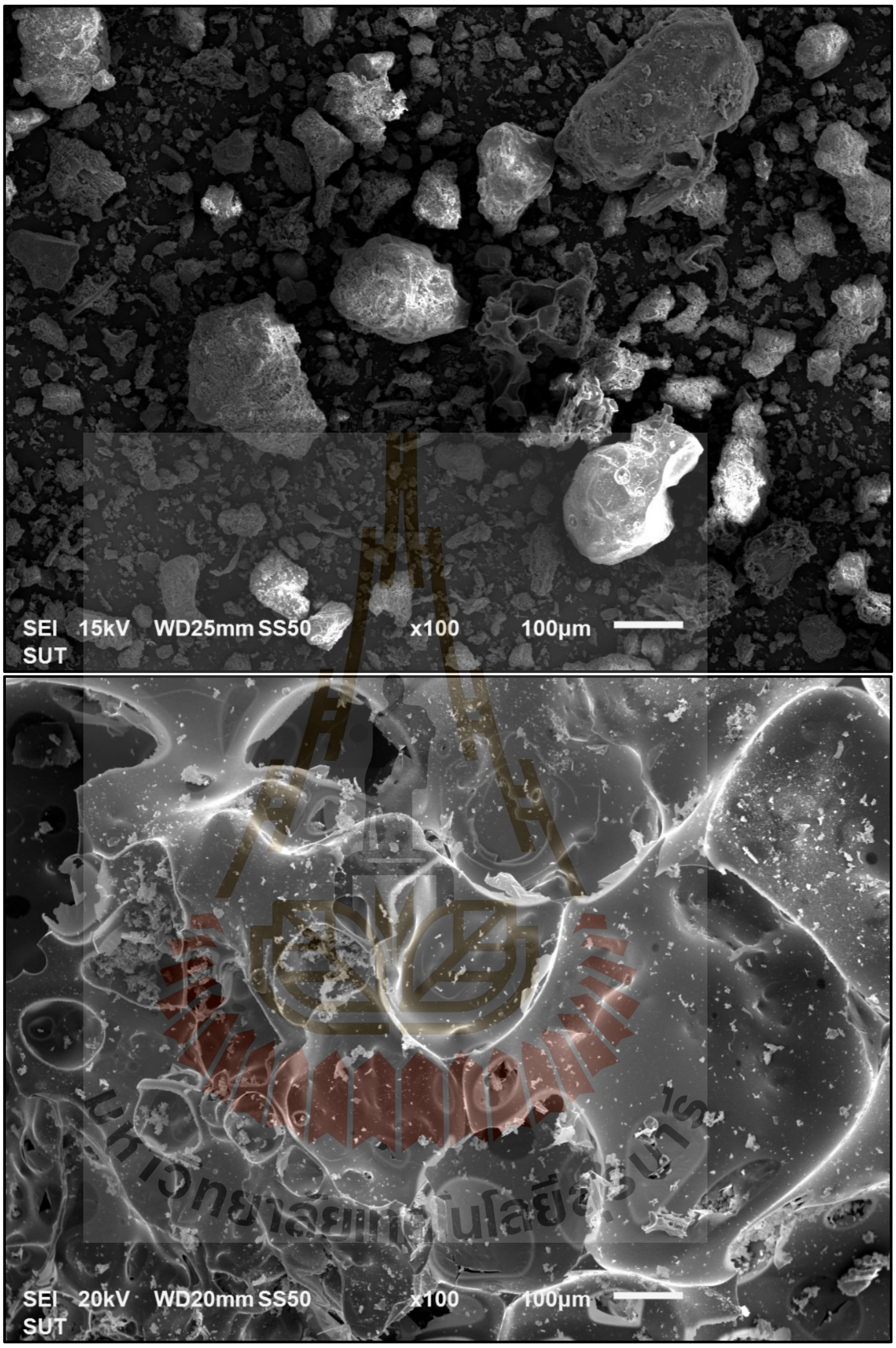
ผลการศึกษาของเถ้าลอยและการเกิดตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งจากเครื่องวิเคราะห์ออกไซด์ XRD และ XRF พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยจะมีซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อแยกองค์ประกอบของออกไซด์ทั้งหมดพบว่าปริมาณ SiO_2, CaO, SO_3, Al_2O_3, Cl, Fe_2O_3, MgO K_2O_5และอื่น ๆ มีค่าร้อยละ 43.648, 18.265, 9.793, 6.961, 5.592, 5.127, 4.739, 3.183, 2.692 ตามลำดับ ดังภาคผนวก ง 2 ซึ่งออกไซด์ในเถ้าลอยจะส่งผลต่อตะกรันที่กัดกร่อนท่อ ดังรูปที่ 4-19 ซึ่งเมื่อนำเถ้าที่เกาะท่อมาวิเคราะห์ออกไซด์ พบว่า มีการกัดกร่อนสูงเนื่องจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ด้วยเครื่อง XRD ออกไซด์ส่วนใหญ่เป็นเฟอริคออกไซด์ (Fe_2O_3) และซิลิคอนออกไซด์(SiO_2) ดังรูปที่ 4.27 และเมื่อนำตะกรันเกาะท่อไปวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเครื่อง XRF เพื่อหาปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้น ปริมาณ Fe_2O_3, SiO_2, Al_2O_3, K_2O_5และอื่นๆ มีค่าร้อยละ 82.933, 10.986, 1.693, 1.342, 3.046 ตามลำดับ ดังภาคผนวก ง 2 ซึ่งการกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ผิวท่อสูงเกินกว่า 450-500ºCและไอระเหยที่มาในรูปของออกไซด์ของสารประกอบเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาทำให้เกิดออกไซด์ของเหล็กและก๊าซที่เป็นคลอไรด์ เช่น Cl_2และ HCl โดยตะกรันที่เกาะผิวท่อจะกัดกร่อนท่อที่ด้านล่างที่อุณหภูมิหลอมเหลวของ KCl โดยจุดที่หลอมเหลวผสม(eutectic) ก็จะต่ำลง ถ้ามีสารประกอบที่มีฤทธิ์เป็นด่างเข้าผสมอุณหภูมิจุดหลอมเหลวและจุด eutectic จะต่ำลงเช่นเดียวกันดังตารางที่ 2-1 โดยตะกรันเถ้าลอยของ KCl-$FeCl_2$ หรือ NaCl-$FeCl_2$ ที่เกาะท่อจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 340-390 ºCจะทำให้ eutectic ต่ำลง บริเวณผิวท่อจะเกิดการควบแน่นและทำปฏิกิริยากับผิวท่อและทำการกัดกร่อน และในสภาวะที่ HCl เป็นก๊าซจะแพร่เข้าสู่ผิวท่อและทำปฏิกิริยากับผิวท่อเช่นเดียวกัน ซึ่งเถ้าที่เกาะท่อเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อหาค่าส่วนประกอบธาตุซึ่งจะสามารถบอกอิทธิพลของการกัดกร่อนจากคลอไรด์ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งพบว่า การใช้เปลือกไม้ยูคา

ลิปตัสอัดแท่งการกัดกร่อนที่ผิวท่อจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง ซึ่งเป็นตามการวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดตะกรันและการกัดกร่อน

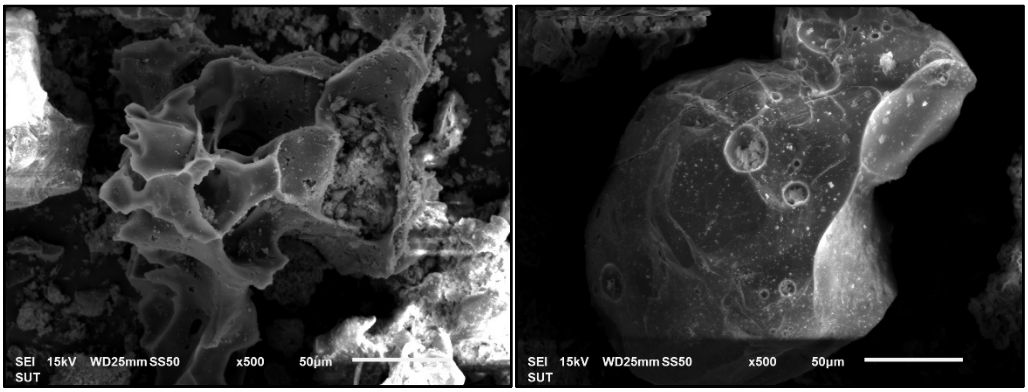




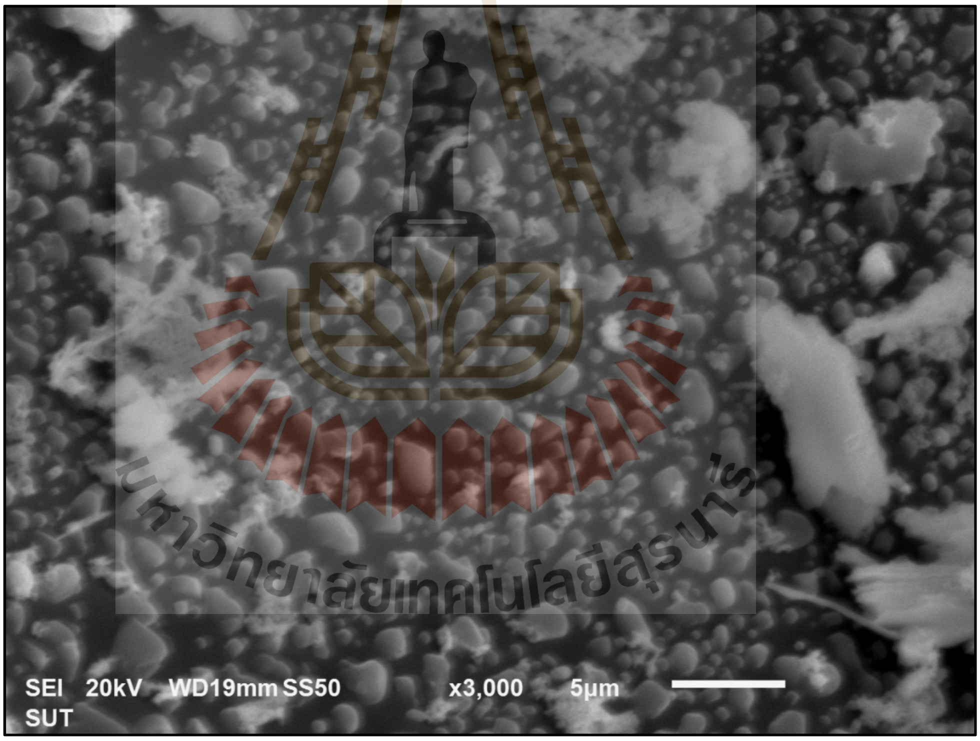
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ค่าด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาอัดแท่ง (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง(ล่าง)



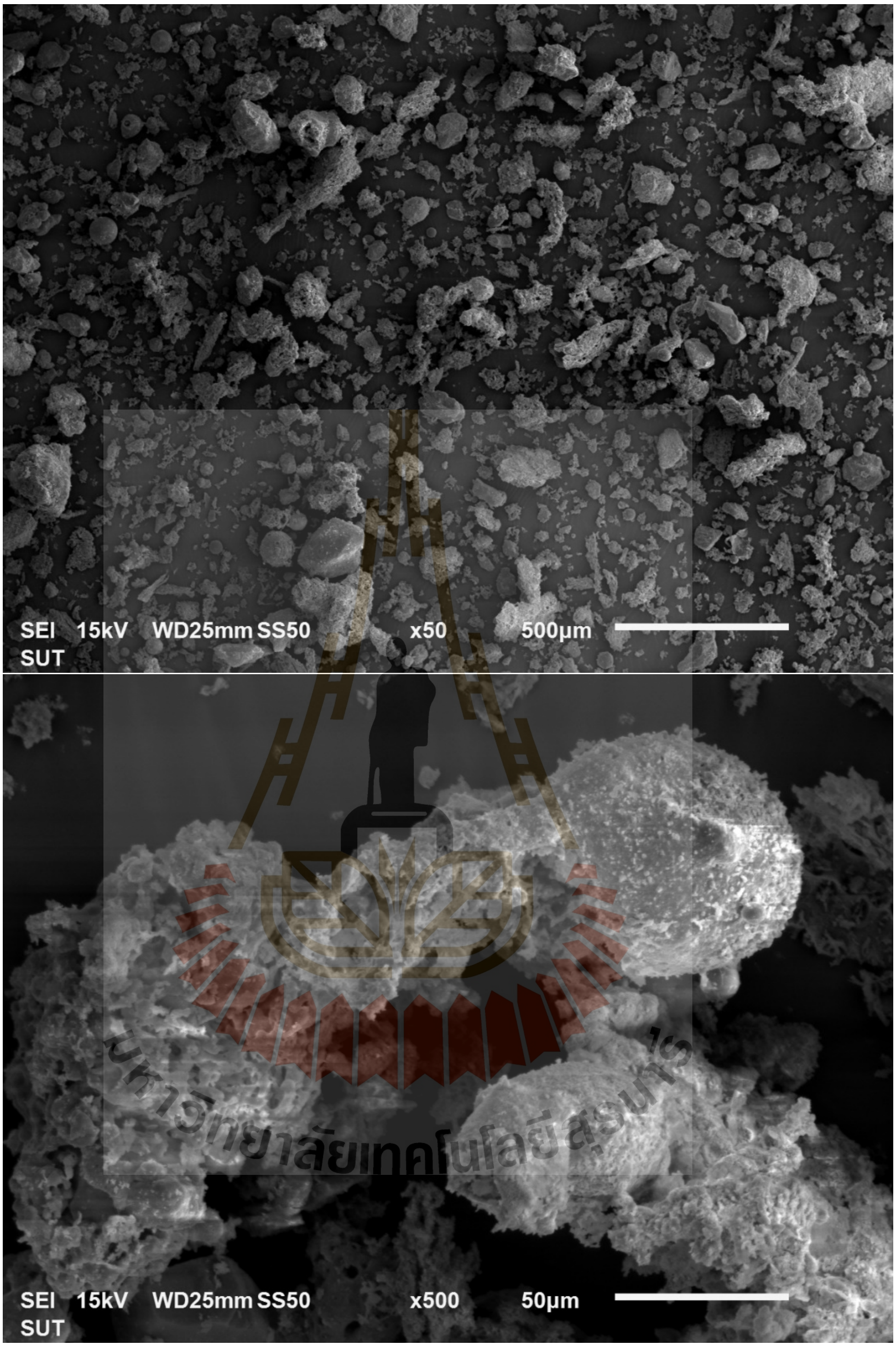
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง (บน) และ ของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง)



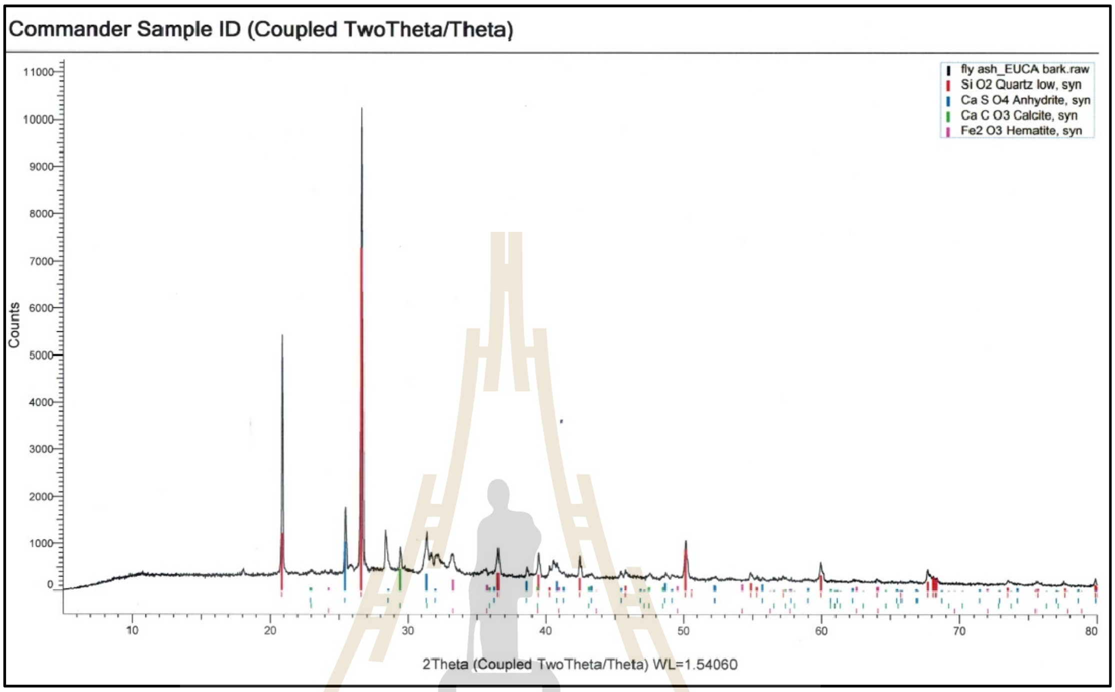
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ที่เป็นลักษณะเถ้า (ซ้าย) และ ของเถ้าที่ลักษณะเป็นก้อนซิลิกา (ขวา)



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของผิวของเถ้าที่จับตัวเป็นก้อน โดยจะหลอมตัวและขณะที่หลอมจะจับตัวเถ้าและก่อตัวเป็นก้อน

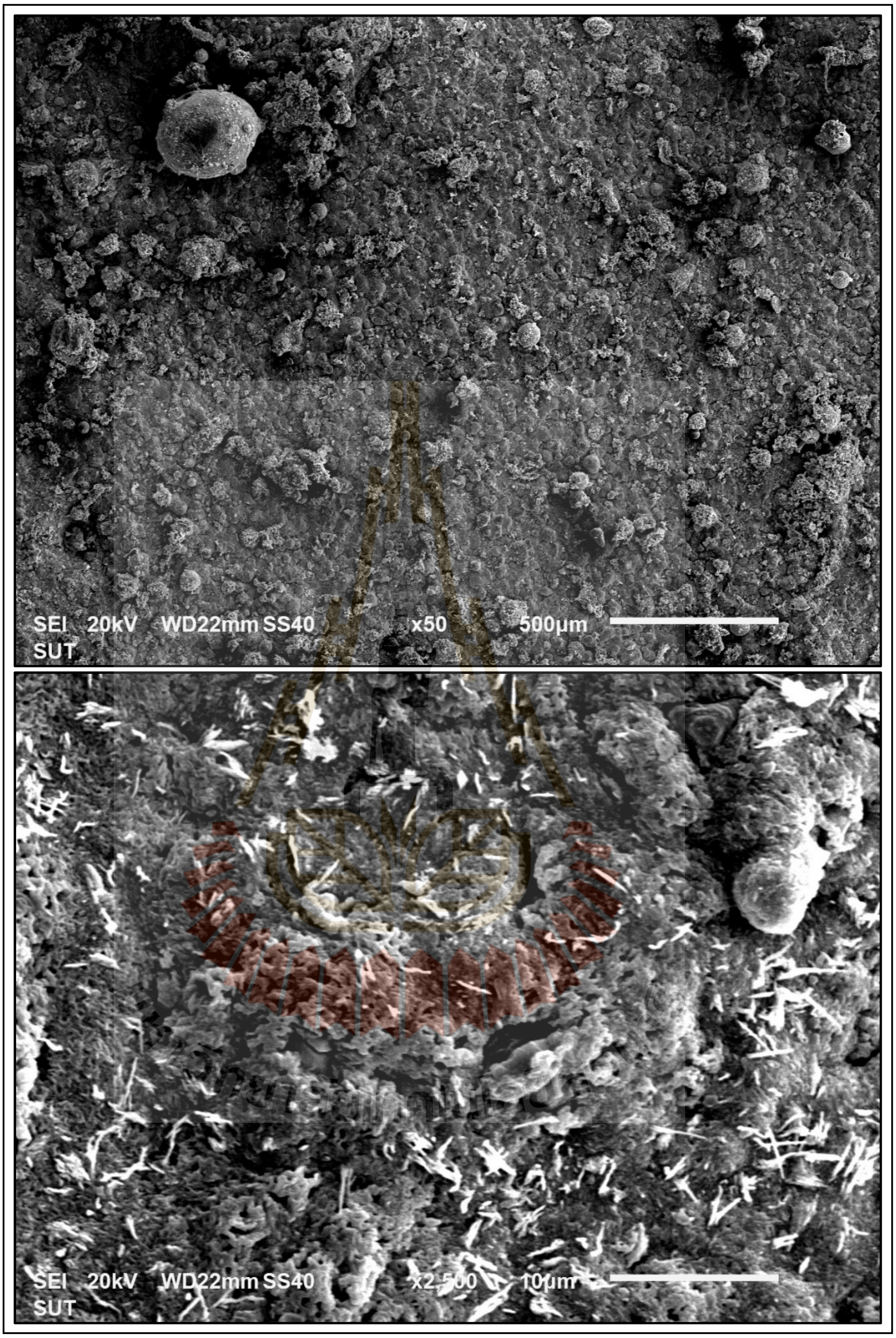


รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

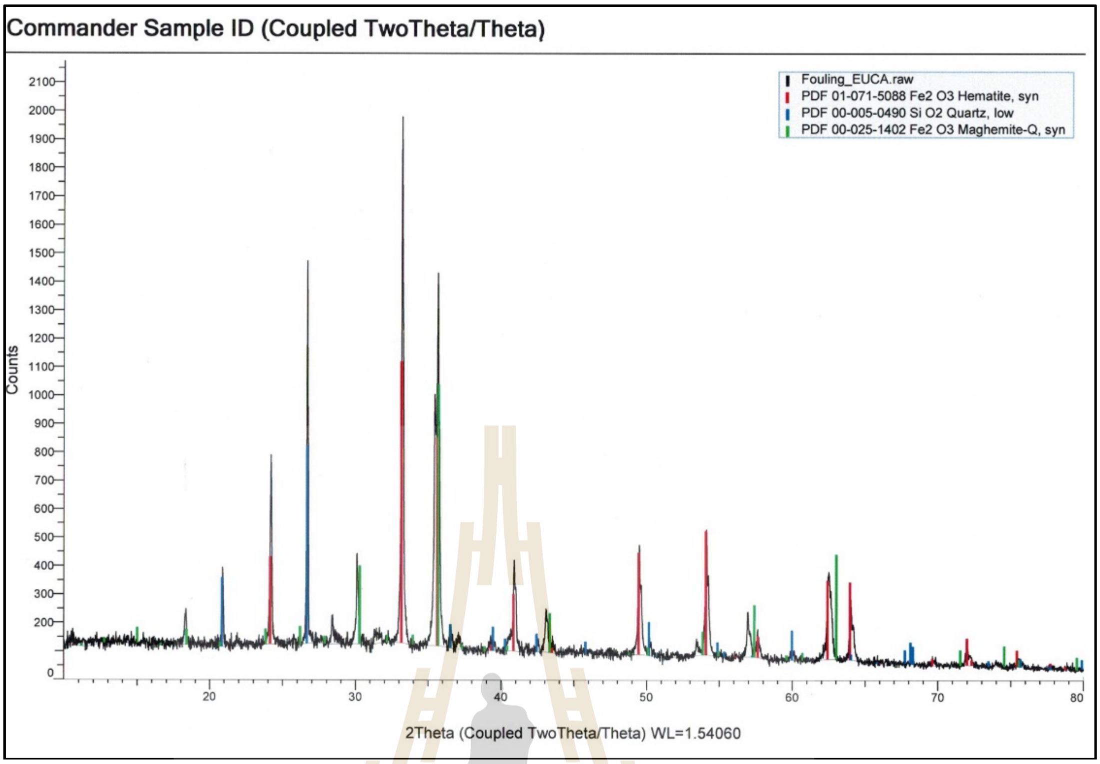


รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของตะกรันเกาะผิวท่อไอน้ำ
(ก) กำลังขยาย 50 เท่า (บน) (ข) กำลังขยาย 2500 เท่า (ล่าง)



รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตะกรันเกาะท่อ
ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

ผลการวิเคราะห์การใช้สารเติมแต่งในเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งด้วยดินขาว เพื่อลดการเกิด เถ้าหลอม ตะกรัน การกัดกร่อนขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบเชื้อเพลิง โดยการเตรียมดินขาวในอัตราส่วน 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก ผสมกับเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งโดยใช้คนผสม ดังรูปที่ 4.28 เพื่อใช้ในการทดสอบหม้อต้มไอน้ำ พบว่า ลักษณะการเผาไหม้เป็นเช่นเดียวกับการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% ดังรูปที่ 4.29 ซึ่งจากการเก็บตัวอย่างของเถ้าหนักที่มีลักษณะเป็นก้อนแยกกับเถ้าหนักที่เป็นผง ดังรูปที่ 4.29 การใช้สารเติมแต่ดินขาวทำให้เถ้าที่จับตัวเป็นก้อนมีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 4.7 โดยที่การเผาไหม้สามารถเผาได้มากขึ้นจากการพิจารณาปริมาณเถ้ารวมที่เกิดจากการเผาไหม้

ผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของเถ้าด้วยเครื่อง XRD ที่ใช้ดินขาวเป็นสารเติมแต่งในอัตราส่วน 5% 10% และ 12% โดยน้ำหนัก พบว่าองค์ประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกลุ่มซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) และแคลเซียมคาร์บอนเนต ($CaCO_3$) ดังรูปที่ 4.32 เป็นเช่นเดียวกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% โดยที่อัตราการใช้ดินขาว 12% จะมีส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะเกิดการเหลือของดินขาวในเถ้าหนัก ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งผลการวิเคราะห์ XRD แสดงดังรูปที่ 4.34 และจากปริมาณของดินขาวมากเกินไปจะส่งผลต่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ต่ำลงและเกิดการจับตัวกันเป็นก้อเร็วกว่าปกติซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ย

ภายในห้องเผาไหม้เสถียรที่อัตราส่วนผสมดินขาว 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก มีค่า 572.4, 438.3 และ 472.5 $^{\circ}$C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.36 จากผลการใส่สารเติมแต่งดินขาวในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะส่งผลต่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ และถ้าเติมดินขาวมากกว่า 15 % จะไม่สามารถต้มน้ำและเพิ่มแรงดันได้ตามเงื่อนไข 10-12 บาร์ แต่การใช้ดินขาวที่อัตรา 10% จะมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมากกว่าที่ใช้ดินขาว 12% และเกิดสะสมสกปรกที่ผิวท่อน้อยที่สุด โดยปัญหาของเถ้าที่จับตัวรวมกันเป็นก้อน องค์ประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่ของเถ้าจะเป็นซิลิคอนออกไซด์ทั้งสิ้น ดังรูปที่ 4.35 และเป็นซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) ทั้งหมดที่อัตราผสมดินขาว 5, 10 และ 12% เนื่องจากปริมาณซิลิกามาจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณดินขาวการหลอมตัวของเถ้าที่จับตัวเป็นก้อนจะมีการหลอมตัวเองมากขึ้นดังรูปที่ 4.37, 4.38 และ 4.39

มหาวิทยาลัย...โนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.28 การเตรียมเชื้อเพลิงและผสมสารเติมแต่งในการทดสอบ

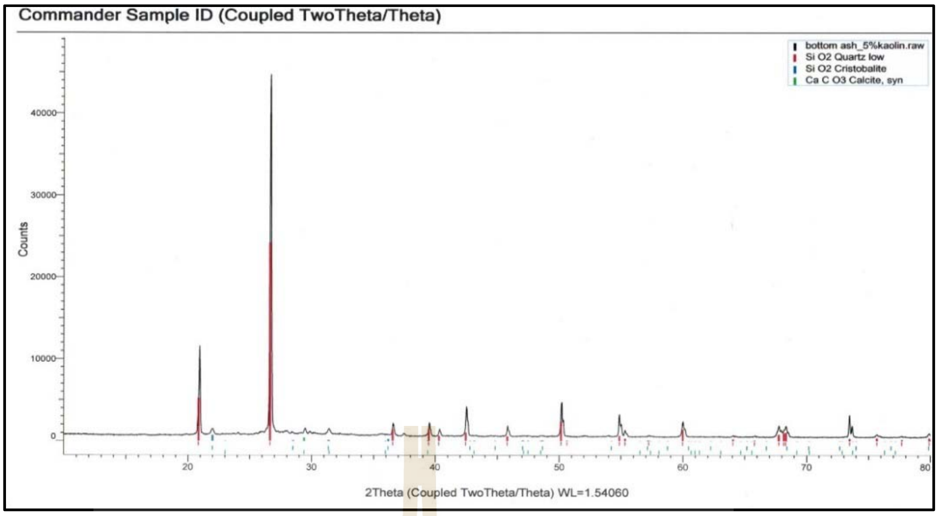
รูปที่ 4.29 ลักษณะภายในเตาและตำแหน่งอุปกรณ์เก็บการกัดกร่อนในหม้อไอน้ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

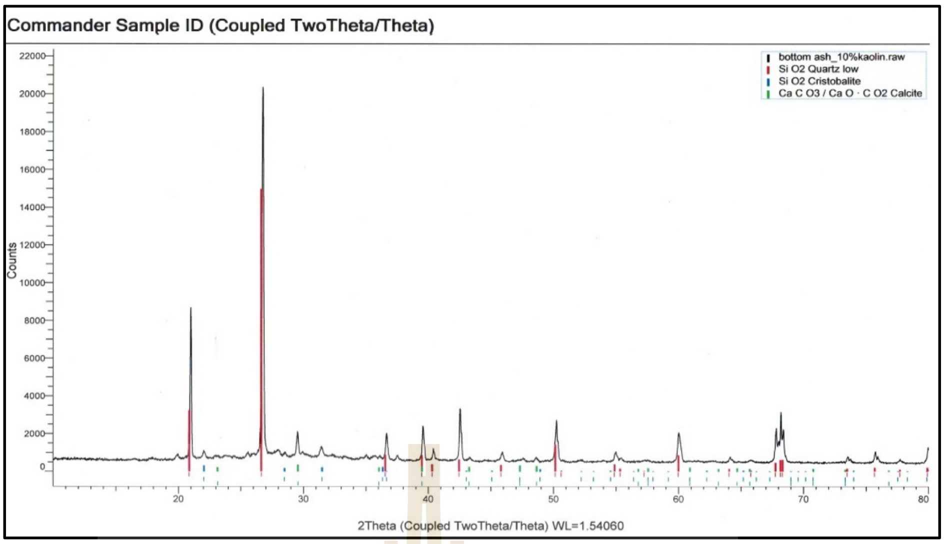
รูปที่ 4.30 ลักษณะเก็บตัวอย่างเถ้า

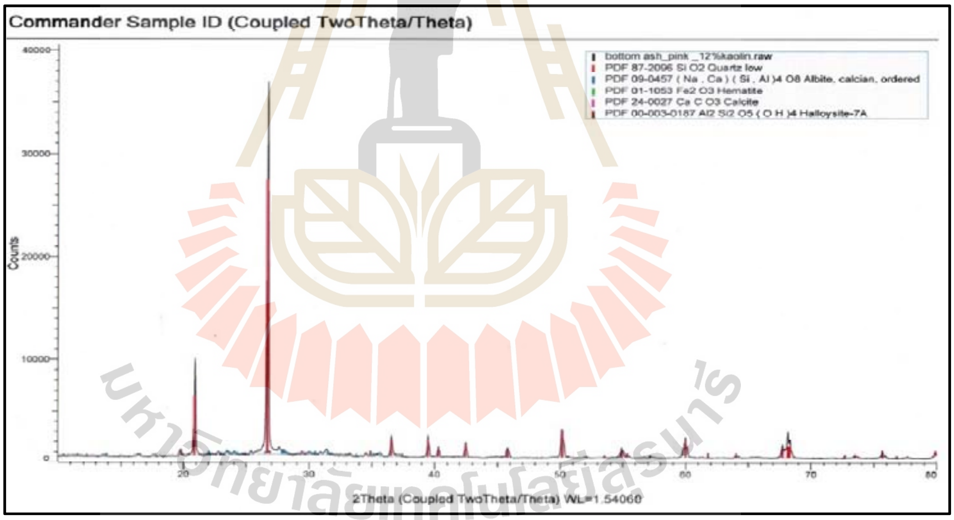
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.31 ลักษณะเถ้าที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้



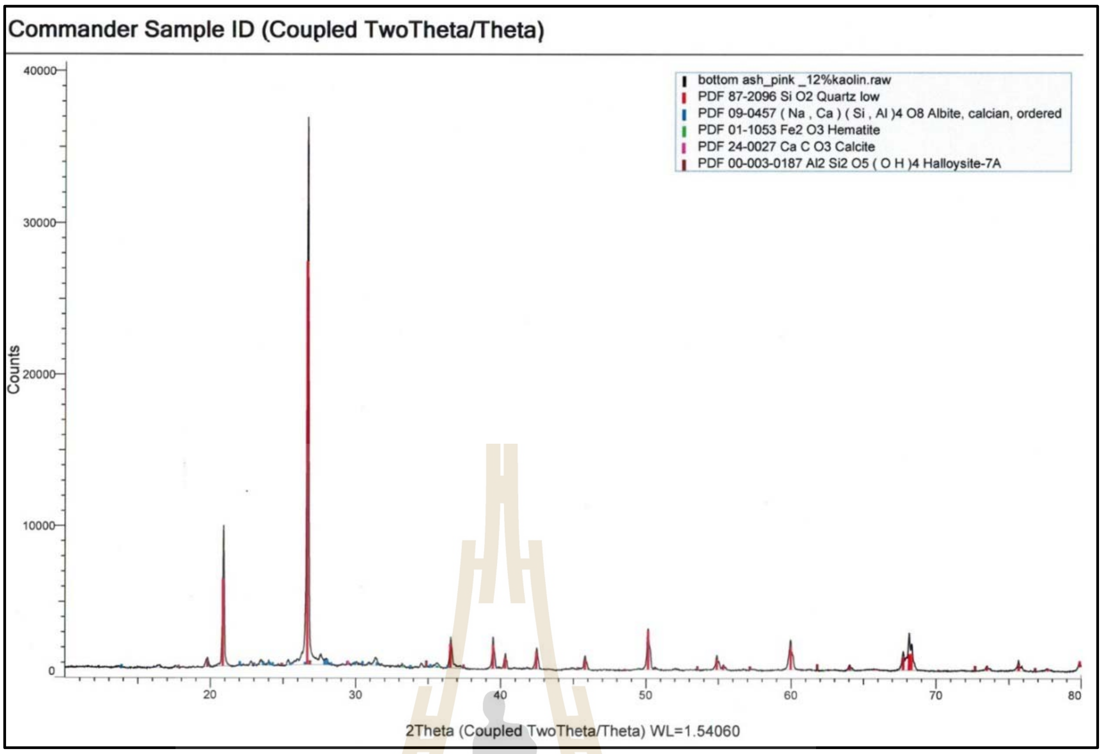
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



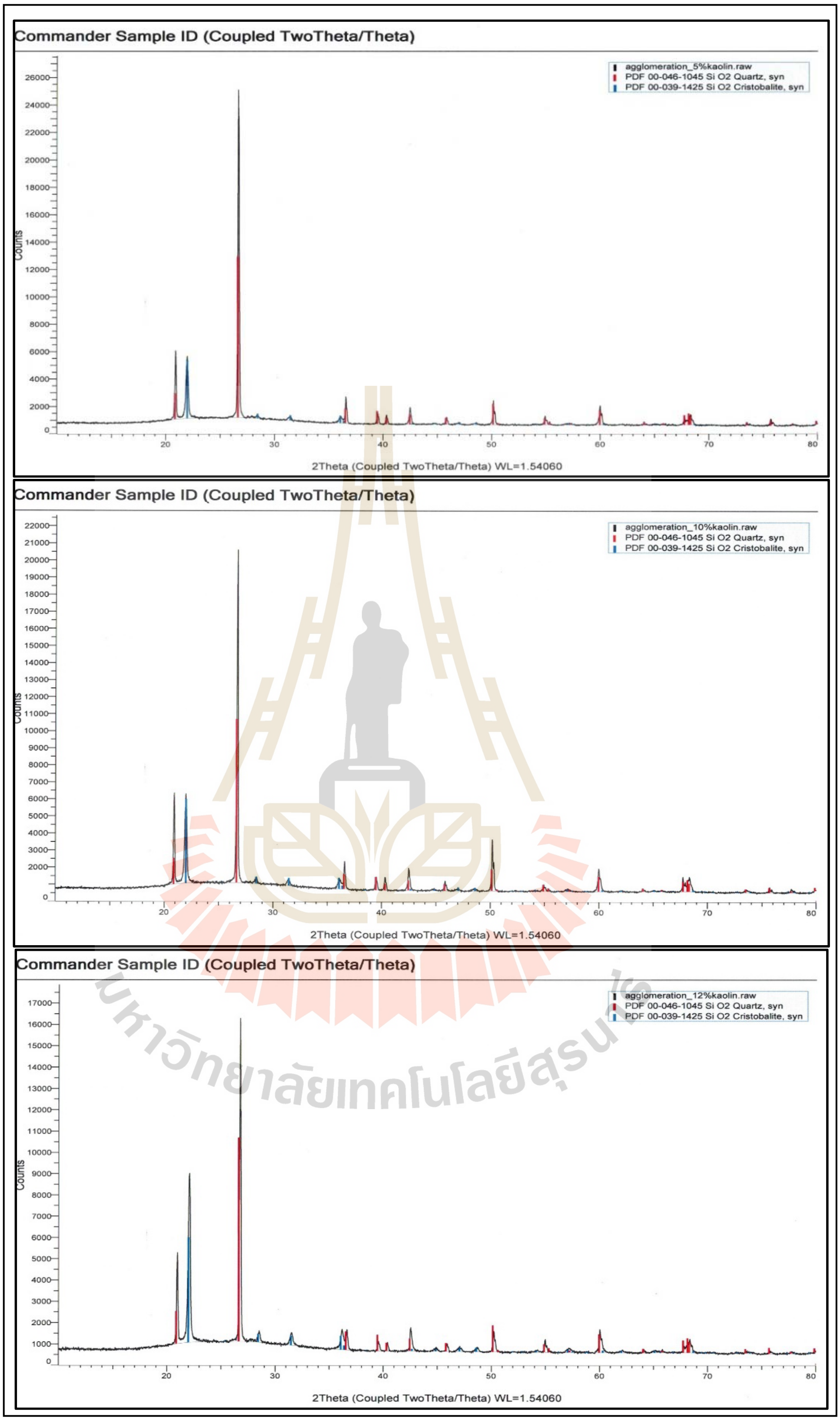


รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของเถ้าหนักด้วยเครื่อง XRD ที่เถ้าเป็นผง และใช้สารเติมแต่งดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12%

รูปที่ 4.33 ลักษณะเถ้าหนักบางส่วนที่มีปริมาณมากเกินไปและไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง

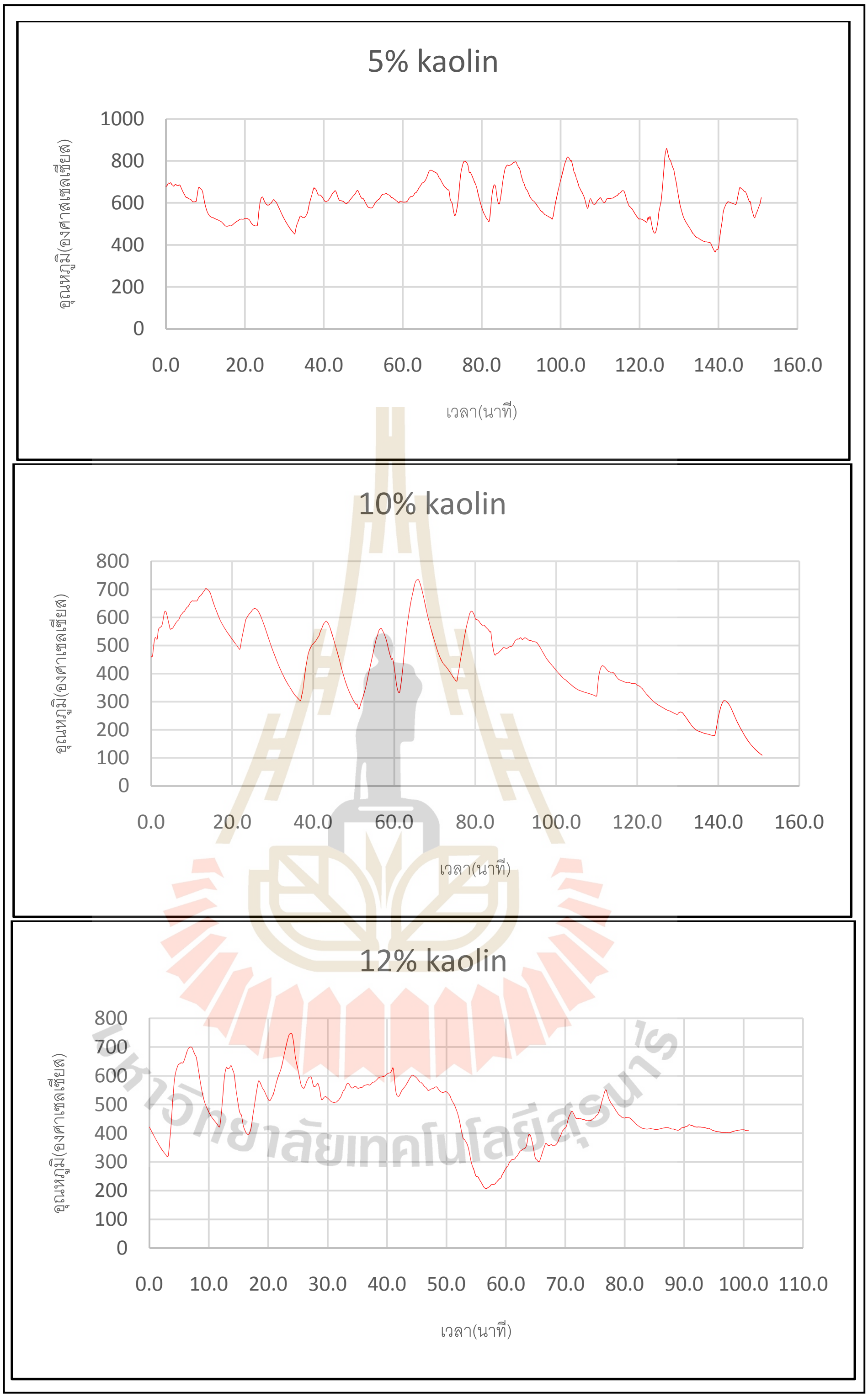


รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าหนักที่อัตรา 12%
ในบางส่วนที่มีปริมาณมากเกินไปและไม่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง



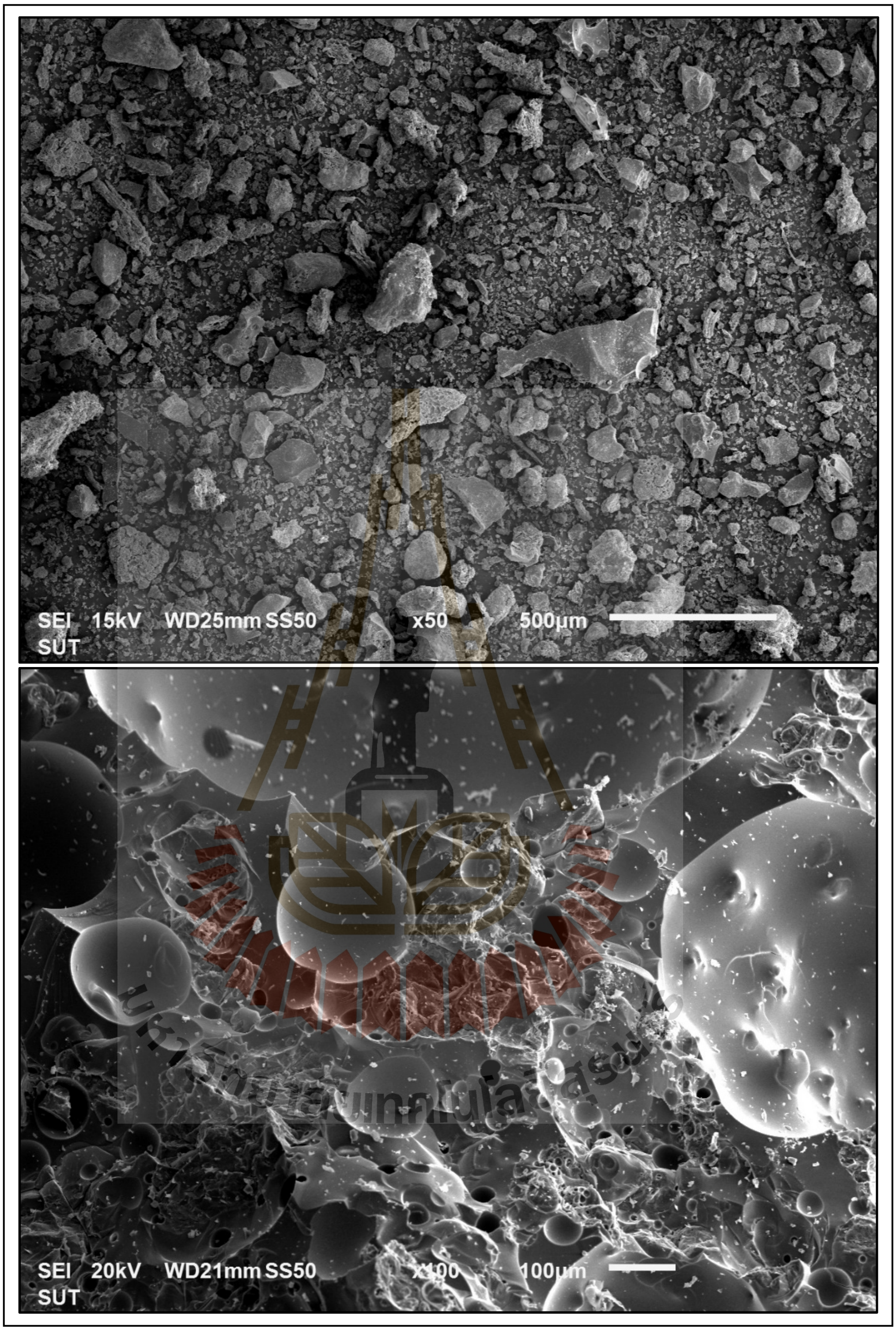
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าหนักที่จับตัวเป็นก้อน



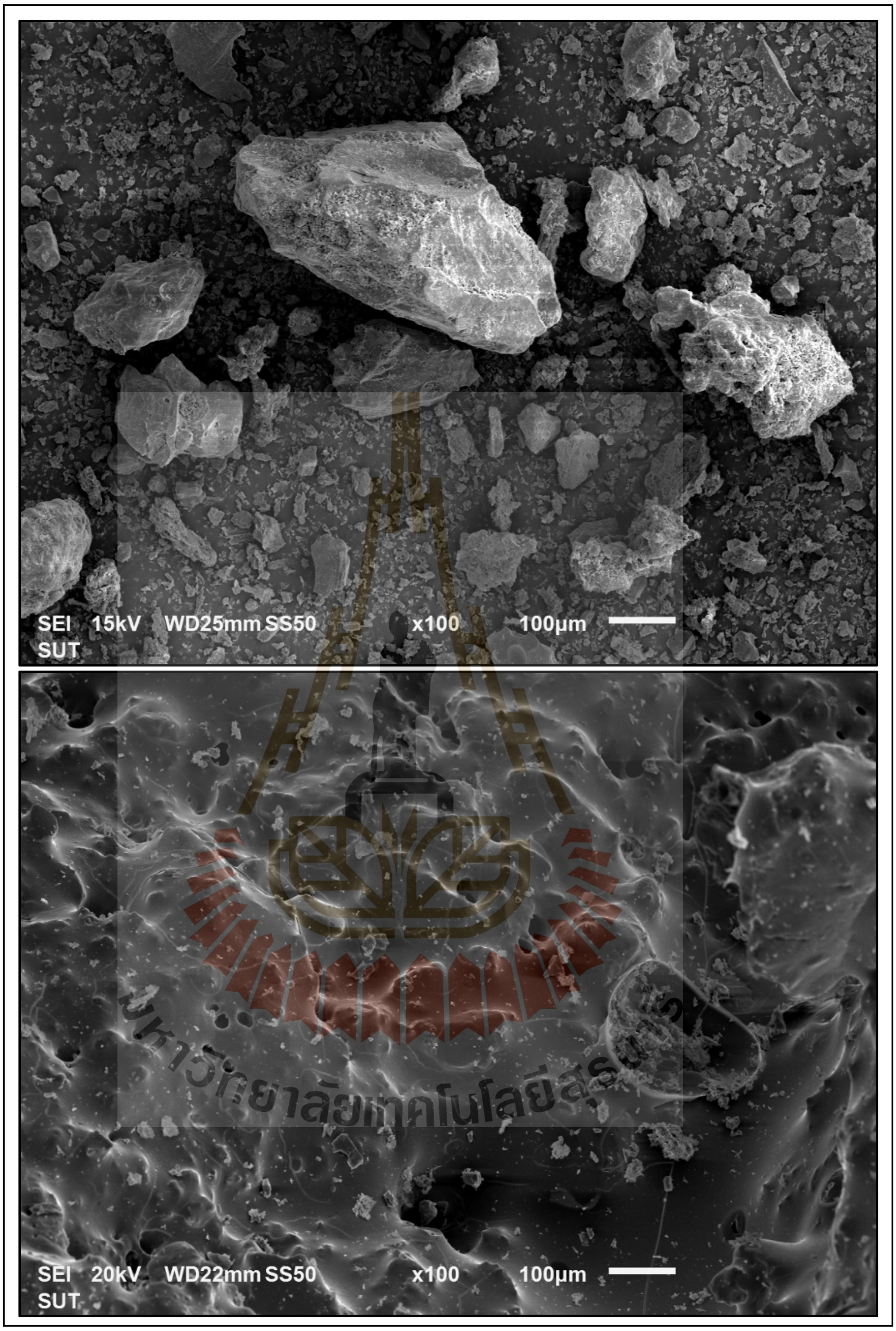
รูปที่ 4.36 ผลของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้ในการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

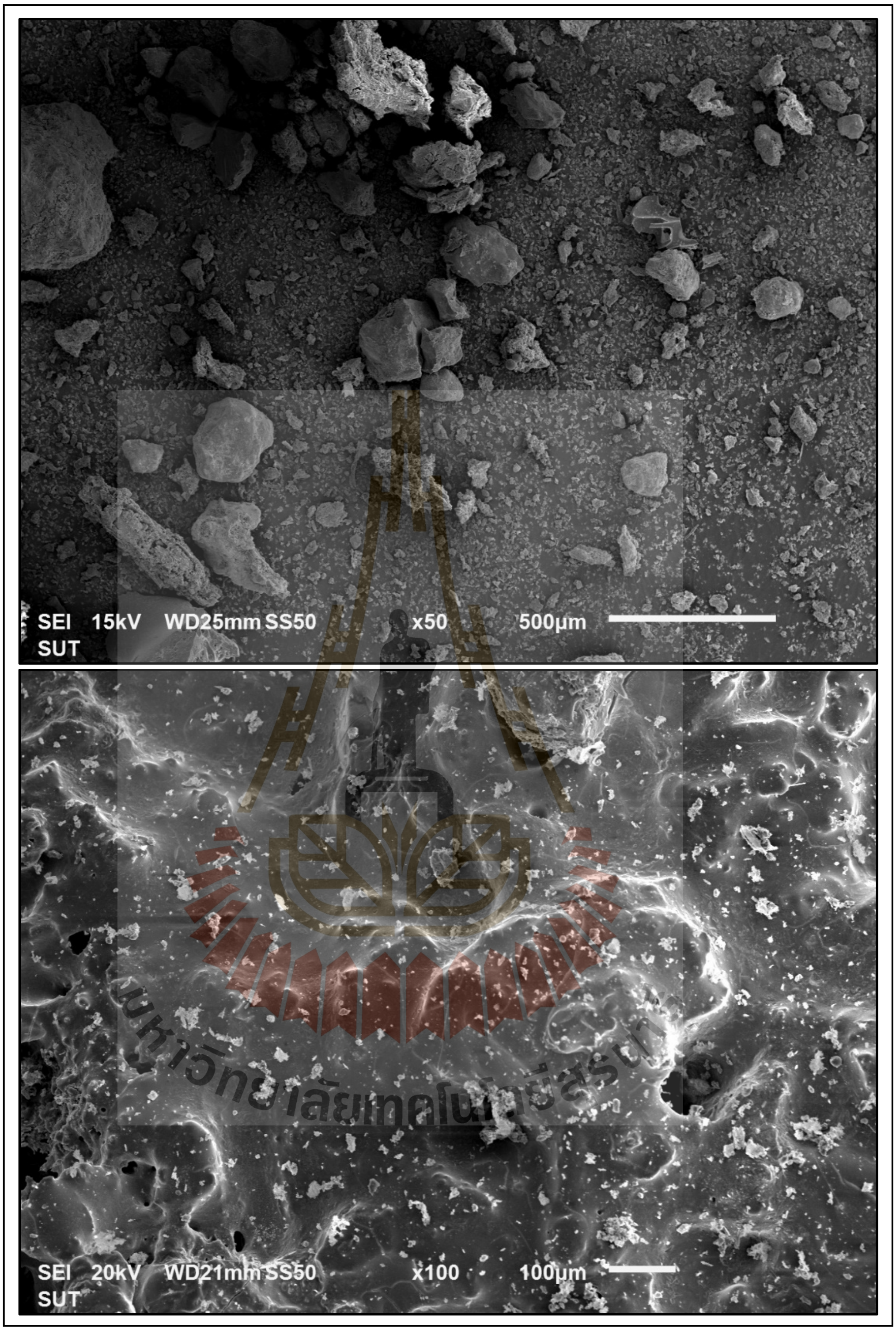


รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ผสมดินขาวในอัตรา 5% โดยน้ำหนัก (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง(ล่าง)

รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ผสมดินขาวในอัตรา 10% โดยน้ำหนัก (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง(ล่าง)



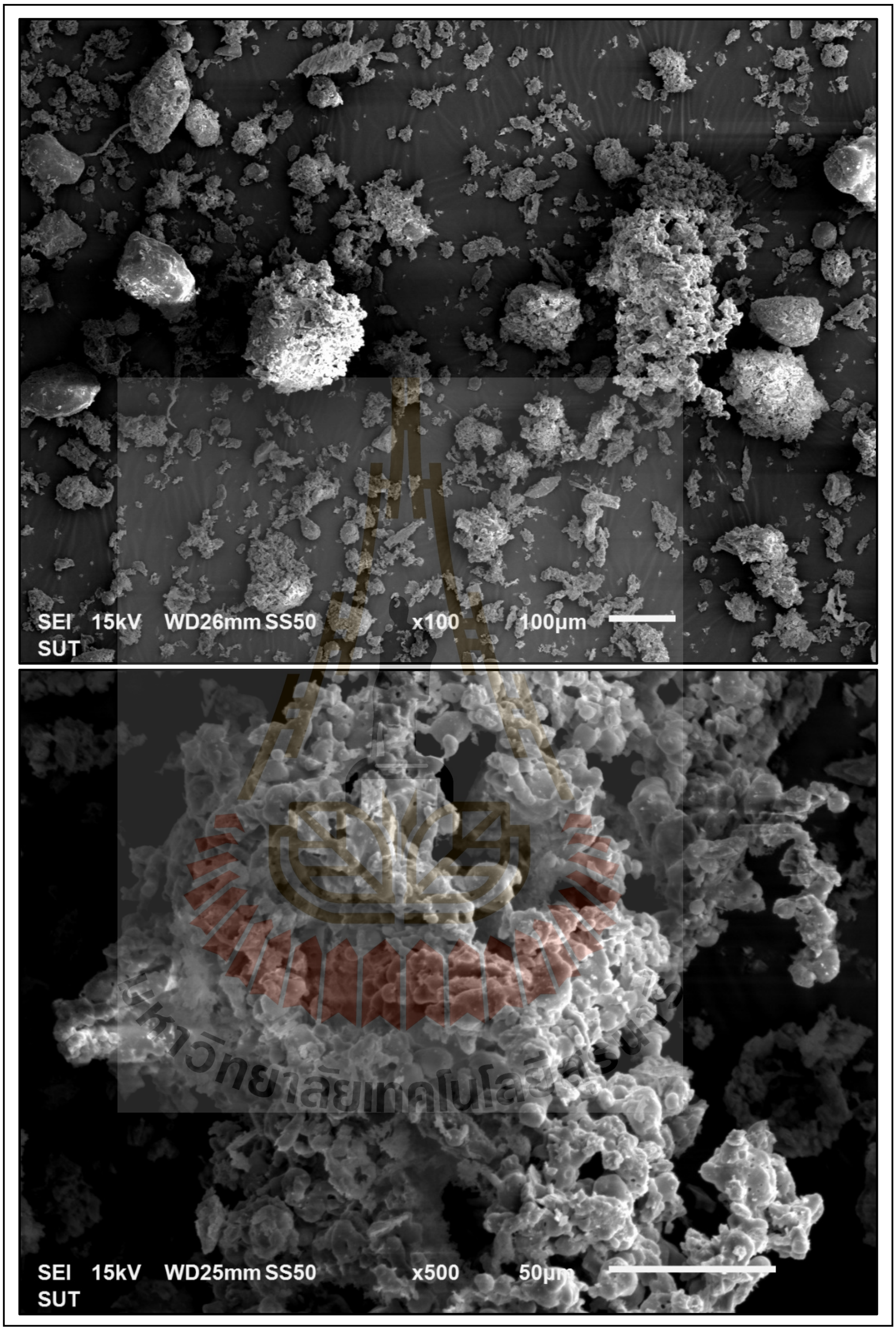
รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ผสมดินขาวในอัตรา 10% โดยน้ำหนัก (บน) และของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง(ล่าง)



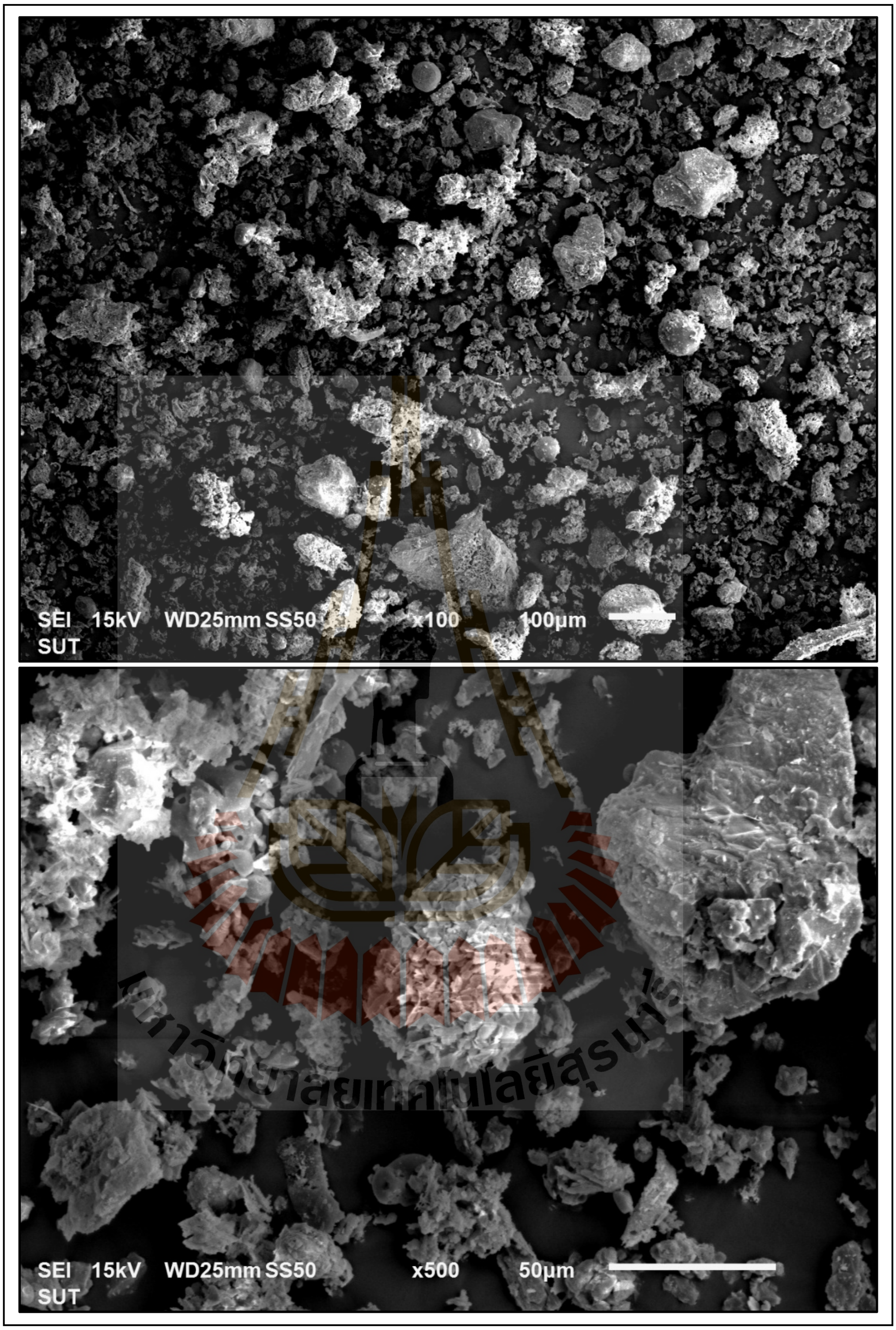
รูปที่ 4.39 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าที่เป็นผงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวในอัตรา 12% โดยน้ำหนัก (บน) และ ของเถ้าที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง (ล่าง)

ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยจากการเผาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก พบว่า เถ้าลอยจาเชื้อเพลิงที่ผสมดินขาว จะมีลักษณะเป็นผลึกและจับตัวเป็นก้อนมากขึ้น ดังรูปที่ 4.39-4.42ตามลำดับ และองค์ประกอบหลักของออกไซด์ของเถ้าลอย คือ ซิลิคอนออกไซด์(SiO_2) โดยเมื่อผสมดินขาวลงไปในเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์(CaO)ในเถ้าลดลง เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์(CaO) จะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมออกไซด์(K_2O) กับซิลิคอนออกไซด์(SiO_2) ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลง ทำให้เถ้าหนักเกิดการหลอมตัวได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของSorensen L.H.,et al.(2001) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโพแทสเซียมและซิลิคอนต่ออุณหภูมิหลอมเหลวของผสม พบว่า อุณหภูมิหลอมเหลวจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโพแทสเซียมออกไซด์และซิลิคอนโดยการเพิ่มปริมาณแคลเซียมจะทำให้จุดหลอมเหลวของเถ้าลดลง และจากงานวิจัยของ ฐานิตย์เมธิยานนท์ และคณะ (2553) ศึกษากระบวนการ Adsorbtion และ Chemical reaction ของดินขาวพบว่าดินขาวจะดูดซับโพแทสเซียมเป็น $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ที่อุณหภูมิ 700-800°Cโดยที่อุณหภูมิ 900°Cโพแทสเซียจะดูดซับไว้ที่ผิวของ Muscovite และทำปฏิกิริยากับ Aluminum-silicate เป็นสารประกอบดังสมการที่ 2.2 แล้วจะเกิดสารประกอบ $KAlSiO_4$ หรือ Kalsilite ซึ่งเป็น Crystalline และลักษณะเป็น Hexagonal จึงเรียกว่า Kaliophilite (Leucite) ซึ่งเป็น Crystalline เช่นกัน สารประกอบทั้งสองมีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง 1165-1250°Cปัญหาการเกิดตะกรันเกาะท่อและการกัดกร่อนจะลดลง ซึ่ง $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$จะเกิดการแยกตัวในช่วง 850-1200°Cและเหลือเพียง Al_2O_3และ SiO_2 ซึ่งไม่ส่งผลต่อการกัดกร่อน

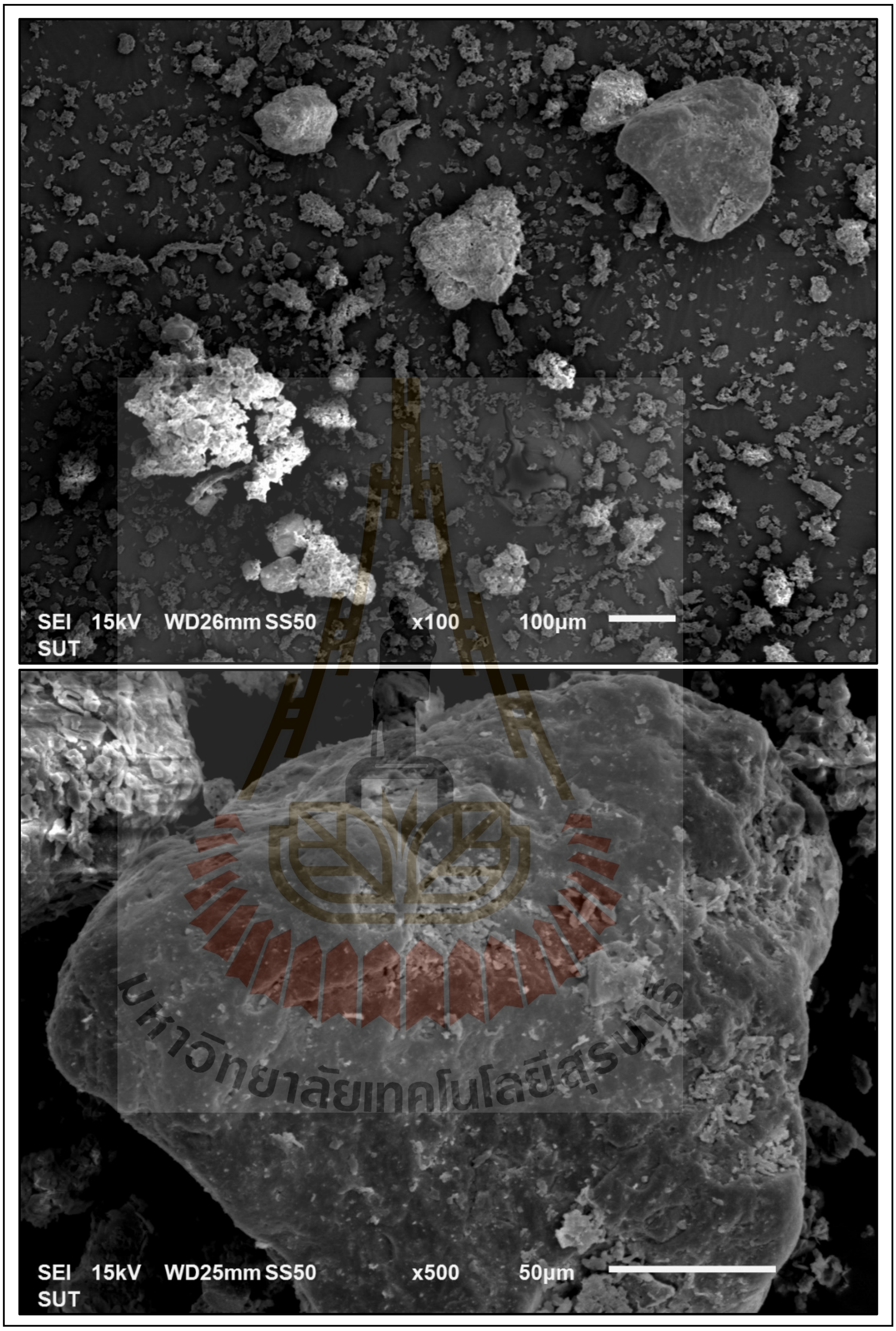
ออกไซด์ของเถ้าลอยที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนท่อ จะเกิดจากคลอรีน (Cl_2) และไฮโดรคลอริก (HCl) ดังสมการที่ 2.1 และรูปที่ 2.4 พบว่า การกัดกร่อนผิวท่อจะลงเมื่อเพิ่มดินขาวเข้าไปในเชื้อเพลิงดังรูปที่ 4.44,4.45และ 4.46และเมื่อนำเถ้าที่เกาะผิวท่อมาวิเคราะห์ออกไซด์พบว่า จะมีการกัดกร่อนลดลงเนื่องจากองค์ประกอบออกไซด์เป็น Fe_2O_3ลดลง โดยเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวเป็นสารเติมแต่ง 5% 10% และ 12% โดยน้ำหนัก มีปริมาณ Fe_2O_3 มีค่า 22.993, 9.439 และ 28.477% ตามลำดับ โดยถ้าไม่ผสมปริมาณ Fe_2O_3 มีค่า 82.933% ซึ่งสามารถลดลงได้ 88.6% ที่ผสมดินขาว 10% โดยน้ำหนัก ซึ่งเถ้าลอยจะสมอยู่บนด้านหลังท่อไอน้ำดังรูปที่ 4.47ลักษณะเถ้าลอยที่สะสมอยู่ด้านหลังท่อดังรูปที่ 4.48กและ 4.49 เมื่อนำตะกรันไปวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเครื่อง SEMXRD และ XRF เพื่อหาปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวเป็นสารเติมแต่ง 5% 10% และ 12% โดยน้ำหนัก องค์ประกอบหลักที่เกิดขึ้น SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, K_2O_5และอื่นๆ มีค่าร้อยละ 55.615, 22.993, 11.029, 2.836, 65.842, 9.439, 12.365, 3.766, 51.876, 28.477, 10.562 และ 2.99 % ตามลำดับ



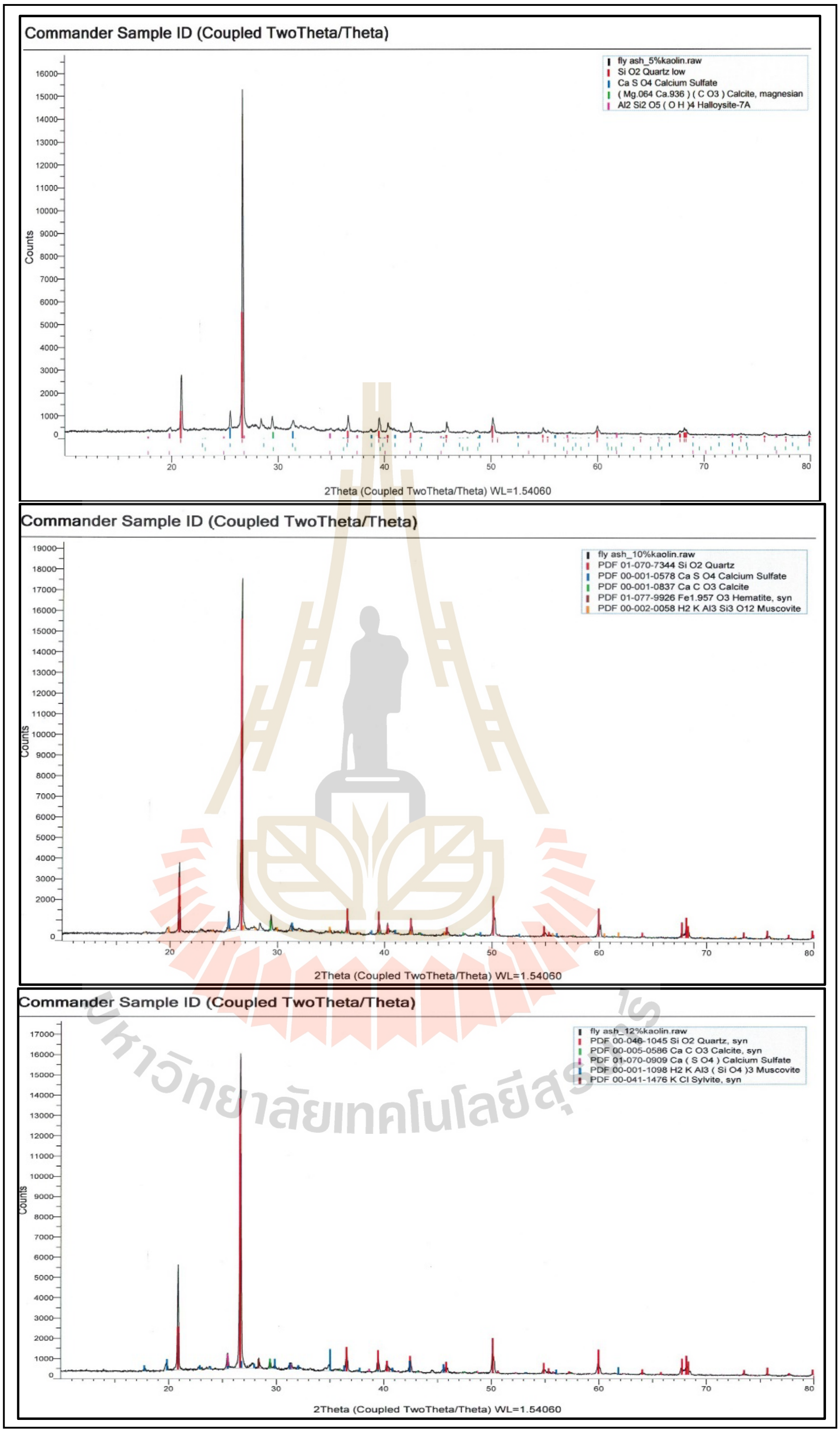
รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 5%



รูปที่ 4.41 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 10%

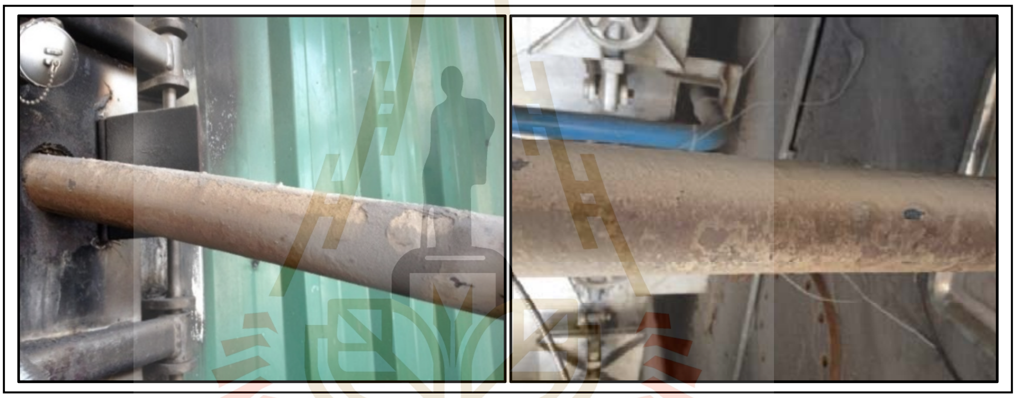


รูปที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12%



รูปที่ 4.43 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาอัดแท่ง ผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.44 ลักษณะเถ้าลอยและออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมดินอัตรา 5% โดยน้ำหนัก



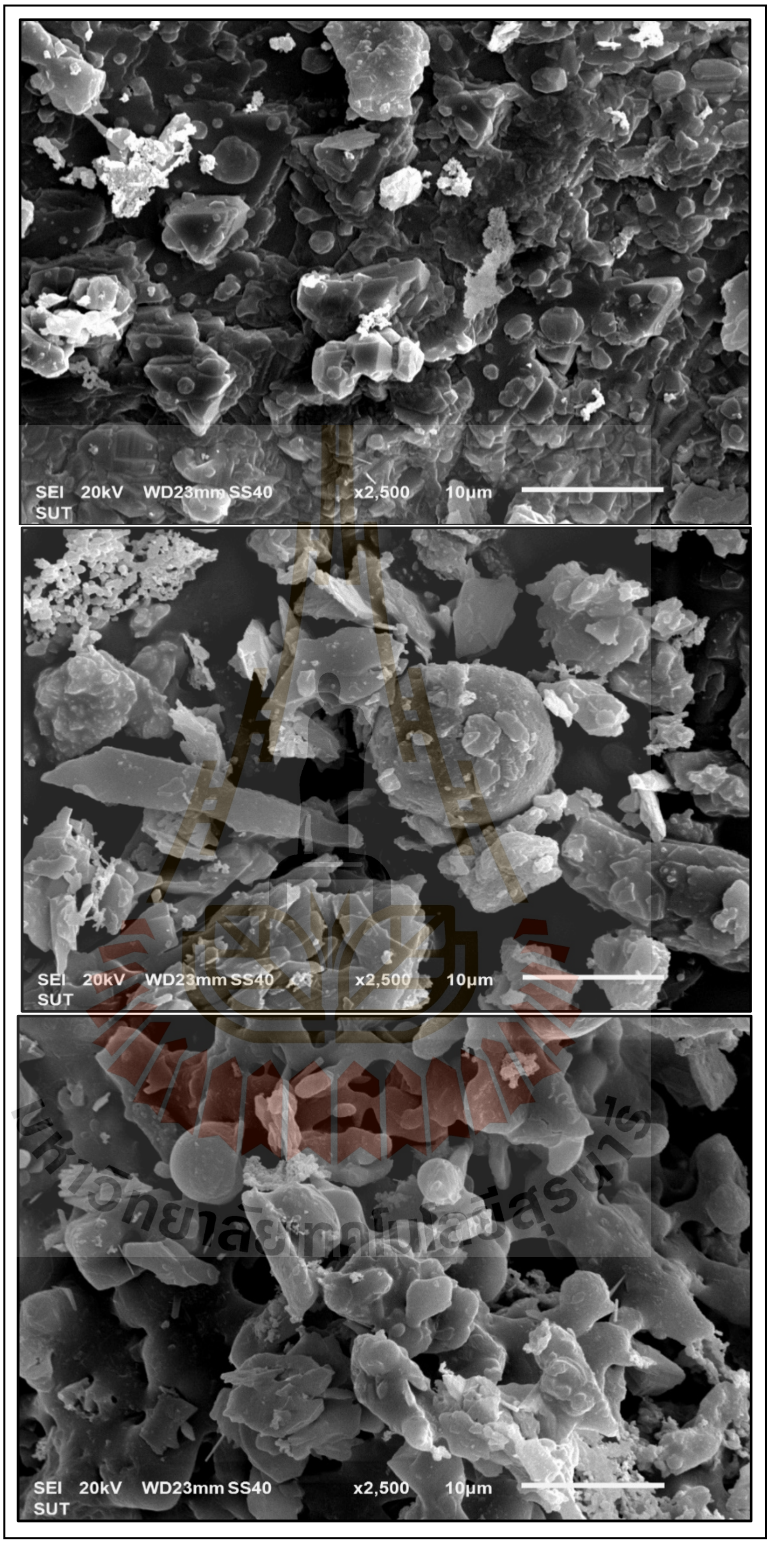
รูปที่ 4.45 ลักษณะเถ้าลอยและออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมดินอัตรา 10% โดยน้ำหนัก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.46 ลักษณะเถ้าลอยและออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาเมื่อใช้เชื้อเพลิงผสมดินอัตรา 12% โดยน้ำหนัก

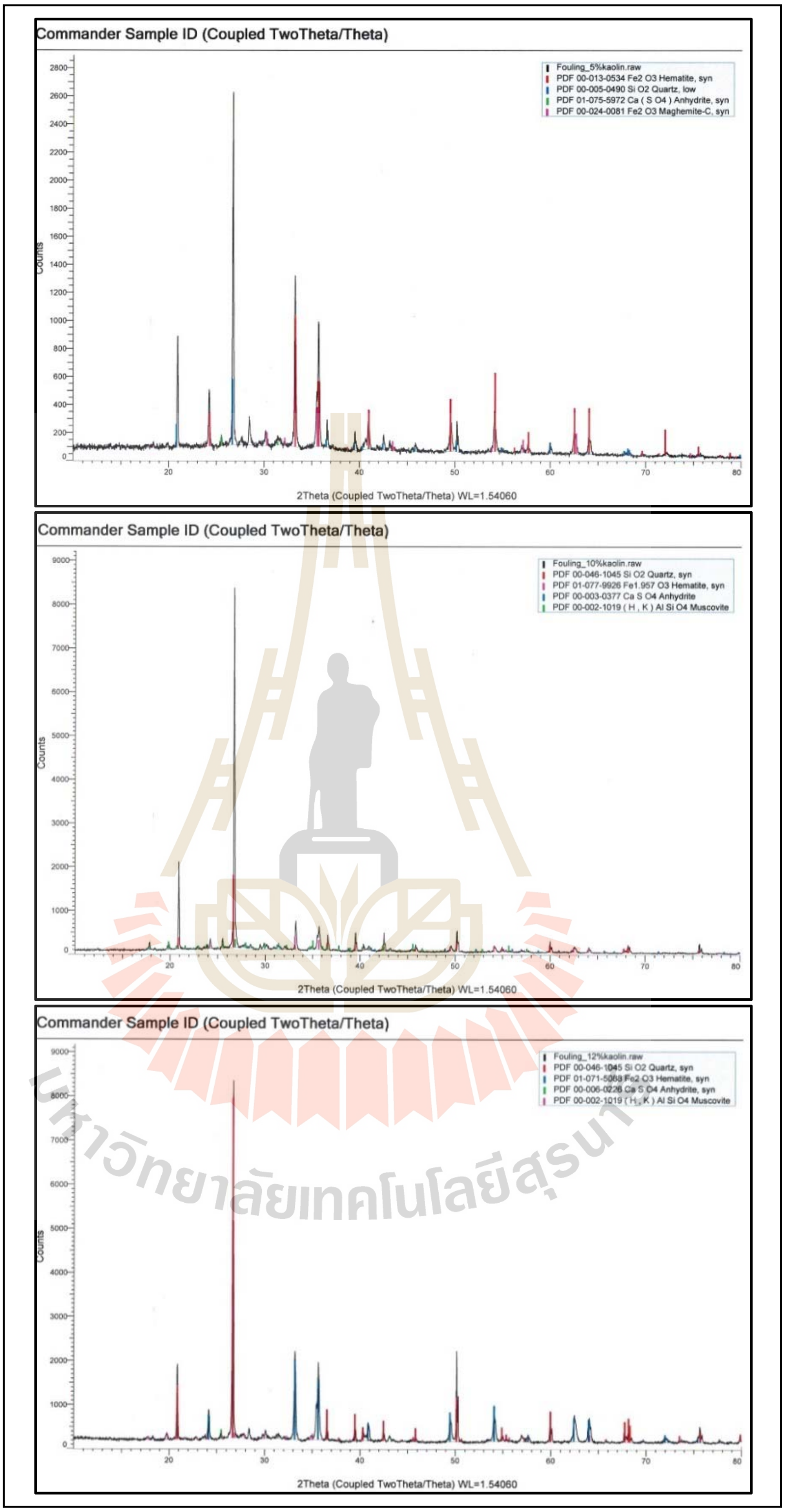
รูปที่ 4.47 ลักษณะเถ้าลอยที่สะสมอยู่ด้านหลังท่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.48 ผลการวิเคราะห์ภาพด้วยเครื่อง SEM ของตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิง ผสมดินขาว 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.49 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิง
เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในรูปของออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	%wt									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	CaO	Na_2O	P_2O_5	SO_3
เปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง	53.679	10.167	8.013	4.126	2.605	ND	15.413	ND	2.461	1.291
ดินขาว 5%	61.613	14.386	6.095	3.652	1.566	ND	9.329	ND	1.416	0.722
ดินขาว 10%	57.422	14.1	5.382	3.859	1.43	ND	13.897	ND	1.572	0.838
ดินขาว 12%	70.778	14.509	3.005	2.94	0.746	ND	6.147	ND	0.609	0.307

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์จากวัตถุดิบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.9 สามารถทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1) พารามิเตอร์AI (Alkali Index) มีค่า 0.23, 0.20, 0.21 และ0.16 ตามลำดับค่า AI อยู่ในช่วง 0.17-0.34 อาจมีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน ยกเว้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 12% มีค่า AI ต่ำกว่า 0.17 ซึ่งแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนจะน้อยหรือไม่เกิด

2) BAI (Bed Agglomeration Index) มีค่า 0.41, 0.25, 0.32 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.15 Bed ไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน มีเพียงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12% มีแนวโน้มจะจับตัวเป็นก้อนแน่นอน

3) พารามิเตอร์ $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) มีค่า 1.94, 1.67, 1.39 และ 1.02 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6 ไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

4) พารามิเตอร์ Rs มีค่า 0.17, 0.10, 0.13 และ 0.06 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6 ไม่มีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ $R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีค่า 5.28, 4.28, 4.07 และ 4.88 ตามลำดับซึ่งมีค่ามากกว่า 4.0 แนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย โดยผลแสดงดังตารางที่ 4.10

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าของพารามิเตอร์ของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำให้เกิดตะกรันและจับตัวเป็นก้อน

พารามิเตอร์	AI	BAI	$R_{b/a}$	Rs	Silica/Alumina Ratio	Rf	Cl	Na_2O
เปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง	0.23	0.41	1.94	0.17	5.28	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
ดินขาว 5%	0.20	0.25	1.67	0.10	4.28	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
ดินขาว 10%	0.21	0.32	1.39	0.13	4.07	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
ดินขาว 12%	0.16	0.14	1.02	0.06	4.88	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
แนวโน้มเกิด Slagging และ Fouling	>0.34	<0.15	>2.6	>2.6	>4.0	Na_2O <3%	>=0.3	>=3.0

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในรูปของออกไซด์ของเถ้าหนัก(ผง)ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง และผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก

องค์ประกอบ	%wt									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	CaO	Na_2O	P_2O_5	SO_3
เปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง	56.527	9.641	4.58	2.623	1.348	3.481	15.644	ND	3.284	ND
ดินขาว 5%	63.257	10.451	4.61	2.806	1.038	2.704	12.334	ND	1.792	ND
ดินขาว 10%	68.743	10.271	3.199	2.599	1.031	1.849	10.037	ND	1.461	ND
ดินขาว 12%	66.038	11.823	3.722	2.84	0.889	1.99	9.739	ND	1.478	ND

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์จากเถ้าหนักของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก ตารางที่4.11 สามารถทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้ เช่นการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1) พารามิเตอร์AI (Alkali Index) มีค่า 0.14, 0.16, 0.14 และ0.16 ตามลำดับค่า AI ต่ำกว่า 0.17 ไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนยกเว้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 12% มีค่า AI ต่ำกว่า 0.17 ซึ่งแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนจะน้อยหรือไม่เกิด

2) BAI (Bed Agglomeration Index) มีค่า 0.39, 0.30, 0.22 และ 0.23 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.15 Bed ไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน

3) พารามิเตอร์ $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) มีค่า 1.75, 1.64, 1.23 และ 1.31 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6 ไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

4) พารามิเตอร์ Rs มีค่า 0.16, 0.12, 0.09 และ 0.10 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6 ไม่มีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ $R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีค่า 5.86, 6.05, 6.69 และ 5.59 ตามลำดับซึ่งมีค่ามากกว่า 4.0 แนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย

6) พารามิเตอร์ Rf จะพิจารณาค่าของ CaO+MgO เทียบกับ Fe_2O_3ถ้าน้อยกว่าจะคำนวณค่า Rf เนื่องจากผลการวิเคราะห์ออกไซด์ CaO+MgO เทียบกับ Fe_2O_3 มากกว่า จะพิจารณาแนวโน้มจากปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O) ซึ่งตรวจไม่พบปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O)

7) พารามิเตอร์คลอรีน มีค่า 1.66 ซึ่งแนวโน้มการการจับตัวที่ผิวท่อจะรุนแรงมากสนับสนุนกับพารามิเตอร์ Rfดังตารางที่ 4.12 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Vassilev, S.V., et al. (2010)พบว่าค่าพารามิเตอร์ AI, BAI และ $R_{b/a}$ มีแนวโน้มเดียวกับผลการวิจัย ดังตารางที่ 4.5

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประเมินแนวโน้มการเกิดตะกรันและจับตัวเป็นก้อนจาก 8 พารามิเตอร์ เปรียบเทียบกับการทดลองในหม้อต้มไอน้ำ พบว่า การประเมินแนวโน้มการใช้วัตถุดิบเพื่อประเมินแนวโน้มการเกิดตะกรันและจับตัวเป็นก้อนดีกว่าการใช้เถ้าหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในหม้อต้มไอน้ำและลักษณะการเกิดตะกรันและจับตัวเป็นก้อน ดังตารางที่ 4.10 และ 4.12

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าของพารามิเตอร์ของเถ้าหนัก(ผง)ของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำให้เกิดตะกรันและจับตัวเป็นก้อน

พารามิเตอร์	AI	BAI	$R_{b/a}$	Rs	Silica/Alumina Ratio	Rf	Cl	Na_2O
เปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง	0.14	0.39	1.75	0.16	5.86	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	1.66	ND
ดินขาว 5%	0.16	0.30	1.64	0.12	6.05	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
ดินขาว 10%	0.14	0.22	1.23	0.09	6.69	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
ดินขาว 12%	0.16	0.23	1.31	0.10	5.59	$CaO+MgO>Fe_2O_3$	ND	ND
แนวโน้มเกิด Slagging และ Fouling [2)]	>0.34	<0.15	>2.6	>2.6	>4.0	Na_2O <3%	>=0.3	>=3.0

1

4.5 การวิเคราะห์มลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสโดยเทคโนโลยีการเผาไหม้

แก๊สไอเสียที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 โดยสรุปคุณภาพแก๊สไอเสียที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศ สำหรับพารามิเตอร์ของ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไม่พบ และคาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ออกไซด์ของไนโตรเจน(NO_x) มีค่าตามมาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามอ้างอิงมาตรฐานของประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4.13 ก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์	มาตรฐานค่าปริมาณของอากาศที่ปล่อยทิ้ง
		กระบวนการผลิตที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง
CO (ppm)	239.72-36124	ไม่เกิน 690
SO_2(ppm)	-	ไม่เกิน 60
NO_x (ppm)	57.4-140	ไม่เกิน 200
NO_2(ppm)	-	-
NO(ppm)	75-142.6	ไม่เกิน 250
CO_2(%)	7.38-12.50	-
O_2 (%)	11.52-16.00	-
อุณหภูมิไอเสีย (°C)	190.41-224.5	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.6 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับการใช้ดินขาว

วีรชัย อาจหาญ. (2554) ได้ทำการศึกษากระบวนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสตั้งแต่เป็นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 55-60% ความหนาแน่น 215kg /m^3 จนถึงเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่มีความชื้นประมาณ 16% ความหนาแน่น 715kg /m^3 โดยกระบวนการดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการแปรรูป ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.14 ต้นทุนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

ต้นทุน	รายละเอียดการคำนวณ	คิดเป็น [บาท/กก.]	สัดส่วน [%]
ต้นทุนวัตถุดิบ			
ค่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	= 65[บาท/ตัน]	0.065	3.19
ต้นทุนการลดขนาด			
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	= 100 [kWh/ton] x3.2 [บาท/ kWh]	0.320	15.72
ต้นทุนการอบแห้ง			
ค่าเชื้อเพลิงหม้อไอน้ำ+อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	= [200 [กก/ชม.] x 1.5 [บาท/กก] +(2.2+2.2+3.7+2.2+2.2)[kWh]x3.2 [บาท/ kWh]]x4/2000	0.680	33.42
ต้นทุนการอัดแท่งเชื้อเพลิง			
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า+ลำเลียง	= 100.5 [kWh/ton] x3.2 [บาท/ kWh]+7.5[kWh] x3.2 [บาท/ kWh]+	0.345	16.95
ค่าแรงคนงาน	= 300 [บาท/วัน]x3 กะx 4 คน/8 ชั่วโมง/2000 กก/ชั่วโมง	0.225	11.06
รวม(1)		1.635	80.34
ต้นทุนคงที่(2)			
ต้นทุนเครื่องจักรทั้งชุด[1]	= 800 [บาท/ชั่วโมง]/2000 [กก/ชั่วโมง]	0.4	19.66
รวม(1)+(2)		2.035	100.00

หมายเหตุ [1]ต้นทุนเครื่องจักรต้องเดินเครื่องอย่างน้อย 24 ชั่วโมงต่อวัน

ซึ่งจากตารางที่ 4.14 สามารถแยกวิเคราะห์ต้นทุนได้ 2 รูปแบบ คือ 1) การผลิตเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 2) การผลิตเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง ซึ่งมีต้นทุนการผลิต 2.035 และ 1.39 บาท/กก หรือเทียบเป็นราคาต่อพลังงาน มีค่า 0.6 และ 0.41 บาท/Mcal ตามลำดับ จากการคำนวณค่าความร้อนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความชื้น 15%wb ดังสมการที่ 4.2 ค่าความร้อนมีค่า 14,148 kJ/kg ซึ่งจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์จะนำถ่านหินที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้ามาพิจารณาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและมูลค่า โดยปัจจุบันบิทูมินัสราคา 3.2 บาทต่อกิโลกรัม หรือเทียบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เป็นราคาต่อพลังงานมีค่า 0.57 บาท/Mcal ที่ถ่านหินมีความชื้น 25-30%wb ค่าความร้อน 24,073 kJ/kg โดยการประเมินวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์จะใช้ข้อมูลจากการสำรวจคือปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำนวน 523,810 ตันต่อปี ที่ความชื้น 47.65%wb เพราะฉะนั้นถ้าเทียบเป็นน้ำหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่มีความชื้น 15%wb จะมีน้ำหนัก 352,786 ตันต่อปีซึ่งในการพิจารณาเป้าหมายเพื่อนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมาทดแทนถ่านหิน ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่ยังต้องนำเข้า จากข้อมูลสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน เปิดเผยว่าในปี 2553 ประเทศไทยมีการใช้ถ่านหินในประเทศทั้งสิ้น 34.9 ล้านตัน แบ่งออกเป็นถ่านหินที่ผลิตได้ภายในประเทศประมาณ 18 ล้านตัน และถ่านหินนำเข้าประมาณ 17 ล้านตัน ถ่านหินส่วนใหญ่ร้อยละ 62.8 ถูกใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ที่เหลือร้อยละ 37.2 ใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาตร์จะพิจารณาการผลิตไฟฟ้าขนาด 1 MW เงื่อนไขการคำนวณค่า Net Plant Heat Rate เฉลี่ยสำหรับโรงไฟฟ้า 18 MJ/kWh หรือประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า 20% โดยโรงไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า 7,008 ชั่วโมงต่อปี หรือ Plant Factor 0.8 ซึ่งโรงไฟฟ้าขนาด 1 MW จะใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 8,916 ตันต่อปี ที่ความชื้น 15%wb และค่าความร้อน 14,148 kJ/kg จะได้พลังงานทั้งสิ้น 126.14 TJ โดยสามารถแยกได้ 4 กรณี

กรณีที่ 1 ใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในอัตรา 30:70 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากงานวิจัยของ Theis, M., et al. (2006) ได้ทดสอบการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับถ่านหินในอัตรา 30:70 แล้วว่าสามารถใช้ได้ เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสามารถวิเคราะห์ได้ 2 แบบ คือ แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง และการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

การคำนวณปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและถ่านหินบิทูมินัส

โรงไฟฟ้าขนาด 1 MW ต้องใช้พลังงาน 126.14 TJ

พลังงานที่ใช้ 126.14 TJ = [น้ำหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ตัน) x ค่าความร้อนเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (MJ/kg)] + [น้ำหนักถ่านหิน (ตัน) x ค่าความร้อนถ่านหิน (MJ/kg)]

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับถ่านหินในอัตรา 30:70 โดยน้ำหนัก

น้ำหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ตัน) = 2.3 x น้ำหนักถ่านหิน (ตัน)

เพราะฉะนั้นจะใช้เปลือกไม้ยูลิปตัส1,814 ตันต่อปี และถ่านหินบิทูมินัส4,173 ตันต่อปี

1.1 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง	=	1,814 (ตันต่อปี) x 1.39 บาทต่อกิโลกรัม
	=	2.52 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัส	=	4,173 (ตันต่อปี) x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	13.35 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัสที่ทดแทน	=	1,814 (ตันต่อปี) x ค่าความร้อน 14.148 MJ/kg x 0.133 บาท/MJ
	=	3.41 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งจะประหยัดงบได้ปีละ 3.41-2.52 = 0.62 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน = 1,064 (ตันต่อปี)หรือ 3.41 ล้านบาทต่อปี

1.2 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง	=	1,814 (ตันต่อปี) x 2.035 บาทต่อกิโลกรัม
	=	3.69 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัส	=	4,173 (ตันต่อปี) x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	13.35 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัสที่ทดแทน	=	1,814 (ตันต่อปี) x ค่าความร้อน 14.148 MJ/kg x 0.133 บาท/MJ
	=	3.41 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะต้องเพิ่มงบปีละ 3.69-3.41 = 0.28 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน = 1,064 (ตันต่อปี)หรือ 3.41ล้านบาทต่อปี

กรณีที่ 2 ใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับดินขาวร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสในอัตรา 50:50 และใช้ดินขาว 5% โดยน้ำหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยราคาดินขาว 4 บาท/กิโลกรัม

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับถ่านหินในอัตรา 50:50 โดยน้ำหนัก

น้ำหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ตัน) = น้ำหนักถ่านหิน (ตัน)

เพราะฉะนั้นจะใช้เปลือกไม้ยูลิปตัส 3,300 ตันต่อปี และถ่านหินบิทูมินัส3,300 ตันต่อปี

2.1 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง	=	3,300 ตันต่อปี x 1.39 บาทต่อกิโลกรัม
	=	4.59 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของดินขาวที่ใช้ผสม	=	3,300 ตันต่อปี x 5% x 4 บาทต่อกิโลกรัม
	=	0.66ล้านบาทต่อปี

มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัส	=	3,300 ตันต่อปี x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	10.56 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัสที่ทดแทน	=	3,300 (ตันต่อปี) x ค่าความร้อน 14.148 MJ/kg x 0.133 บาท/MJ
	=	6.21 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งจะประหยัดงบได้ปีละ6.21-4.59-0.66 = 0.96 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน	=	1,935 (ตันต่อปี)หรือ 6.21ล้านบาทต่อปี

2.2 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัอแท่ง	=	3,300 (ตันต่อปี) x 2.035 บาทต่อกิโลกรัม
	=	6.72 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของดินขาวที่ใช้ผสม	=	3,300 ตันต่อปี x 5% x 4 บาทต่อกิโลกรัม
	=	0.66 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัส	=	3,300 (ตันต่อปี) x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	10.56 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของถ่านหินบิทูมินัสที่ทดแทน	=	3,300 (ตันต่อปี) x ค่าความร้อน 14.148 MJ/kg x 0.133 บาท/MJ
	=	6.21 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะต้องเพิ่มงบปีละ 6.21-6.72-0.66 = -1.17 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน	=	1,935 ตันต่อปีหรือ 6.21 ล้านบาทต่อปี

กรณีที่ 3 ใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับดินขาวในอัตรา 100:10 (เน้นปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% ดินขาว 10% โดยน้ำหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง)

3.1 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง	=	8,916 ตันต่อปี x 1.39 บาทต่อกิโลกรัม
	=	12.39 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของดินขาวที่ใช้ผสม	=	8,916 ตันต่อปี x 10% x 4 บาทต่อกิโลกรัม
	=	3.57 ล้านบาทต่อปี
ถ้าใช้ถ่านหินบิทูมินัส 100%	=	126.14 TJ/24.073 MJ/kg x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	16.76 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งจะประหยัดงบได้ปีละ 16.76-12.39-3.57 = 0.8 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน	=	5,238 ตันต่อปี หรือ 16.76 ล้านบาทต่อปี

3.2 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง	=	8,916 (ตันต่อปี) x 2.035 บาทต่อกิโลกรัม
	=	18.14 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของดินขาวที่ใช้ผสม	=	8,916 ตันต่อปี x 10% x 4 บาทต่อกิโลกรัม
	=	3.57ล้านบาทต่อปี
ถ้าใช้ถ่านหินบิทูมินัส 100%	=	126.14 TJ/24.073 MJ/kg x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	16.76 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะต้องเพิ่มงบปีละ 16.76-18.14-3.57 = -4.95 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน = 5,238ตันต่อปีหรือ 16.76 ล้านบาทต่อปี

กรณีที่ 4 ใช้ดินขาว 10% ร่วมกับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด(เน้นการใช้งานในโรงไฟฟ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งปัจจุบันใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆ ร่วม เช่น แกลบ ชานอ้อย และไม้สับ) พิจารณาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีที่ความชื้น 47.65%wb ค่าความร้อน 8,956 kJ/kg เพราะฉะนั้นต้องใช้เปลือกยูคาลิปตัสสดจำนวน 14,084 ตันต่อปี ราคาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสตันละ 65 บาท ดังตารางที่ 4.14

4.1 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด (กรณีไม่มีค่าขนส่ง)

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด	=	14,084 ตันต่อปี x 0.065 บาทต่อกิโลกรัม
	=	0.92 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของดินขาวที่ใช้ผสม	=	8,916 ตันต่อปี x 10% x 4 บาทต่อ กิโลกรัม
	=	3.57 ล้านบาทต่อปี
ถ้าใช้ถ่านหินบิทูมินัส 100%	=	126.14 TJ/24.073 MJ/kg x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	16.76 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดจะประหยัดงบได้ปีละ 16.76-0.92-3.57 = 12.27 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน = 5,238 ตันต่อปี หรือ 16.76 ล้านบาทต่อปี

4.2 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด (กรณีมีค่าขนส่ง)

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด	=	14,084 ตันต่อปี x 0.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	2.82 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของดินขาวที่ใช้ผสม	=	8,916 ตันต่อปี x 10% x 4 บาทต่อ กิโลกรัม
	=	3.57 ล้านบาทต่อปี
ถ้าใช้ถ่านหินบิทูมินัส 100%	=	126.14 TJ/24.073 MJ/kg x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	16.76 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดจะประหยัดงบได้ปีละ 16.76-2.82-3.57 = 10.37 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน = 5,238 ตันต่อปี หรือ 16.76 ล้านบาทต่อปี

4.3 แบบใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดร่วมกับแกลบ 30:70 (กรณีมีค่าขนส่ง)

จากการสำรวจคือปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 523,810ตันต่อปี มีที่ความชื้น 47.65%wb ค่าความร้อน 8,956 kJ/kg เพราะฉะนั้นต้องใช้เปลือกยูคาลิปตัสสดจำนวน 14,084 ตันต่อปี ราคาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสตันละ 65 บาท และแกลบ มีความชื้น 1.07%wb และมีค่าความร้อน 12,774 kJ/kg โดยราคาแกลบปัจจุบัน 1,400 บาท/ตัน ที่จังหวัดขอนแก่น (ม.ค. 2558) เพราะฉะนั้นต้องใช้เปลือกยูคาลิปตัสสดจำนวน 3,290 ตันต่อปี และแกลบจำนวน 7,568 ตันต่อปี

มูลค่าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด	=	3,290 ตันต่อปี x 0.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	0.66 ล้านบาทต่อปี
มูลค่าของแกลบ	=	7,568 ตันต่อปี x 1.4 บาทต่อกิโลกรัม
	=	10.66 ล้านบาทต่อปี
ถ้าใช้ถ่านหินบิทูมินัส 100%	=	126.14 TJ/24.073 MJ/kg x 3.2 บาทต่อกิโลกรัม
	=	16.76 ล้านบาทต่อปี

การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดจะประหยัดงบได้ปีละ 16.76-0.66-10.66 = 5.44 ล้านบาทต่อปี

ลดการนำเข้าของถ่านหิน	=	5,238 ตันต่อปีหรือ 16.76 ล้านบาทต่อปี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.15 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการเลือกใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ดินขาวลดอิทธิพลสำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 1 MW

	ชนิด	ปริมาณเชื้อเพลิง (ตันต่อปี)	มูลค่าเชื้อเพลิง (ล้านบาท)	รวม		ทดแทนถ่านหิน (ตัน)	เพิ่ม-ลด (ล้านบาท)
				ปริมาณ (ตันต่อปี)	มูลค่า (ล้านบาท)		
1.1 ยูคาฯอบแห้ง30:ถ่านหิน 70	ยูคาฯ	1814	2.52	5987	15.87	1065	+0.62
	ถ่านหิน	4173	13.35				
1.2 ยูคาฯอัดแท่ง 30:ถ่านหิน 70	ยูคาฯ	1814	3.69	5987	17.04	1065	-0.28
	ถ่านหิน	4173	13.35				
2.1 ยูคาฯอบแห้ง50:ถ่านหิน 50ดินขาว 5 %	ยูคาฯ	3300	4.59	6600	15.81	1940	+0.96
	ถ่านหิน	3300	10.56				
	ดินขาว*	165	0.66				
2.2 ยูคาฯอัดแท่ง 50:ถ่านหิน 50 ดินขาว 5 %	ยูคาฯ	3300	6.72	6600	17.94	1940	-1.17
	ถ่านหิน	3300	10.56				
	ดินขาว*	165	0.66				
3.1 ยูคาฯอบแห้ง100:ดินขาว 10%	ยูคาฯ	8916	12.39	8916	15.96	5237	+0.8
	ดินขาว*	891.6	3.57				

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.15 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการเลือกใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและเชื้อเพลิงชีวมวล โดยใช้ดินขาวลดอิทธิพลสำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 1 MW (ต่อ)

	ชนิด	ปริมาณเชื้อเพลิง (ตันต่อปี)	มูลค่าเชื้อเพลิง (ล้านบาท)	รวม		ทดแทนถ่านหิน (ตัน)	เพิ่ม-ลด (ล้านบาท)
				ปริมาณ (ตันต่อปี)	มูลค่า (ล้านบาท)		
3.2 ยูคาฯอัดแท่ง100:ดินขาว 10%	ยูคาฯ	8916	18.14	8916	21.71	5237	-4.95
	ดินขาว*	891.6	3.57				
4.1 ยูคาฯสด100:ดินขาว 10%	ยูคาฯ	14084	0.92	14084	4.49	5237	+12.27
	ดินขาว*	891.6	3.57				
4.2 ซื้อยูคาฯสด100:ดินขาว 10%	ยูคาฯ	14084	2.82	14084	6.39	5237	+10.37
	ดินขาว*	891.6	3.57				
4.3 ยูคาฯสด30:แกลบ 70	ยูคาฯ	3290	0.66	10858	11.32	5237	+5.44
	แกลบ	7568	10.66				

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการเลือกใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นทุกกรณี แต่การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะช่วยลดการนำเข้าของถ่านหินได้ เนื่องจากการใช้งานจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ในชุมชนหรือที่มีประชากรมากๆ เพราะจะลดการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO_2) ที่มีในถ่านหินได้ แต่ถ้าใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งจะทำให้ต้นทุนเชื้อเพลิงลดลง 0.62-0.96 ล้านบาทต่อการผลิตไฟฟ้า 1 MW โดยแนวทางการใช้งานที่ทำให้เกิดผลกำไรมากที่สุดคือการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดร่วมกับดินขาวทั้งที่เป็นแหล่งผลิตและซื้อมาเพื่อผลิตไฟฟ้าซึ่งถูกกว่าการใช้ถ่านหินบิทูมินัส 12.27 และ 10.37 ล้านบาทต่อการผลิตไฟฟ้า 1 MW และถูกกว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอื่นร่วม เช่น แกลบ โดยจะได้กำไรสูงขึ้น 60% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แกลบเพื่อลดอิทธิพล การกรัดกร่อน การเกิดตะกรัน และการหลอมตัวในห้องเผาไหม้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สรุปภาพรวมสถานการณ์เปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จากการสำรวจโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปี 2553 พบว่า โรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งหมด 19 จังหวัด พบโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสรวม 17 จังหวัด จำนวน 64 โรงงาน โดยจังหวัดที่มีจำนวนโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสมากที่สุด 3 ลำดับแรกคือ นครราชสีมา สุรินทร์ บุรีรัมย์ ตามลำดับโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ โรงงานที่สับเฉพาะไม้ยูคาลิปตัส จำนวน 44 โรงงาน และที่เหลือเป็นโรงงานที่สับไม้ 13 ชนิดโดยไม้ยูคาลิปตัสส่วนใหญ่จะมีขนาดตั้งแต่ขนาด 1-10 นิ้ว และในกระบวนการผลิตจะมีการแยกเปลือกออกจากเนื้อไม้โดยใช้เครื่องจักร โดยสัดส่วนเปลือกไม้ยูคาลิปตัสต่อเนื้อไม้มีค่าเฉลี่ย 20.5-79.5 และมีความหนาของเปลือกไม้เฉลี่ย 4-6 มิลลิเมตร จำนวนไม้ยูคาลิปตัสซื้อเพื่อมาแปรรูปในแต่ละปี 5,092,392 ตัน จะมีเปลือกไม้ยูคาลิปตัสประมาณ 1,034,940ตันต่อปีและยังไม่มีการนำมาใช้ 523,810 ตันต่อปี ซึ่งอุปสรรคการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดในอุตสาหกรรมหม้อไอน้ำ คือเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นสูง จากการสำรวจพบว่าความชื้นมีค่าเฉลี่ย 47.65%ค่าความร้อนสูงมีค่าเฉลี่ย 16,533 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และความหนาแน่นเป็นชิ้นและเป็นฝอยมีค่าเฉลี่ย 127.45, 215.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งบรรทุกได้ไม่เต็มพิกัดบรรทุก ทำให้ต้นทุนการขนส่งสูง อีกทั้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ไม่ผ่านการสับย่อยจะมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลต่อระบบป้อนเชื้อเพลิง

5.1.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จากการศึกษาขององค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจนมีค่าเฉลี่ย 39.13%, 3.91%, 0.53%, 0.41% และ47.81% ตามลำดับ และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ พบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณเถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวมีค่าเฉลี่ย 9.17%, 69.23% และ 21.61%ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเถ้ามีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลอื่นๆ และมีปริมาณคลอรีน0.98%จากการเก็บเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากแปลงเกษตรกรและแปรรูปทันทีโรงงานพบว่า สมบัติทางกายภาพ เปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีความชื้น 65.90%wb

ถ้าเป็นลักษณะเป็นชิ้นมีความชื้นเฉลี่ย 59.53%wb และเมื่อแปรรูปเป็นฝอยมีความชื้นเฉลี่ย 62.97%wb ซึ่งความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เป็นชิ้นมีค่าต่ำกว่าที่เป็นฝอยเนื่องจากเปลือกไม้ที่เป็นชิ้นจากโรงงานจะมีสัดส่วนของไม้ที่เก็บเกี่ยวไว้ก่อนแล้วมาผสมทำให้ความชื้นเปลือกไม้ที่เป็นชิ้นมีค่าต่ำกว่าโดยเฉลี่ยจากการเก็บตัวอย่างจากโรงงานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ความชื้นมีค่าเฉลี่ย 47.65%wb ด้วยเหตุผลบางโรงงานยังไม่มีการนำไปใช้จึงมีการปล่อยทิ้งไว้จนแห้ง ส่วนความหนาเปลือกมีค่า4-7 มิลลิเมตร และความหนาแน่นเป็นชิ้นและเป็นฝอยมีค่า 127.45 และ 215.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำจะส่งผลต่อการขนส่ง เมื่อนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจะมีความชื้นประมาณ 11-13%wb ความหนาแน่น 715 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

5.1.3 สรุปผลการทดสอบเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งกับหม้อต้มไอน้ำและผลกระทบด้านมลพิษจากไอเสีย

ผลการศึกษาการผลิตไอน้ำด้วยเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและการผสมสารเติมแต่งดินขาวเพื่อลดอิทธิพลการเกิดตะกรัน การเกิดเถ้าหลอม และการกัดกร่อน โดยการทดสอบเบื้องต้นหม้อต้มไอน้ำสามารถทำความดันได้เพียง 10-13 บาร์ แบบต่อเนื่อง และจากการทดสอบแบบต่อเนื่องที่ความดัน 12 บาร์ พบว่า อัตราการผสมสารเติมแต่งดินขาวในเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสส่งผลต่ออุณหภูมิห้องเผาไหม้ ซึ่งอัตราที่ผสมดินขาวได้สูงสุดที่ไม่ส่งผลต่อการผลิตไอน้ำคือ 10% โดยน้ำหนัก โดยการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง 100% จะเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการกัดกร่อนอย่างรุนแรง แต่การใช้เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งสามารถผลิตไอน้ำได้สูงสุดที่ความดัน 12 บาร์ ที่อัตราการผลิตไอน้ำได้ 409.2kg-steam/hr โดยเมื่อผสมดินขาวกับเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก อัตราการผลิตไอน้ำมีค่า 377.4, 366.3 และ 447.4 kg-steam/hr ตามลำดับ โดยที่อัตราผสมดินขาว 12% ต้องใช้แรงงานในการช่วยงัดเตาเมื่อเวลาเถ้าใต้เตาหลอมและปิดช่องลม โดยความดันของไอน้ำที่ผสมดินขาว 12% ทำได้เพียงเฉลี่ย 7.4 บาร์ ซึ่งจะส่งผลต่อการนำไอน้ำไปใช้งานโดยประสิทธิภาพของหม้อต้มที่ใช้เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง100%และผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก มีค่า 53.61, 48.5, 39.2 และ 48.5% ตามลำดับ โดยเมื่อผสมดินขาวเข้าไปในเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำจะลดลงเนื่องจากความร้อนส่วนหนึ่งจะสูญเสียพลังงานไปกับดินขาวและมลพิษทางอากาศอยู่ในระดับมาตรฐานปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO_2) ไม่พบ และคาร์บอนมอนอกไซด์(CO) ออกไซด์ของไนโตรเจน(NO_x) มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานควบคุมการปล่อยทิ้งอากาศเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

5.1.4 สรุปผลการวิเคราะห์ออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือเปรียบเทียบกับเถ้าจากการทดสอบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อต้มไอน้ำ

1. สรุปการวิเคราะห์ออกไซด์ในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีปริมาณด่างอยู่สูง โดยเฉพาะปริมาณแคลเซียมออกไซด์(CaO) สูงถึง 62.66% และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)17.09%ซึ่งออกไซด์ทั้งสองชนิดนี้มีฤทธิ์เป็นด่างโดยเฉพาะปริมาณโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)จะเป็นสาเหตุให้เกิดการจับตัวและการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนได้ง่ายส่วนปริมาณของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) พบว่า สูงกว่างานวิจัย Vassilev, S.V.,et al. (2010) เนื่องจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ทำการสำรวจในภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้รับอิทธิพลจากพื้นที่ เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะประสบปัญหาพื้นที่ดินเค็ม ทำให้มีการสะสมเกลือในพืช ส่วนปริมาณของซิลิคอนออกไซด์จะขึ้นอยู่ประมาณสารที่เจือปน เช่น ดิน และทราย เนื่องจากการจัดเก็บเปลือกไม้ยูคาลิปตัสบนดิน ซึ่งบ้างที่จะมีปริมาณสูงมาก จากการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สามารถสรุปแนวโน้ม การเกิดตะกรัน เถ้าหลอม และการกัดกร่อน ได้ดังนี้ พารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1) พารามิเตอร์AI (Alkali Index)บอกถึงแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนสูง

2) พารามิเตอร์ BAI (Bed Agglomeration Index) บอกถึงจะมีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน

3) พารามิเตอร์$R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) บอกถึงจะมีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนสูง

4)พารามิเตอร์Rsบอกถึงจะมีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนสูงและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์$R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio บอกถึงจะมีแนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย และมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์$R_{b/a}$ ในเชิงสนับสนุน

6) พารามิเตอร์Rf จะพิจารณาค่า $CaO+MgO$เทียบกับ Fe_2O_3 มากกว่า จะพิจารณาแนวโน้มจากปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O) มีค่า 3.29 ซึ่งสูงกว่า 3%บอกถึงจะมีแนวโน้มการจับตัวที่ท่อจะมีในระดับ ต่ำถึงปานกลาง

7) พารามิเตอร์คลอรีน มีค่า 0.98 ซึ่งแนวโน้มการการจับตัวที่ท่อจะรุนแรงมากสนับสนุนกับพารามิเตอร์Rfโดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Stanislav V. Vassilev พบว่า ค่าพารามิเตอร์ AI, BAI และ $R_{b/a}$มีแนวโน้มเดียวกันกับผลการวิจัยซึ่งการใช้เปลือกยูคาลิปตัส

เพียงอย่างเดียวจะส่งผลต่อการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนสูง จากพารามิเตอร์ที่ 1-4 และจะเกิดการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย แนวโน้มการจับตัวที่ท่อจะมีในระดับ ต่ำถึงปานกลาง ซึ่งจากการพิจารณาปริมาณคลอรีนจะมีแนวโน้มรุนแรง

2. สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์จากวัตถุดิบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในการทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1) พารามิเตอร์AI (Alkali Index) บอกถึงมีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

2)BAI (Bed Agglomeration Index) บอกถึงไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน

3) พารามิเตอร์$R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) บอกถึงไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

4)พารามิเตอร์Rsบอกถึงไม่มีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์$R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีแนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย ซึ่งการใช้เปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งเพียงอย่างเดียวพารามิเตอร์AI(Alkali Index)และSilica/Alumina Ratioบอกถึงมีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนเพียงพารามิเตอร์เดียวและพารามิเตอร์ BAI (Bed Agglomeration Index) $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio),Rsบอกถึงไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์เปรียบเทียบกับการทดสอบพบว่า เนื่องจากปริมาณของออกไซด์ในเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งมีปริมาณ ซิลิคอนออกไซด์(SiO_2)สูงกว่าปกติมีค่า53.679%ปริมาณสิ่งเจือปนจะมีผลต่อพารามิเตอร์การทำนายแนวโน้ม ซึ่งจากการทดสอบในหม้อต้มไอน้ำแนวโน้มการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อน รุนแรง เป็นตามพารามิเตอร์ค่า AI (Alkali Index),Silica/Alumina Ratio

3. สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์จากเถ้าหนักของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในการทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1)พารามิเตอร์AI (Alkali Index) บอกถึงไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

2) BAI (Bed Agglomeration Index) บอกถึงไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน

3) พารามิเตอร์$R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) บอกถึงไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

4) พารามิเตอร์Rsบอกถึงไม่มีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio บอกถึงแนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย

6) พารามิเตอร์Rf จะพิจารณาออกไซด์ CaO+MgOเทียบกับ Fe_2O_3 มากกว่าจะพิจารณาแนวโน้มจากปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O) ซึ่งตรวจไม่พบปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O)

7) พารามิเตอร์คลอรีน มีค่า 1.66 ซึ่งแนวโน้มการการจับตัวที่ผิวท่อจะรุนแรงมากการทำนายแนวโน้มจากพารามิเตอร์AI (Alkali Index),BAI (Bed Agglomeration Index) $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) และ Rsบอกถึงไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อนแต่พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio บอกถึงแนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่ายและพารามิเตอร์คลอรีน มีค่า 1.66 ซึ่งแนวโน้มการการจับตัวที่ผิวท่อจะรุนแรงมาก ซึ่งจากการทดสอบในหม้อต้มไอน้ำแนวโน้มการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อน รุนแรง เป็นตามพารามิเตอร์ค่า Silica/Alumina Ratio และ คลอรีน

สรุปการประเมินแนวโน้มการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อน จากพารามิเตอร์ทั้ง 8 ค่าข้างต้น ควรใช้การประเมินออกไซด์จากวัตถุดิบชีวมวลที่มีสภาพใหม่จะมีความถูกต้องมากกว่าการใช้ออกไซด์ของเถ้าหนักและวัตถุดิบที่สิ่งเจอปน เช่น ดินและทราย

5.1.5 สรุปผลของการใช้ดินขาวผสมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อต้มไอน้ำ

1. สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์จากวัตถุดิบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวอัตรา5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก การทำนายแนวโน้มผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1) พารามิเตอร์AI (Alkali Index)มีค่า 0.20, 0.21 และ0.16 ตามลำดับค่า AI อยู่ในช่วง 0.17-0.34 อาจมีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนยกเว้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 12% มีค่า AI ต่ำกว่า 0.17 ซึ่งแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนจะน้อยหรือไม่เกิด

2)BAI (Bed Agglomeration Index) มีค่า 0.25, 0.32 และ 0.14 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.15 Bed ไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน มีเพียงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12% มีแนวโน้มจะจับตัวเป็นก้อนแน่นอน

3) พารามิเตอร์$R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) มีค่า 1.67, 1.39 และ 1.02 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6ไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

4) พารามิเตอร์Rsมีค่า 0.10, 0.13 และ 0.06 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6 ไม่มีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์$R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีค่า 4.28, 4.07 และ 4.88 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 4.0 แนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย

สรุปได้ว่าการวิเคราะห์แนวโน้มจากพารามิเตอร์ที่กำหนดข้างต้น เปรียบเทียบกับการทดสอบ พบว่าพารามิเตอร์ AI (Alkali Index) และพารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีลักษณะคล้ายกับการทดสอบจริง ส่วนพารามิเตอร์อื่นยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อการประเมินไม่ตรงตามทฤษฎี

2. สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์จากเถ้าหนักของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนักการทำนายแนวโน้มผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิดเถ้าหลอมการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนจากพารามิเตอร์ 8 ค่า ดังสมการที่ 3.2-3.7 พบว่า

1)พารามิเตอร์AI (Alkali Index) มีค่า0.16, 0.14 และ0.16 ตามลำดับค่า AI ต่ำกว่า 0.17ไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนยกเว้นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 12% มีค่า AI ต่ำกว่า 0.17 ซึ่งแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อนจะน้อยหรือไม่เกิด

2) BAI (Bed Agglomeration Index) มีค่า 0.30, 0.22 และ 0.23 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า 0.15 Bed ไม่มีแนวโน้มการจะจับตัวเป็นก้อน

3) พารามิเตอร์$R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) มีค่า 1.64, 1.23 และ 1.31 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6 ไม่มีแนวโน้มการเกิดตะกรันและการจับตัวเป็นก้อน

4) พารามิเตอร์Rsมีค่า 0.12, 0.09 และ 0.10 ตามลำดับซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2.6ไม่มีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนและมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์$R_{b/a}$ เช่นเดียวกัน

5) พารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีค่า 6.05, 6.69 และ 5.59 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า 4.0 แนวโน้มการหลอมตัวของเถ้าได้ง่าย

6) พารามิเตอร์Rf จะพิจารณาค่าจากผลการวิเคราะห์ออกไซด์ CaO+MgO เทียบกับ Fe_2O_3 มากกว่า จะพิจารณาแนวโน้มจากปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O) ซึ่งตรวจไม่พบปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O)

สรุปได้ว่าการวิเคราะห์แนวโน้มจากพารามิเตอร์ที่กำหนดข้างต้น เปรียบเทียบกับการทดสอบ พบว่าพารามิเตอร์ Silica/Alumina Ratio มีลักษณะคล้ายกับการทดสอบจริง ส่วนพารามิเตอร์อื่น

ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการประเมินไม่ตรงตามทฤษฎี และเมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ออกไซด์จากวัตถุดิบ การวิเคราะห์ออกไซด์จากวัตถุดิบเพื่อประเมินแนวโน้มจะมีความถูกต้องมากกว่า

3. สรุปผลการวิเคราะห์เถ้าลอยจากการเผาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาวอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก พบว่า เถ้าลอยจากเชื้อเพลิงที่ผสมดินขาว จะมีลักษณะเป็นผลึกและจับตัวเป็นก้อนมากขึ้นและองค์ประกอบหลักของออกไซด์ของเถ้าลอย คือ ซิลิคอนออกไซด์(SiO_2) โดยเมื่อผสมดินขาวลงไปในเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์(CaO)ในเถ้าลดลง เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์(CaO) จะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมออกไซด์(K_2O) กับซิลิคอนออกไซด์(SiO_2) ทำให้จุดหลอมเหลวต่ำลงในเถ้าหนัก ทำให้เถ้าหนักเกิดการหลอมตัวได้ง่ายขึ้น ซึ่งอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้าหนักจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโพแทสเซียมออกไซด์และซิลิคอน โดยการเพิ่มปริมาณแคลเซียมจะทำให้จุดหลอมเหลวของเถ้าลดลงและดินขาวจะดูดซับโพแทสเซียมเป็น $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ โพแทสเซียจะดูดซับไว้ที่ผิวของ Muscovite และทำปฏิกิริยากับ Aluminum-silicate เป็นสารประกอบ $KAlSiO_4$ หรือ Kalsiliteซึ่งเป็น Crystalline และลักษณะเป็น Hexagonal จึงเรียกว่า Kaliophilite (Leucite) ซึ่งเป็น Crystalline เช่นกัน สารประกอบทั้งสองมีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง 1165-1250^{o}C โดยจากการผสมดินขาวในเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจะทำให้ปัญหาการเกิดตะกรันเกาะท่อและการกัดกร่อนจะลดลงจากการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของเฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3)ที่ลดลง ด้วยสาเหตุจากออกไซด์ของเถ้าลอยจากคลอรีน (Cl_2) และไฮโดรคลอริก(HCl)ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเกิดตะกรันและปริมาณกัดกร่อนจากออกไซด์ของเฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3)การใช้ดินขาว 5% จะลดการเกิดตะกรันได้ 59.1% และลดการกัดกร่อนได้ 72.3% โดยประสิทธิภาพลดลง 9.5% ส่วนการใช้ดินขาว 10% จะลดการเกิดตะกรันได้ 77.4% และลดการกัดกร่อนได้ 88.6% โดยประสิทธิภาพลดลง 26.9% ที่ระดับความดันเดียวกัน จากการใช้ดินขาวเพื่อลดอิทธิพลการเกิดตะกรันและการกัดกร่อนจะช่วยลดการบำรุงรักษาและการ Stut-down ได้ เพราะฉะนั้นการเลือกใช้ปริมาณดินขาวสามารถเลือกใช้ได้โดยการเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพที่ลดลงกับค่าซ่อมบำรุงและจำนวนครั้งที่ Stut-down ที่เกิดขึ้นว่าคุ้มค่าหรือไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของหม้อต้มไอน้ำ

5.1.6 สรุปผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งร่วมกับการใช้ดินขาว

ผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของแนวทางการเลือกใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสร่วมกับถ่านหินบิทูมินัสและเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่า การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นทุกกรณี แต่การใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งจะช่วยลดการนำเข้าของถ่านหินได้เนื่องจากการใช้งานจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ในชุมชนหรือที่มีประชากรมากๆ เพราะจะลดการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์(SO_2) ที่มีในถ่านหินได้ แต่ถ้าใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งจะทำให้ต้นทุนเชื้อเพลิงลดลง 0.62-0.96 ล้านบาท ต่อการผลิตไฟฟ้า1 MW โดยแนวทางการใช้งานที่ทำให้เกิดผลกำไรมากที่สุดคือการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดร่วมกับดินขาวทั้งที่เป็นแหล่งผลิตและซื้อมาเพื่อผลิตไฟฟ้าซึ่ง ถูกกว่าการใช้ถ่านหินบิทูมินัส12.27 และ 10.37 ล้านบาทต่อการผลิตไฟฟ้า 1 MW ตามลำดับ และถูกกว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอื่นร่วม เช่น แกลบ โดยจะได้กำไรสูงขึ้น 60% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แกลบเพื่อลดอิทธิพล การกรัดกร่อนการเกิดตะกรัน และการหลอมตัวในห้องเผาไหม้

5.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

เนื่องจากไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทยมีหลายสายพันธุ์และหลายแหล่งผลิตซึ่งสายพันธุ์และพื้นที่เพาะปลูกจะเป็นแหล่งสะสมสารประกอบภายเนื้อหรือเปลือกไม้จะมีความแตกต่างกันไปทำให้การใช้ประโยชน์จากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสควรมีการพัฒนาสายพันธุ์ที่เหมาะสมกับภูมิประเทศ และเกิดประโยชน์มากที่สุด เช่น การพัฒนาพันธุ์ที่มีการสะสมด่างในเนื้อและเปลือกน้อย หรือการพัฒนาไม้ยูคาลิปตัสพันธุ์เปลือกบาง ก็จะเป็นการเพิ่มศักยภาพทั้งด้านการผลิตของอุตสาหกรรมที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัส หรือในกลุ่มโรงไฟฟ้าที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการลดอิทธิพลต่างๆ จากการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสควรมีการศึกษาให้ครบวงจรตั้งแต่ การเลือกสายพันธุ์วิธีการเพาะปลูก การแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิตัส การส่งออก และของเสียที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงจากเปลือกยูคาลิปตัสซึ่งงานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาหาสารเติมแต่งที่เป็นของเสียจากโรงงานมาทดแทนดินขาว เพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้งานเปลือกไม้ยูคาลิปตัสต่อไป

รายการอ้างอิง

กฤษกร รับสมบัติ. (2555). **การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นเชื้อเพลิง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตรและอาหาร), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ประสาน สถิตเรืองศักดิ์ สราวุฒิสังวรกาญจน์ นริศรา อินทรจันทร์ และ วิชชุลดา ชัยพร. (2553). การแก้ปัญหาการเกิด Fouling และ Sintering ในหม้อไอน้ำเพื่อนำทะลายปาล์มเปล่า(EFB) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับในผลปาล์มและกะลาปาล์มในการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำในโรงงานน้ำมันปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพ. **กองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.)**

ณัฐ วรยศ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์นคร ทิพยาวงศ์ ณัฐนี วรยศณัฐวุฒิ ดุษฎี ชูรัตน์ ธารารัตน์ และ อติพงษ์ นันทพันธ์. (2551). **การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าระดับชุมชนโดยใช้พลังงานจากไม้โตเร็ว**. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

นคร ทิพยาวงศ์. (2553). **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. สำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น): หน้า 109.

ประเสริฐ ชุมรุม และ คณะ. (2554). เทคโนโลยีการทำเหมืองถ่านหิน.[ออนไลน์]. Available: http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal_analysis3.html

เยาวนุช บริสุทธิพงศากุล.(2556).**เกษตรแบบมีสัญญา: ความต้องการไม้ยูคาลิปตัสของไทย. สำนักความร่วมมือทางการค้าและการลงทุน**. กรมการค้าต่างประเทศ. [ออนไลน์]. Available: http://bts.dft.go.th/btsc/files/Border%20Trade%20Service%20Center/4.Documentanalysis/10.ACMECS/7__Agricultural_contracts__Needs_eucalyptus_Eucalyptus_of_Thailand.PDF

วีรชัย อาจหาญ. (2554).**โครงการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม**. กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน แผนพลังงานทดแทน, สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน: กระทรวงพลังงาน.

วรพจน์ ขำพิศวีรชัย อาจหาญชาญชัย โรจนสโรช พยุงศักดิ์ จุลยุเสน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ พงษ์ชัย จิตตะมัย พรรษา ลิบลับ วิบูลย์ เทเพนทร์เวียง อากรชี พินิจ จิรัคคกุล ทิพย์สุภินทร์ หินซุยศรัลย์ ปานศรีพงษ์สุภัทร หนูแย้ม ณัฐพงษ์ ประภาการ สาวิตรี คำหอม ปภัส ชนะโรค พจนาลัย ชาวห้วยหมาก นิวัฒน์ คงกะพี้และ กิตติยาภรณ์ รองเมือง. (2553).**โครงการศึกษาแนวทางบริหารจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (ระดับชุมชน)**.กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนพลังงานทดแทน, สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน: กระทรวงพลังงาน.

สาวิตรี คำหอม และ วีรชัย อาจหาญ. (2551).**การศึกษาผลกระทบของสมบัติของเชื้อเพลิงต่อค่าความร้อน**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สมคิด สลัดยะนันท์. (มปป). **เครื่องกำเนินไอน้ำ**. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตร “การประหยัดพลังงานและการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อสนับสนุนแผนงานภาคบังคับ”, กองฝึกอบรมกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: นนทบุรี

Akkaya, A.V. (2009). Proximate analysis based multiple regression models for higher heating value estimation of low rank coals.**Fuel Processing Technology**, vol.90 (2); February: pp.165-170.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (1991). **Standard methods for chemical analysis of wood charcoal. ASTM D1762-84**. Philadelphia. Pa. USA.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (1991). **Standard test method for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter**.**ASTMD2015-77**. Philadelphia. Pa. USA.

Amos, W.A. (1998). **Report on Biomass Drying Technology**. National Renewable Energy Laboratory, Midwest Research Institute: 17pp.

Arjharn, W., Hinsui, T., Liplap, P., and Vijaya Raghavan. (2012). Evaluation of energy production from different biomass feedstock using a pilot scale downdraft gasifier. **Journalof Biobased Materials and Bioenergy**. 6(3): 309-318.

Barisic, V., Zabetta, E.D., and Sarkki, J. (2010). **Prediction of Agglomeration, Fouling, and Corrosion Tendency of Fuels in CFB Co-Combustion**. The 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, pp.416-421.

Demirbas, A. (2007). The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, vol.88(6): pp.591-598.

Energy Solutions Center. (2007). **Boiler Introduction**. [On-line]. Available:http://www.foodtechinfo.com /FoodPro/GasTechnologies/boilers.htm

Institute of Engineering and Rural Technology. (2011). **Mechanical Stokers-Power Plant**. [On-line]. Available: http://iert.in/mechanical-stokers-power-plant/

Lundgren, J., Hermansson, R., and Dahl, J.(2004). **Experimental studies during heat load fluctuations in a 500kW wood-chips fired boiler**. Biomass and Bioenergy, vol.26(3); March: pp.255-267.

Nielsen, H.P., Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K., and Baxter, L.L. (2000).**The implication of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers**.Progress in Energy and Combustion Science, vol.26(3): pp.283-298.

Nussbaumer, T. (2001). **Aerosols from Biomass Combustion**, International Seminar, Bioenergy Task 32: Biomass Combustion and Cofiring and the Swiss Federal Office of Energy; Verenum: Switzerland.

Pronobis, M. (2006). **The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency**. Fuel, vol.85(4); March: pp.474–480.

Riedl, R., Dahl, J., Obernberger, I., and Narodoslawsky, M. (1999). **Corrosion in fire tube boilers of biomass combustion plants**. The 99th China International Corrosion Control Conference, October; Beijing, China: 5pp.

Romeo, L.M., and Gareta, R. (2009). Fouling control in biomass boilers. **Biomass and Bioenergy**, vol.33(5): pp.854–861.

Sarin, V., and Pant, K.K. (2006). Removal of chromium from industrial waste by using eucalyptus bark. **Bioresource Technology**, vol.97(1); pp.15-20.

Senelwa, K., and Sims, R.E.H. (1999). Fuel characteristics of short rotation forest biomass.**Biomass & Bioenergy**, vol.17(2); August: pp.127-140.

Sharma, A., Saikia, A., Khare, P., Dutta, D.K., and Baruah, B.P. (2014). **The chemical composition of tertiary Indian coal ash and its combustion behaviour – a statistical approach : Part 2.** Journal of Earth System Science, vol.123(6); August: pp.1439-1449.

Singh, P. K., Singh, A. L, Kumar, A., and Singh, M. P. (2011). **A study on removal of selected major elements from Indonesian coal through bacteria: Environmental implications**. The International Conference on Energy, Environment, Sustainable Development, Thailand; vol.75: pp.925-935.

Singh, P.K., Singh, M. P., Singh, A. K., and Naik, A. S. (2012). **Petrographic and geochemical characterization of coals from Tiru valley, Nagaland, NE India**. Energy Exploration and Exploitation, vol.30(2); july: pp.171-192.

Singh, P. K., Singh, A. L., Kumar, A., and Singh, M. P. (2012). Mixed bacterial consortium as an emerging tool to remove hazardous trace metals from coal. **Fuel**, vol.102; december: pp.227-230.

Sorensen L.H., Fjellerup, J., and Henriksen, U. (2001). **A Method for reducing agglomeration, sintering and deposite formation in gasification and combustion of biomass**. United States Patent WO 2001005911 A2.

Suramaythangkoor, T., and Gheewala, S.H. (2010). Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand. **Applied Energy,** vol.87(1): pp.128-133.

Theis, M., Skrifvars, B.J., Hupa, M., and Tran, H. (2006). **Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels**. **Part 1: Deposition rates**. Fuel, vol.85; may: pp.1125-1130.

Trabue Industrial Systems. (2011). **Firetube**. [On-line]. Available: http://trabue.com/content/view/23/37/

van Loo, S., and Koppejan, J. (2008). **The handbook of biomass combustion & co-firing**. Earthscan, London.

Vassilev, S.V., and Vessileva, C.G. (2009). **A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal. 1.Chemical and mineral classification system**. Fuel, vol.88(2); february: pp.235–245.

Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., and Vassileva, C.G. (2010). **An overview of the chemical composition of biomass**. Fuel, vol.89(5); may: pp.913-933.

Williams, R.H., and Larson, E.D. (1992). **Advanced Gasification-Based Biomass Power Generation in eds**. Renewables for Fuels and Electricity, Island Press; Washington D.C: pp.729-786. [On-line]. Available: http://www.fao.org/docrep/T1804E/t1804e0b.htm

Xie, J.J., Yang, X.M., Zhang, L., Ding, T.L., Song, W.L., and Lin, W.G. (2007). **Emissions of SO_2, NO and N_2O in a circulating fluidized bed combustor during co-firing coal and biomass**. Journal of Environmental Sciences, vol.19(1): pp.109-116.

Zabetta, E.C., Barisic, V., and Moulton, B. (2009). **Foster Wheeler references and tools for biomass- and waste-fired CFBs**. The 34th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems Clearwater, may 31-june 4; Florida: USA.

Zbogar, A., Jensen P.A., Frandsen, F., Hansen, J., and Glarborg, P. (2006). **Experimental Investigation of Ash Deposit Shedding in a Straw Fired Boiler**. Energy and Fuels,vol.20(2): pp.512-519.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกก

แบบสอบถามเก็บข้อมูล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ตัวอย่างแบบสอบถามการเก็บข้อมูล

NO……………………….

การสำรวจปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสฯ

ว/ด/ป……………..……......

จังหวัด..............................

1. ชื่อ(โรงงาน) :..

2 ที่อยู่ :..

....

3. ปริมาณการผลิตไม้สับ

3.1 ระยะเวลาการผลิต : ………………………………ถึง……………………….………………

3.2 ปริมาณไม้เข้า : .... .ตัน/เดือน

3.2.1 : ปริมาณไม้เข้าสูงสุด...ตัน/เดือน

3.3 ขนาดที่ไม้เข้า : ....นิ้ว

3.4 ปริมาณการส่งไม้สับ: ....

4. การนำไปใช้ประโยชน์

4.1 : เปลือกไม้...

4.2 : เนื้อไม้...

5. ราคา(ซื้อ/ขาย)

5.1 : เปลือกไม้..บาท/ตัน

☐ขายให้บริษัทใช้เชื้อเพลิง ราคา..บาท/ตัน

☐ขายให้เกษตรกรราคา...บาท/ตัน

☐ ให้ฟรี ☐ ลูกไร่ ☐ เกษตรกรทั่วไป

☐ไม่เคยขาย

5.2 : เนื้อไม้...บาท/ตัน

6. รูป : ☐ถ่าย ☐ ไม่ถ่าย

7. เก็บตัวอย่าง : ☐อนุญาตให้เก็บตัวอย่าง☐ไม่อนุญาตให้เก็บตัวอย่าง

8. เปลือกยูคาลิปตัสแบบ : ☐ฝอย☐ชิ้น

9. มีเครื่องสับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสหรือไม่ : ☐มี (ถ้ามีให้ตอบข้อ 9.1) ☐ ไม่มี

9.1 เครื่องสับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสขนาด...แรงม้า/kW

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

10. คุณทราบสัดส่วนปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสต่อปริมาณเนื้อไม้ยูคาลิปตัสหรือไม่ :

☐ รู้ (ถ้ารู้ให้ตอบข้อ 10.1) ☐ ไม่รู้

10.1 : สัดส่วนปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสต่อปริมาณเนื้อไม้ยูคาลิปตัส ……………..……… :
………………….……..

11. ตำแหน่งที่ตั้ง(GPS) : ....

12. ท่านมีแนวทางการจัดการเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของท่านหรือไม่ : ☐ มี (ถ้ามีให้ตอบข้อ 12.1) ☐ ไม่มี

12.1 แนวทางการจัดการเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของบริษัท

....

....

....

....

12.2 มีความต้องการ/สนใจการจัดการเปลือกไม้ยูคาลิปตัสหรือไม่

☐ มีความต้องการ/สนใจจัดการเอง

☐ มีความต้องการ/สนใจร่วมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

☐ ไม่สนใจ

13. ต้องการให้แจ้งข้อมูลการวิเคราะห์ของบริษัทท่านกลับหรือไม่

☐ ต้องการ

☐ ไม่ต้องการ

14. กระบวนการผลิต : ....

....

....

....

....

....

15. ผู้ให้ข้อมูล : ....

ผู้สำรวจ

....

วันที่.............................

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกข

ผลการสำรวจโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
1	นครราชสีมา	001	อุดมโชคพืชผล	48 ม.11 ต.แชะ อ.ครบุรี จ.นครราชสีมา 30250	14° 31' 30"N, 102° 15' 37" E
2		002	บจก.รังสินันท์วู๊ด ชิพ	198 ม.8 ต.บ้านใหม่ อ.ครบุรีจ.นครราชสีมา 30250	14° 31' 8"N, 102° 15' 43" E
3		003	บ.เอ็มเอช ไอสิน เกษตร จำกัด	99/1 ม.14 ต.พญาเย็น อ.ปากช่องจ. นครราชสีมา 30320	-
4		004	บ.โคราช วู๊ด ชิพ จำกัด	133 ม.4 ทางหลวงหมายเลข 24 ต.โคกไทย อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา 30150	14°44'55.76"N, 102° 04' 50.17" E
5		005	บ.สีคิ้ว วู๊ด ชิพจำกัด	169/63 ม.7 ต.ทับกวาง อ.แก้งคอย จ.สระบุรี 18260	14° 52' 19.28"N 101° 43' 08.55" E
6		006	บ. ธ.อินเตอร์ จำกัด	67 ม.3 ถ.สีคิ้ว-ชัยภูมิ ต.สีคิ้ว อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา 30140	14° 57' 28"N, 101° 40' 23.09" E
7		007	บ.นำเจริญยูคา จำกัด	4 ม.13 ต.หนองหัวแรด อ.หนองบุญมาก จ.นครราชสีมา 30410	14° 45' 45.24"N 102° 19' 50.26" E

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
8	นครราชสีมา	008	หจก.ราชสีมาสิทธิ ศักดิ์วู๊ดชิพ	221 ม.6 ต.หนองหัวแรดอ.หนองบุญมาก จ.นครราชสีมา 30410	14° 45' 45.24"N, 102° 19' 50.26" E
9		009	หจก.รังสินันท์สาขา หนองบุญมาก	150 ม.6 ต.ไทยเจริญ อ.หนองบุญมาก จ.นครราชสีมา 30410	14° 42' 47.88"N, 102° 27' 24.75" E
10		010	บ.ฟ้าประทาน รุ่งเรืองจำกัด	99 ม.3 บ.ละโว้ ต.ประสุข อ.ชุมพวงจ. นครราชสีมา 30270	15° 17' 58.36"N, 102° 42' 50.14" E
11		011	บ. ไทวู๊ดชิพ จำกัด	77 ม.15 ต.โนนหรั่ง อ.ชุมพวงจ. นครราชสีมา 30270	-
12		012	บ.สยามฟอเรสทรี จำกัด	309 ม.17 บ.ตะบอง ต.โบสถ์อ.พิมาย จ.นครราชสีมา	15° 13' 50.90"N, 102° 34' 26.56" E
13		013	ลานไม้บัวใหญ่ 1,2	353 ถ.นิเวศรัตน์ ต.บัวใหญ่อ.บัวใหญ่ จ.นครราชสีมา 30120	15° 35' 47.54"N, 102° 25' 21.04" E

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
14	นครราชสีมา	014	บ.อีเลฟเว่นอีเลฟเว่นอินดัสเทรียล จำกัด	279 ม.5 ถ.สายเมืองคง-บ้านเหลื่อมต.เมืองคง อ.คง จ.นครราชสีมา 30260	15° 27' 33.66"N, 102° 20' 19.93" E
15	บุรีรัมย์	039	โตมีซะ	379 ม.10 ถ.บุรีรัมย์-พุทไธสง ต.คูเมืองจ. บุรีรัมย์ 31190	15°14' 36.98" N, 102° 59' 53.05" E
16		042	บ.ฟ้าประทานรุ่งเรืองจำกัด (ศรีบุรีรัมย์)	154 ม.12 ต.ร่อนทอง อ.สตึก จ.บุรีรัมย์ 31150	15° 14' 11"N, 103° 13' 57" E
17		040	บ.มณีราชกิจ6 จก.	388 ม.1 ต.จันดุม อ. พลับพลาชัย จ.บุรีรัมย์	14° 39' 24" N, 103°6' 13" E
18		024*	บ. เคเอ็ม ไอ ฟอเรส จำกัด.	115 ม. 11 ถ.บุรีรัมย์-คูเมือง ต.พรสำราญ อ.คูเมือง จ.บุรีรัมย์ 31190	-
19		041	บ.ป่าใหญ่อุตสาหกรรมจก.	50 ม.5 ถ.ละหานทราย-บ้านกรวด ต.ตาจง อ.ละหานทราย จ. บุรีรัมย์ 31170	14° 25' 7"N, 102° 56' 45" E
20		043	บ.วงศ์วานิช จก.	16 ม.6 ต.หนองบัว อ.ปะคำจ.บุรีรัมย์ 31220	14° 25' 50"N, 102° 39' 2" E

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
21	ศรีสะเกษ	047	เบญจพลการชั่ง	118 ม.10 ต.หว้านคำ อ. ราศีไศล จ.ศรีสะเกษ 33160	15° 23' 53.8" N, 104°12' 29.3" E
22		051	ส.เจริญทรัพย์	120 ม.9 ต.กันทรอม อ.ขุญหาญ จ. ศรีสะเกษ 33150	14° 34' 28.7"N, 104°20' 52.3" E
23		052	ชัยโยเบญจลักษณ์	112 ม.5 ต.ท่าคล้อ อ.เบญจลักษณ์ จ.ศรีสะเกษ33110	14° 46' 38.6"N, 104° 45' 39.3" E
24	อุบลราชธานี	049	หจก.คณากิจ ก่อสร้าง (เกษตร ธัญญอุบล)	72 ม.9 ถ.ชยางกูร ต.ยาง โยภาพอ.ม่วงสามสิบ จ.อุบลราชธานี	15° 13' 17.2"N, 104° 52' 46.5" E
25	อำนาจเจริญ	048	หจก. 3 เค เครือ เกษตร	123 ม.7 ต.นายม อ. เมือง จ.อำนาจเจริญ	15° 50' 33"N, 104° 29' 40.9" E
26	ยโสธร	056*	ยโสธร วู๊ดชิพ	102 ม.1 ต.กระจาย อ.ป่าติ้ว จ.ยโสธร	15° 47' 45.3"N, 104° 17' 58.3 " E
27		050	หจก.เกษตรธัญญ เจริญลานมัน	226 ม.5 ต.โคกสำโรง อ.เริงนกทา จ.ยโสธร	16° 6' 43.9" N, 104° 36' 30.4" E

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
28	มุกดาหาร	046	หจก.พนาสินพูนทรัพย์	222 ม.12 ซ.บ้านคำป่าหลาย ถ.ชยางกูร ต.คำป่าหลาย อ.เมืองมุกดาหาร จ.มุกดาหาร	16° 42' 53.2" N, 104° 39' 57.5" E
29	ร้อยเอ็ด	045	บ.ฟ้าประทานรุ่งเรืองจก.(ศรีบ้านไผ่)	68 ม. 6 ต.น้ำอ้อม อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด	15° 37' 33.72"N, 103°31' 11.31" E
30		044	บ.อี ซี ที วู๊ดมิลล์ จำกัด	17 ม.2 ถ.ปัทมานนท์ ต.เกษตรวิสัย อ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด 45150	15° 38'58"N, 103° 37' 51" E
31		026	สุวรรณภูมิวู๊ดชิพ จำกัด	42 ม.8 ต.ทุ่งหลวง อ.สุวรรณภูมิ จ.ร้อยเอ็ด 45130	15° 29' 7.9" N, 103° 46' 19.6" E
32		025	สมทรัพย์วู๊ดชัพพลายจำกัด	9 ม.2 ถ.ปัทมานนท์ ต.เกษตรวิสัยอ.เกษตรวิสัย จ.ร้อยเอ็ด 45150	-
33		054	ส.รุ่งเรืองกิจ	133 ม.9 ถ.โพนทอง-หนองพอก ต.กกโพธิ์ อ.หนองพอก จ.ร้อยเอ็ด 45210	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
34	สุรินทร์	016	ทรัพย์อนันต์	351 ม.10 ถ.สุรินทร์-ศรีสะเกษ(226) ต.สำโรงทาบอ.สำโรงทาบจ.สุรินทร์ 32170	15° 0' 30.6"N, 103°38' 7.8" E
35		021	ทุ่งกุลาวู๊ดชิพ การเกษตร	18 ม.7 ถ.ท่าตูม-ชุมพลบุรี ต.พรมเทพ อ.ท่าตูม จ.สุรินทร์ 32170	15°22' 4.2"N, 103° 38' 0" E
36		017	บ.โชคศิริบูมวู๊ดชิพ อุตสาหกรรม จำกัด	21 ม.11 ต.บ้านพลวง อ.ปราสาท จ.สุรินทร์ 32140	14° 35' 42.8"N, 103° 26' 37.9" E
37		019	บ.ดิจิตอล พลาซ่า จำกัด	-	14° 36' 47.3"N, 103° 18' 16.9" E
38		055	บ. ศรีวัฒนา โกลเด้น วูดจำกัด	25/3 ม.8 ถ.สุรินทร์-สังขะ ต.เทนมีย์ อ.เมืองสุรินทร์ จ.สุรินทร์ 32000	14° 49' 33.6"N, 103° 33' 34.0" E
39		023	บ.ไทยวิวัฒน์คอร์ ปอเรชั่น	99 ม.6 ซ.บ้านบุฤาษีถ.สุรินทร์-ศีขรภูมิ ต.บุฤาษี อ.เมืองสุรินทร์จ.สุรินทร์ 32000	14° 88' 86 "N, 103° 57' 29.4" E

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
40	สุรินทร์	015	บี เคดับเบิ้ลวู๊ด	158 ม.6 ต.ทุ่งกุลา อ.ท่าตูม จ.สุรินทร์ 32120	15° 24' 40.3"N, 103° 40' 39.4" E
41		022	หจก. สุขขียิ่งเจริญ	279 ม.1 ต.ไพรขลา อ.ชุมพลบุรี จ.สุรินทร์ 32190	15° 20' 38.6"N, 103° 31' 46.3" E
42		018	บ.สุวรรณภูมิไม้ไทยจำกัด(มังกรทอง)	99 ม.2 ต.โพนครก อ.ท่าตูม จ.สุรินทร์ 32120	15° 23' 12.9"N, 103° 42' 11.1" E
43		020	บ.เอส บี ที เคเค	175 ม.1 บ.ไพรขลา อ.ชุมพลบุรี จ.สุรินทร์	18° 20' 46.9"N, 103° 32' 34.5" E
44	ขอนแก่น	029	บ. ร่มโพธิ์ทอง	34 ม.4 ต.ไทรมูล อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น	16° 46'3 "N, 103° 10' 1" E
45		030	บ. เอสคาล่า จำกัด	219 ม.6 ต.ห้วยยาง อ.กระนวน จ.ขอนแก่น	16° 51'47"N, 103° 6' 19" E
46		031	บ. ศรีบ้านไผ่	186 ม.11 ต.หินตั้ง อ.บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น	16° 2' 29"N, 120° 51' 9" E
47		058*	สวรรค์สร้าง	114 ม.4 ต.นาข่า อ.มัญจาคีรี จ.ขอนแก่น	16° 5' 16"N, 102° 25' 11" E

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
48	อุดรธานี	032	บ. ศรีบ้านไผ่	228 ม.13 ถ.มิตรภาพ ต.ปะโคอ.กุมภวาปี จ.อุดรธานี	-
49		027	ไม้สับเทพเจริญ	ม.4 ต.เชียงเพ็ง อ.กุดจับ จ.อุดรธานี	17° 28'19 "N, 102° 41' 31" E
50		038	หจก. เพาเวอร์ชิพ	84 ม.5 ต.บ้านยวด อ.สร้างคอม จ.อุดรธานี	-
51		028	นางค้ำนางคูณ	ม.12 ต.เชียงเพ็ง อ.กุด จับ จ.อุดรธานี 41250	17° 32' 45"N, 102° 43' 47" E
52	ชัยภูมิ	058*	เสกสรรจอสูงเนิน	ม.5 ถ.ลาดใหญ่-คอน สวรรค์ ต.หนองขาม อ.คอนสวรรค์ จ.ชัยภูมิ	15° 15' 14"N, 102° 13' 49" E
53	กาฬสินธุ์	036	บ. ซี แอนด์เอส เพาเวอร์ จำกัด	193 ม.5 ต.กมลาไสย อ.กมลาไสย จ. กาฬสินธุ์	16° 20' 2"N, 130° 34' 47" E
54		035	หนองแสงรุ่งเรือง	138 ม.4 ถ.กาฬสินธุ์-สกลนคร (213) ต.ผาเสวย อ.สมเด็จจ. กาฬสินธุ์	16° 45' 35"N, 103° 47' 35" E

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
55	หนองบัวลำภู	037	หจก. พรทิพย์พืชผล	117 ม.13 ต.ศรีบุญเรือง อ.ศรีบุญเรือง จ.หนองบัวลำภู	16° 56' 45"N, 102° 15' 43" E
56		033	โรงงานไม้สับศุภชัย	47 ม.2 ต.เทพคีรี อ.นาวัง จ.หนองบัวลำภู 41000	17° 19' 38"N, 102° 6' 48" E
57	หนองคาย	060	พัณณ์ชิตา ค้าไม้	223 ม.1 ต.สระใคร อ.สระใคร จ.หนองคาย	17° 41' 47"N, 102° 46' 54" E
58	เลย	053	ศรีเลิศเชียงเหงียม	อ.ภูกระดึงจ.เลย	16° 53' 38"N, 101° 55' 11" E
59	สกลนคร	034	พีเอสพีเพิ่มพูน	538 ม.3 ต.วานรนิวาส อ.วานรนิวาส จ.สกลนนคร 471200	17° 38' 50 "N, 103° 45' 17" E
60		061*	เบิ้มวู้ดชิพ	-	17° 32' 0"N, 103° 28' 16" E
61		062*	แชมป์ชิพไม้	37 ม.5 ถ.สนามชัย-นาบัว ต.ทุ่งตะบก อ.เจริญศิลป์ จ.สกลนคร 47290	17° 34' 45"N, 103° 32' 22" E
62		063*	เกตพงศ์ ไพม่วง	159 ม.8 ต.กุดเรือคำ อ.วานรนิวาศ จ. สกลนคร	17° 45' 14"N, 103° 38' 58" E

ตารางที่ ข.1 ผลการสำรวจโรงงานแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	รหัส	ชื่อโรงงาน	ที่อยู่	พิกัด GPS
63	สกลนคร	057*	พูลสมบัติพืชผล	28 ม.9 ต.กุดเรือคำ อ.วานรนิวาส จ. สกลนคร 47120	17° 45' 14"N, 103° 39' 01" E
64	ขอนแก่น	064*	ฟินิคซ์พัลพแอนด์เพเพอร์ จำกัด มหาชน	99 ม.3 ต.กุดน้ำใส อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น	16° 40' 25"N, 102° 48' 04" E

หมายเหตุ * โรงงานไม่อนุญาตให้นำตัวอย่างมาวิเคราะห์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกค

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง
ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและยูคาลิปตัสอัดเม็ด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

รหัส	M_0	Proximate (%)			HHV	Ultimate (%)				
	(%)	V	A	FC	kJ/kg	C	H	N	S	O
001	62.75	72.81	5.12	22.07	17396.00	41.90	4.76	0.45	0.06	47.71
002	67.13	70.55	5.22	24.23	15456.31	38.30	4.66	0.42	0.05	51.35
003	51.56	69.04	7.36	23.60	16672.00	36.30	4.18	0.42	0.03	51.71
004	14.35	69.80	7.11	23.09	15583.00	37.80	4.15	0.36	0.03	50.55
005	7.13	67.75	11.01	21.24	15855.00	45.80	4.48	0.50	0.03	38.18
006*	58.51	38.38	49.59	12.03	6453.00	24.10	1.31	0.74	0.00	24.26
007	26.28	69.10	9.31	21.59	15913.00	37.30	4.18	0.56	0.02	48.63
008	56.77	67.09	8.65	24.26	16283.53	35.40	3.91	0.42	0.02	51.60
009	60.45	66.66	13.87	19.47	17798.00	41.60	4.89	0.44	0.02	39.18
010	65.92	65.56	10.74	23.70	16734.22	46.60	5.05	0.49	0.01	37.11
011	15.09	66.10	10.16	23.74	15915.02	43.40	4.42	0.46	0.02	41.54
012	64.89	63.45	10.03	26.52	17174.87	40.40	4.60	0.39	0.03	44.55
013	61.00	79.84	1.18	18.98	19352.00	43.70	4.71	0.45	0.08	49.88
014	58.00	73.10	0.79	26.11	19462.00	42.20	4.61	0.57	0.06	51.77
033	6.25	73.45	6.04	20.51	17209.66	40.1	3.93	0.65	0.47	48.81
034	40.84	74.94	4.70	20.36	17564.26	44.8	4.54	0.84	0.64	44.48
035	42.65	71.01	5.72	23.27	17599.24	35.4	3.28	0.16	1.27	54.17
036	41.00	74.25	4.84	20.91	17610.37	36.5	3.72	0.09	0.83	54.02
037	42.10	82.68	1.54	15.78	17569.03	43.4	3.97	0.13	1.31	49.65
038	55.00	72.23	6.33	21.44	17583.34	37.8	3.28	0.1	0.61	51.88
039	6.95	73.05	7.05	19.90	16723.00	37.7	2.90	0.91	0.39	51.05
040	66.83	70.26	9.75	19.99	17494.29	38.6	3.2	0.93	0.29	47.23
041	66.05	70.61	7.27	22.12	16002.00	35.1	3.49	0.95	0.45	52.74
042	44.49	70.80	8.12	21.08	15659.00	37.6	2.84	0.93	0.63	49.88
043	64.36	69.41	8.89	21.70	17406.84	40.7	3.83	0.72	0.49	45.37

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

รหัส	M_0	Proximate (%)			HHV	Ultimate (%)				
	(%)	V	A	FC	kJ/kg	C	H	N	S	O
044	58.36	71.25	7.81	20.94	17524.50	37.5	3.39	0.74	0.48	50.08
045	39.14	71.91	6.44	21.65	17499.06	41.3	4.55	0.90	0.41	46.40
046	60.33	69.87	8.62	21.51	17596.06	37.9	3.37	0.83	0.37	48.91
047*	38.86	36.27	46.89	16.84	7010.00	26.4	4.75	0.11	1.36	20.49
048	64.91	68.77	6.49	24.74	17562.67	36.8	2.89	0.82	0.5	52.50
049	62.86	73.26	5.03	21.71	16801.00	42.6	4.26	0.10	0.49	47.52
050	62.07	70.76	4.98	24.26	17529.27	37.4	2.82	0.88	0.24	53.68
051	36.00	79.12	2.46	18.42	17573.80	41.6	3.75	0.11	1.05	51.03
052	62.97	71.81	6.76	21.43	17616.73	39.1	3.86	0.94	0.44	48.90
053	35.93	68.00	5.00	27.00	17479.98	46.3	4.41	0.12	1.19	42.98
เฉลี่ย	47.65	69.23	9.17	21.61	16533.20	39.13	3.91	0.53	0.41	46.85

หมายเหตุ 1) * เปลือกไม้ยูคาลิปตัสของโรงงานรหัส 006 และ 047 มีสภาพผุยุ่ย มีเนื้อเป็นสีดำ เนื่องจากไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ ทางโรงงานกองทิ้งไว้เป็นระยะเวลามากกว่า 1 ปี จึงทำให้คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงลดลงเกิดเถ้าสูง

2) โรงงานที่ไม่อนุญาตให้เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์179 คือโรงงานรหัส024, 054ถึง 064 จึงไม่มีผลการวิเคราะห์

ตารางที่ ค.2ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

ตัวอย่าง	Ultimate (%)				
	C	H	N	S	O
1.เปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด	41.90	4.76	0.45	0.06	47.71
2.เปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด+kaolin 5%	38.30	4.66	0.42	0.05	51.35
3.เปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด+kaolin 10%	36.30	4.18	0.42	0.03	51.71
4.เปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด+kaolin 12%	37.80	4.15	0.36	0.03	50.55

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยวิธี

Standardless Method/X-ray Fluorescence Energy Dispersive Spectrometer

Model XGT-5200

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.1ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

รหัส	ผลการทดสอบ (%Wt)										
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	SO_3	MnO	Fe_2O_3	TiO_2
001	1.88	N.D.	0.98	2.19	0.74	11.20	28.70	0.14	5.06	0.81	N.D.
002	1.90	0.45	0.76	1.33	0.88	12.60	34.80	0.13	2.39	0.54	N.D.
003	2.14	0.30	0.57	1.29	0.46	11.10	39.40	0.12	3.37	0.50	N.D.
004	1.81	0.49	0.44	1.48	0.32	11.20	36.70	0.14	3.76	0.81	N.D.
005	1.79	0.56	1.84	3.80	0.57	8.58	23.30	0.36	2.08	5.48	0.44
006	2.32	0.21	0.98	5.67	0.32	1.79	59.20	0.09	2.31	2.41	0.27
007	2.22	N.D.	0.35	0.68	0.22	8.06	43.40	0.09	3.12	0.24	N.D.
008	2.10	0.51	0.79	1.65	0.26	9.89	38.40	0.10	3.08	3.05	0.35
009	1.80	0.38	0.35	0.87	0.34	9.15	36.70	0.08	2.64	0.65	N.D.
010	1.99	0.58	0.33	0.74	0.37	8.84	29.20	0.10	3.97	1.38	N.D.
011	1.15	N.D.	0.33	1.28	0.07	3.92	40.50	0.08	3.23	1.11	0.08
012	2.30	0.29	0.26	0.44	0.75	9.30	38.60	0.06	3.43	0.05	N.D.
013	2.23	N.D.	0.34	2.90	0.40	14.60	26.90	0.32	2.20	0.35	N.D.
014	1.90	0.67	0.68	1.92	0.20	9.59	31.00	0.26	6.25	0.24	N.D.
033	1.86	1.08	0.55	1.62	N.D.	13.20	27.10	1.18	1.54	6.45	N.D.

ตารางที่ ง.1ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

รหัส	ผลการทดสอบ (%Wt)										
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	SO_3	MnO	Fe_2O_3	TiO_2
034	1.81	0.49	0.64	2.12	N.D.	6.91	32.50	1.60	0.61	3.94	N.D.
035	1.15	0.67	1.23	19.90	N.D.	8.96	22.10	3.16	0.45	1.27	0.37
036	2.50	0.33	0.52	2.55	N.D.	10.80	40.90	2.06	0.63	0.38	N.D.
037	1.93	0.78	0.76	2.55	N.D.	9.42	27.10	3.28	0.87	5.04	N.D.
038	1.49	0.30	0.35	1.96	N.D.	9.52	40.30	1.53	3.42	0.28	N.D.
039	1.82	0.38	0.39	1.10	0.31	7.53	42.60	0.98	5.03	0.21	N.D.
040	1.67	N.D.	0.22	0.54	0.37	6.87	45.40	0.73	2.53	0.30	N.D.
041	2.51	0.29	0.41	0.95	0.22	11.60	41.40	1.12	3.25	0.16	N.D.
042	1.81	N.D.	0.36	1.05	0.75	11.10	36.70	1.58	5.18	0.16	N.D.
043	1.39	N.D.	0.40	0.94	0.26	9.27	41.10	1.23	5.50	0.84	N.D.
044	1.98	N.D.	0.39	0.91	0.25	8.88	39.30	1.19	5.23	0.80	N.D.
045	1.78	0.38	0.39	1.13	N.D.	10.60	33.50	1.03	3.60	0.74	N.D.
046	2.09	0.25	0.22	0.70	0.37	9.44	44.10	0.92	1.09	0.63	N.D.
047	1.00	0.83	0.41	13.60	N.D.	10.60	16.40	3.39	0.71	0.23	N.D.
048	2.34	0.36	0.30	0.96	0.49	13.20	38.60	1.24	2.60	0.10	N.D.

ตารางที่ ง.1ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

รหัส	ผลการทดสอบ (%Wt)										
	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	SO_3	MnO	Fe_2O_3	TiO_2
049	1.10	0.32	0.26	1.06	0.44	7.63	31.80	1.22	7.98	0.58	N.D.
050	2.00	0.37	0.33	1.33	0.93	12.70	37.30	0.59	3.98	0.21	N.D.
051	1.84	0.67	0.48	5.83	0.29	12.60	29.70	2.61	1.01	0.31	N.D.
052	1.77	0.35	0.25	0.94	0.13	9.93	37.40	1.09	4.92	0.19	N.D.
053	1.80	0.86	0.55	3.62	N.D.	8.51	31.30	2.96	0.16	0.25	N.D.
เฉลี่ย1)	1.86	0.49	0.53	2.62	0.41	9.69	35.53	1.05	3.06	1.16	0.30
เฉลี่ย2)	3.28	0.86	0.93	4.62	0.73	17.09	62.66	1.85	5.40	2.05	0.53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.2ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		1 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	2 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว5%	3 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว10%	4 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว12%
1	MgO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
2	Al_2O_3	10.167	14.386	14.1	14.509
3	SiO_2	53.679	61.613	57.442	70.778
4	P_2O_5	2.461	1.416	1.572	0.609
5	SO_3	1.291	0.722	0.838	0.307
6	Cl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
7	K_2O	4.126	3.652	3.859	2.94
8	CaO	15.413	9.329	13.897	6.149
9	TiO_2	2.605	1.566	1.43	0.746
10	Cr_2O_3	0.144	0.057	0.08	0.081
11	MnO_2	1.979	1.021	1.276	0.663
12	Fe_2O_3	8.013	6.095	5.382	3.005
13	CuO	N.D.	N.D.	N.D.	0.008
14	ZnO	0.033	0.071	N.D.	0.009

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.2ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด (ต่อ)

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		1 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	2 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว5%	3 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว10%	4 เปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว12%
15	Rb_2O	N.D.	N.D.	0.012	N.D.
16	SrO	0.089	0.047	0.069	0.127
17	ZrO_2	N.D.	0.079	0.041	N.D.
18	CdO	N.D.	N.D.	N.D.	0.07
19	Ta_2O_5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
20	HgO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21	PbO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.3ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ				
		5 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	6 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 5%	7 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 10%	8 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 12%	9 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 12% พิเศษ
1	MgO	3.481	2.704	1.849	1.99	2.13
2	Al_2O_3	9.641	10.456	10.271	11.823	12.525
3	SiO_2	56.527	63.257	68.743	66.038	75.023
4	P_2O_5	3.284	1.792	1.461	1.478	N.D.
5	SO_3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.092
6	Cl	1.658	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
7	K_2O	2.623	2.806	2.599	2.84	3.381
8	CaO	15.644	12.334	10.037	9.739	3.438
9	TiO_2	1.348	1.038	1.031	0.889	0.584
10	Cr_2O_3	0.037	0.03	0.02	0.027	0.011
11	MnO_2	0.972	0.816	0.674	1.345	0.305
12	Fe_2O_3	4.58	4.61	3.199	3.722	2.47

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.3ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด (ต่อ)

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ				
		5 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	6 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 5%	7 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 10%	8 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 12%	9 เถ้าหนักเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว 12% พิเศษ
13	CuO	0.024	0.012	0.009	N.D.	0.007
14	ZnO	0.029	0.012	0.012	0.011	0.01
15	Rb_2O	N.D.	0.011	N.D.	0.007	0.008
16	SrO	0.026	0.025	N.D.	0.018	N.D.
17	ZrO_2	0.026	0.017	0.026	N.D.	0.015
18	CdO	0.1	0.081	0.069	0.072	N.D.
19	Ta_2O_5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
20	HgO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21	PbO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.4ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		9 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	10 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว5%	11 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว10%	12 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว12%
1	MgO	1.381	1.699	1.709	1.405
2	Al_2O_3	5.169	6.447	6.241	6.516
3	SiO_2	80.218	78.649	77.439	77.697
4	P_2O_5	0.5	0.741	0.891	0.794
5	SO_3	N.D.	0.084	0.077	N.D.
6	Cl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
7	K_2O	1.491	1.536	1.707	1.609
8	CaO	6.47	6.247	6.786	6.901
9	TiO_2	0.776	0.748	0.829	0.826
10	Cr_2O_3	0.034	0.026	0.032	0.035
11	MnO_2	0.553	0.485	0.542	0.554
12	Fe_2O_3	3.367	3.315	3.704	3.622
13	CuO	0.006	N.D.	N.D.	0.009

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.4ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด (ต่อ)

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		9 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด	10 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด+ดินขาว5%	11 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด+ดินขาว10%	12 เถ้าหลอมเปลือกไม้ยูคาฯอัดเม็ด+ดินขาว12%
14	ZnO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
15	Rb_2O	N.D.	0.004	0.004	N.D.
16	SrO	0.017	0.017	0.021	0.017
17	ZrO_2	0.019	N.D.	0.018	N.D.
18	CdO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
19	Ta_2O_5	N.D.	N.D.	N.D.	0.015
20	HgO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21	PbO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.5ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของตะกรันเกาะท่อเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		13 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	14 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว5%	15 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว10%	16 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว12%
1	MgO	N.D.	1.297	1.135	N.D.
2	Al_2O_3	1.693	11.029	12.365	10.562
3	SiO_2	10.986	55.615	65.842	51.876
4	P_2O_5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
5	SO_3	1.176	2.51	3.259	3.241
6	Cl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
7	K_2O	1.342	2.836	3.766	2.99
8	CaO	0.799	2.744	3.135	2.039
9	TiO_2	N.D.	0.401	0.586	0.336
10	Cr_2O_3	0.007	0.016	0.019	0.015
11	MnO_2	0.688	0.332	0.342	0.341
12	Fe_2O_3	82.933	22.993	9.439	28.477
13	CuO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.5ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของตะกรันเกาะท่อเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด (ต่อ)

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		13 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด	14 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว5%	15 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว10%	16 ตะกรันเกาะท่อของเปลือกไม้ยูคาอัดเม็ด +ดินขาว12%
14	ZnO	0.247	0.073	0.07	0.122
15	Rb_2O	N.D.	0.037	0.014	N.D.
16	SrO	N.D.	0.008	N.D.	N.D.
17	ZrO_2	N.D.	0.011	N.D.	N.D.
18	CdO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
19	Ta_2O_5	0.098	0.098	0.027	N.D.
20	HgO	0.02	N.D.	N.D.	N.D.
21	PbO	0.011	N.D.	N.D.	N.D.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.6ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		17 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด	18 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด+ดินขาว5%	19 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด+ดินขาว10%	20 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด+ดินขาว12%
1	MgO	4.739	3.763	3.598	2.244
2	Al_2O_3	6.961	10.543	11.271	12.111
3	SiO_2	43.648	59.375	58.083	67.328
4	P_2O_5	N.D.	N.D.	N.D.	1.341
5	SO_3	9.793	4.81	5.181	2.768
6	Cl	5.592	2.349	2.497	N.D.
7	K_2O	3.183	3.312	3.672	3.635
8	CaO	18.265	10.315	10.452	6.26
9	TiO_2	1.526	0.99	0.97	0.733
10	Cr_2O_3	0.037	0.028	0.022	0.015
11	MnO_2	0.94	0.542	0.603	0.436
12	Fe_2O_3	5.127	3.884	3.554	3.062
13	CuO	0.033	0.017	0.016	0.012
14	ZnO	0.137	0.072	0.085	0.056

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ง.6ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบออกไซด์ของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดเม็ด (ต่อ)

รายการที่	รายการทดสอบ (%)	ผลการทดสอบ			
		17 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด	18 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด+ดินขาว5%	19 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด+ดินขาว10%	20 เถ้าลอยเปลือกไม้ยูคา อัดเม็ด+ดินขาว12%
15	Rb_2O	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
16	SrO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
17	ZrO_2	0.018	N.D.	N.D.	N.D.
18	CdO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
19	Ta_2O_5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
20	HgO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
21	PbO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

ภาคผนวกจ

ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ

	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)				อุณหภูมิไอเสีย(องศาเซลเซียส)			
เวลา (นาที)	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%
2.0	541.7	687.5	511.8	382.8	238.8	214.0	187.1	32.7
4.0	477.7	682.2	594.6	374.3	239.6	214.0	193.3	32.5
6.0	502.2	633.1	569.2	633.0	241.4	211.6	200.0	32.3
8.0	433.6	613.2	600.5	684.6	235.6	209.1	207.9	32.2
10.0	518.2	646.3	639.7	536.8	232.9	209.9	214.6	32.2
12.0	465.2	543.5	662.6	442.7	234.6	212.0	219.5	31.9
14.0	510.1	519.2	692.3	599.4	236.3	214.5	222.7	31.8
16.0	565.8	494.7	664.0	500.9	241.5	215.0	223.7	31.8
18.0	579.0	499.6	590.7	442.6	247.0	213.5	223.4	31.6
20.0	568.5	521.3	541.1	553.4	250.3	211.8	222.7	31.5
22.0	588.3	515.4	501.7	557.9	248.0	210.3	221.3	31.4
24.0	527.9	525.1	567.6	701.5	245.6	209.0	221.7	31.3
26.0	570.6	606.5	624.5	622.4	243.2	211.0	224.3	31.3
28.0	620.5	604.3	601.2	578.7	240.5	214.7	224.9	31.3
30.0	693.4	558.5	521.7	537.7	241.7	214.2	223.6	31.2
32.0	678.5	489.3	443.3	512.0	241.6	211.5	220.9	31.1
34.0	719.9	489.6	380.3	555.4	240.4	209.3	217.6	30.9
36.0	712.0	538.5	332.5	559.9	240.1	211.1	213.2	31.0
38.0	684.0	638.5	333.2	571.9	238.6	214.9	210.2	31.0
40.0	659.4	635.3	475.7	596.2	235.6	217.8	213.9	30.9
42.0	602.5	616.5	529.1	583.4	231.9	221.0	219.6	39.5
44.0	542.7	640.4	577.6	566.4	228.3	221.0	222.9	192.5
46.0	470.2	604.2	519.3	588.6	224.2	221.0	222.3	219.8
48.0	505.7	623.9	415.7	556.2	220.8	223.2	219.1	224.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ(ต่อ)

	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)				อุณหภูมิไอเสีย(องศาเซลเซียส)			
เวลา (นาที)	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%
50.0	523.3	639.5	330.5	548.9	219.0	222.7	214.6	227.6
52.0	637.6	588.9	288.9	506.0	224.1	222.3	210.4	230.2
54.0	659.2	598.9	362.2	377.8	225.8	222.9	212.0	231.4
56,0	673.3	638	490.6	255.0	225.9	221.5	216.1	230
58.0	658.9	628.8	547.9	214.6	225.2	218.1	218.0	225.4
60.0	579.3	606.3	466.7	247.7	223.9	215.0	216.5	223.3
62.0	567.9	612.3	362.4	305.4	221.0	217.3	213.9	222.3
64.0	528.9	645.5	548.2	355.4	217.6	220.5	219.7	221.2
66.0	449.7	695.1	709.4	329.9	214.5	223.5	226.7	216.5
68.0	530.7	748.0	680.5	355.7	217.1	225.8	227.9	209.0
70.0	494.0	724.5	560.2	387.0	218.3	226.9	226.0	203.9
72.0	615.8	665.8	467.9	456.9	221.1	226.0	223.1	201.1
74.0	598.1	575.0	418.2	447.8	223.4	225.1	220.1	200.0
76.0	583.4	752.8	387.6	462.1	222.9	225.7	217.5	199.5
78.0	584.4	747.8	508.2	523.0	221.1	226.4	218.4	199.6
80.0	523.4	642.9	610.1	466.7	218.6	221.2	219.5	200.6
82.0	467.1	534.9	582.7	446.3	216.0	215.7	221.0	201.6
84.0	481.5	641.6	557.3	418.4	217.1	218.8	221.6	202.1
86.0	473.8	670.5	477.8	414.4	220.7	222.5	221.4	201.9
88.0	366.3	781.4	488.7	417.8	221.4	225.9	223.9	201.7
90.0	454.7	774.9	502.7	414.7	222.3	231.3	226.0	201.8
92.0	598.1	676.8	523.6	425.1	224.1	231.1	227.5	202.2
94.0	609.4	609.5	521.5	419.9	225.5	228.6	227.9	202.5
96.0	647.5	562.8	508.0	409.2	229.7	225.5	227.3	203.1
98.0	636.2	533.3	466.6	402.7	233.2	222.9	225.6	203.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ (ต่อ)

	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)				อุณหภูมิไอเสีย(องศาเซลเซียส)			
เวลา (นาที)	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%
100.0	637.4	631.7	426.7	409.9	238.6	223.8	223.1	202.9
102.0	654.3	780.9	393.5	409.7	241.9	229.7	220.7	202.6
104.0	650.4	769.8	367.5		244.4	229.8	218.0	
106.0	628.5	663.2	345.4		245.6	223.1	215.8	
108.0	605.0	600.1	333.3		245.3	216.3	214.0	
110.0	588.2	605.9	323.8		243.6	220.5	212.1	
112.0	566.6	612.4	408.4		242.7	227.2	215.6	
114.0	571.5	624.3	408.8		240.9	229.7	218.3	
116.0	553.3	647.9	386.3		239.7	235.0	219.1	
118.0	583.8	603.5	370.0		239.0	237.9	220.4	
120.0	502.5	542.8	364.1		235.9	235.8	220.5	
122.0	516.2	517.1	346.8		236.4	233.7	219.1	
124.0	539.2	495.0	314.3		237.9	233.4	217.0	
126.0	539.2	576.7	289.4		238.2	233.4	214.2	
128.0	528.0	819.2	272.7		237.6	235.8	211.6	
130.0	525.2	709.7	259.3		237.1	239.9	209.1	
132.0	513.4	540.5	257.0		235.9	237.7	207.6	
134.0	493.0	468.4	222.1		234.3	233.1	204.3	
136.0	455.4	429.1	195.7		232.3	228.4	201.1	
138.0	420.0	413.5	185.3		229.1	224.3	198.5	
140.0	542.6	380.6	195.8		232.1	217.7	196.9	
142.0	710.5	524.8	290.0		235.9	223.4	198.0	
144.0	709.8	600.4	276.7		234.9	229.5	195.0	
146.0	559.1	638.6	216.5		231.9	235.1	190.5	
148.0	563.3	637.1	166.6		234.4	236.9	185.9	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ (ต่อ)

	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)				อุณหภูมิไอเสีย(องศาเซลเซียส)			
เวลา (นาที)	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%
150.0	482.4	554.9	131.0		237.5	234.5	181.1	
152.0	491.6	632.8	112.7		235.5	232.5	178.0	
154.0	577.4	684.5			232.2	232.2		
156.0	540.5	650.1			228.8	229.5		
158.0	561.6	567.1			230.0	224.0		
160.0	482.8	536.7			230.4	217.7		
162.0	489.5	507.5			232.2	211.8		
164.0	491.4	447.8			232.1	204.9		
166.0	486.0	388.5			229.8	199.2		
168.0	476.0	364.7			226.8	195.5		
170.0	474.3	261.2			222.2	186.4		
172.0	471.0	188.6			219.1	174.8		
174.0	471.0	164.7			217.9	170.0		
176.0	471.0	180.9			219.4	170.7		
178.0	471.0	220.8			221.6	176.2		
180.0	471.0	241.9			223.3	180.2		
182.0	471.0	244.2			224.8	181.8		
184.0	469.1				224.6			
186.0	436.0				221.7			
188.0	377.0				216.3			
190.0	357.8				206.8			
192.0	386.5				204.0			
194.0	379.8				197.0			
196.0	360.7				186.7			
198.0	351.9				180.9			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ จ.1ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิ (ต่อ)

	อุณหภูมิห้องเผาไหม้ (องศาเซลเซียส)				อุณหภูมิไอเสีย(องศาเซลเซียส)			
เวลา (นาที)	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%	ยูคาฯ อัดแท่ง	ผสมดิน ขาว 5%	ผสม ดินขาว 10%	ผสม ดินขาว 12%
200.0	460.0				180.4			
202.0	518.2				183.0			
204.0	511.9				181.9			
206.0	523.5				181.2			
208.0	517.1				180.6			
210.0	470.0				171.1			
212.0	455.0				164.7			
214.0	471.7				170.0			
216.0	570.4				179.6			
220.0	593.4				204.6			
222.0	477.5				209.1			
224.0	596.4				215.6			
226.0	742.5				223.1			
228.0	769.0				226.2			
230.0	758.6				226.5			
232.0	732.3				225.1			
234.0	610.0				227.9			
236.0	643.1				229.8			
238.0	813.8				232.0			
240.0	789.3				233.4			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกฉ

ผลการวิเคราะห์ไอเสีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.1ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
0	21.61	554	4.81	35	-16.7	186.4	18	50	9179
0.5	15.13	2085	9.41	43	-16.7	214.0	26	76	8867
1	11.89	16875	12.53	53	-17.2	222.1	36	-326	8482
1.5	11.65	24345	12.70	58	-16.8	225.9	41	-574	12377
2	11.77	23315	12.73	60	-16.8	228.0	43	-566	13583
2.5	11.61	21106	12.96	62	-16.8	229.2	45	-516	13521
3	11.91	19967	13.07	64	-17.9	230.3	46	-488	13412
3.5	12.30	17917	12.75	62	-17.7	230.9	44	-444	13267
4	12.01	15190	12.94	64	-17.1	230.7	47	-375	12168
4.5	11.66	13525	12.71	68	-15.5	228.0	53	-324	10784
5	11.39	17071	12.23	82	-16.2	225.9	66	-302	9536
5.5	11.12	43844	11.96	66	-16.2	224.2	49	-1134	11788
6	10.87	60490	12.03	66	-16.6	222.2	50	-1671	18969
6.5	11.46	69690	11.79	82	-17.3	220.9	65	-1951	24117
7	11.79	74191	11.53	100	-18.2	221.7	81	-1093	27341
7.5	10.37	75284	12.36	111	-17.3	223.9	93	-2200	29251

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.1ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส(ต่อ)

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
8	10.67	61196	12.03	81	-18.6	223.8	63	-1815	32555
8.5	11.15	55953	11.44	74	-18.7	223.9	56	-1653	25966
9	10.76	64092	12.29	74	-18.5	223.8	56	-1945	26017
9.5	10.62	57570	12.37	68	-18.2	223.2	50	-1766	26566
10	10.70	58418	12.33	73	-18.0	223.3	55	-1794	24705
10.5	10.85	60679	12.72	88	-18.3	224.0	70	-1881	25883
11	10.67	47619	13.41	96	-18.5	224.9	78	-1482	27985
11.5	10.64	34142	13.63	99	-18.7	225.7	81	-1045	23902
12	10.56	29194	13.65	100	-18.5	226.9	81	-888	19440
12.5	10.05	28625	14.26	94	-18.4	228.3	76	-878	17499
13	9.94	25930	14.43	89	-18.0	229.1	71	-803	16971
13.5	9.82	23794	14.46	83	-17.5	230.5	65	-738	14968
14	10.26	22145	14.63	79	-19.0	231.6	60	-674	15006
14.5	10.23	18931	14.72	75	-18.6	232.7	57	-579	14744

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.2ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
0	18.39	2	2.76	47	-0.3	189.7	47	-	181
0.5	13.82	69	9.43	133	-1.2	210.1	132	-	523
1	13.75	230	9.26	132	-0.9	213.4	131	-	271
1.5	13.99	233	9.06	131	-1.2	214.8	129	-	487
2	14.28	242	8.96	129	-2.0	215.3	127	-	952
2.5	14.56	305	8.79	127	-3.0	215.6	124	-	1411
3	15.17	356	8.69	127	-4.8	215.5	122	-	2464
3.5	15.36	366	8.51	123	-5.1	215.5	118	-	2565
4	15.42	344	8.34	120	-4.7	215.2	115	-	2470
4.5	15.54	443	8.17	116	-4.7	214.9	111	-	2451
5	15.71	469	7.96	111	-4.9	214.7	107	-	2514
5.5	15.79	526	7.84	107	-4.7	214.4	103	-	2434
6	15.90	607	7.68	103	-4.8	213.7	98	-	2418
6.5	16.08	694	7.47	98	-4.8	213.0	93	-	2474
7	16.28	843	7.21	93	-4.8	212.3	88	-	2474
7.5	16.40	1025	7.04	89	-4.8	211.4	85	-	2506

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.2ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส(ต่อ)

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
8	16.52	1170	6.91	87	-4.8	210.7	82	-	2548
8.5	16.73	1105	6.70	84	-5.0	209.8	79	-	2685
9	16.90	1061	6.55	82	-5.3	209.2	77	-	2768
9.5	16.94	1091	6.47	80	-5.3	208.6	75	-	2784
10	16.91	1117	6.49	79	-5.2	208.1	74	-	2704
10.5	17.09	905	6.28	75	-5.2	207.3	70	-	2749
11	17.40	946	6.08	72	-5.8	206.5	66	-	3016
11.5	17.52	954	5.93	71	-5.9	205.6	65	-	3109
12	17.67	835	5.80	69	-6.0	187.6	63	-	3222

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.3ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 5%

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
0	15.74	-	6.78	84	-2.2	197.4	82	-	-
0.5	10.84	-	14.21	141	-2.0	215.9	139	-	-
1	10.34	-	14.76	121	-1.8	220.4	120	-	-
1.5	10.06	-	15.09	108	-1.7	223.2	106	-	-
2	9.98	-	15.25	101	-2.0	225.0	99	-	-
2.5	10.00	-	15.22	98	-2.0	226.5	96	-	-
3	10.20	-	14.94	102	-2.1	227.5	100	-	-
3.5	10.70	-	14.41	108	-2.6	228.1	105	-	-
4	10.96	-	13.88	109	-2.0	228.6	107	-	-
4.5	11.24	-	13.47	107	-1.9	228.9	105	-	-
5	11.68	-	12.89	110	-2.0	228.8	108	-	-
5.5	12.17	-	12.38	112	-2.5	228.5	109	-	-
6	12.17	-	12.37	117	-2.4	228.3	115	-	-
6.5	13.38	-	11.26	162	-2.2	227.6	159	-	-
7	14.09	-	10.34	152	-2.3	226.4	149	-	-
7.5	14.09	-	10.23	160	-2.1	225.8	158	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.3ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 5% (ต่อ)

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
8	13.85	-	10.60	169	-2.1	225.5	167	-	-
8.5	13.66	-	10.86	172	-2.1	225.4	170	-	-
9	13.54	-	11.03	174	-2.2	225.6	172	-	-
9.5	13.47	-	11.14	179	-2.1	225.7	177	-	-
10	13.57	-	10.95	178	-2.1	225.6	176	-	-
10.5	13.82	-	10.53	170	-2.0	225.5	168	-	-
11	14.27	-	10.10	163	-2.7	225.2	160	-	-
11.5	14.56	-	9.59	156	-2.2	224.8	153	-	-
12	14.99	-	8.91	146	-2.1	224.2	144	-	-
12.5	15.43	-	8.29	138	-2.0	223.5	136	-	-
13	15.96	-	7.57	128	-2.2	222.5	126	-	-
13.5	16.44	-	6.87	119	-2.0	221.2	117	-	-
14	16.71	-	6.44	111	-2.0	219.8	109	-	-
14.5	16.97	-	6.08	104	-2.0	218.3	102	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.4ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 10%

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
0	12.24	10	9.87	114	0.2	199.5	114	2	-1
0.5	7.41	78	15.04	181	0.1	212.6	181	-1	-2
1	7.83	72	14.58	185	-0.1	216.2	185	1	11
1.5	8.40	57	13.99	186	-0.4	217.9	186	4	13
2	9.07	48	13.26	184	-0.7	218.7	183	5	14
2.5	9.78	42	12.48	179	-0.7	219.0	179	6	15
3	10.69	38	11.72	174	-0.9	219.0	173	7	16
3.5	11.54	37	10.99	166	-1.1	218.9	165	8	19
4	12.10	38	10.37	158	-1.1	218.5	157	8	20
4.5	12.57	42	9.91	152	-1.2	218.0	150	8	20
5	13.05	52	9.42	145	-1.3	217.4	144	8	21
5.5	13.64	71	8.95	138	-1.9	216.8	136	9	28
6	14.20	107	8.60	134	-2.8	216.1	131	10	35
6.5	14.46	150	8.39	133	-3.0	215.5	130	9	41
7	14.71	176	8.10	128	-3.0	214.9	125	8	40
7.5	15.01	248	7.86	126	-3.4	214.2	123	6	40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.4ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 10% (ต่อ)

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
8	15.27	289	7.66	124	-3.5	213.6	120	5	49
8.5	15.54	351	7.51	122	-3.9	213.1	118	4	52
9	15.81	377	7.33	121	-4.3	212.4	117	5	67
9.5	16.05	397	7.11	119	-4.6	211.6	114	4	66
10	16.21	446	7.04	118	-4.8	211.1	113	3	71
10.5	16.53	480	6.82	116	-5.2	210.4	110	3	77
11	16.73	559	6.65	113	-5.6	209.8	108	1	78
11.5	16.88	626	6.52	112	-5.5	209.0	107	-1	87
12	13.10	1202	10.28	137	-5.5	210.3	131	5	-85

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.5ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12%

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
0	13.26	-	9.80	92	1.1	193.0	93	-	-
0.5	10.75	-	13.39	153	0.8	214.6	154	-	-
1	11.39	-	12.51	149	0.8	216.4	150	-	-
1.5	13.22	-	10.64	149	0.7	216.0	150	-	-
2	13.56	-	10.02	148	0.9	215.7	149	-	-
2.5	13.50	-	10.16	152	0.8	214.9	153	-	-
3	13.33	-	10.46	156	0.6	214.4	157	-	-
3.5	13.34	-	10.52	155	0.4	214.3	155	-	-
4	13.22	-	10.68	156	0.2	213.9	156	-	-
4.5	13.18	-	10.74	156	0.3	213.6	156	-	-
5	13.18	-	10.74	157	0.2	213.4	157	-	-
5.5	13.14	-	10.76	157	0.3	213.3	157	-	-
6	13.15	-	10.76	156	0.3	213.3	156	-	-
6.5	13.24	-	10.63	153	0.3	212.9	153	-	-
7	13.38	-	10.42	151	0.3	212.9	151	-	-
7.5	13.56	-	10.15	147	0.4	212.5	147	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.5ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12% (ต่อ)

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
8	13.64	-	10.00	143	0.5	212.3	144	-	-
8.5	13.67	-	9.96	145	0.5	212.0	145	-	-
9	13.88	-	9.74	142	0.2	211.8	142	-	-
9.5	13.62	-	9.97	142	0.2	211.4	142	-	-
10	14.33	-	9.36	152	0.1	210.5	152	-	-
10.5	15.99	-	6.87	113	0.2	208.8	113	-	-
11	16.54	-	6.06	95	0.1	207.0	95	-	-
11.5	16.77	-	5.69	85	0.3	205.0	85	-	-
12	16.84	-	5.58	81	0.3	203.2	81	-	-
12.5	16.85	-	5.56	79	0.2	202.0	79	-	-
13	16.65	-	5.82	83	0.3	200.7	83	-	-
13.5	16.62	-	5.92	85	0.2	199.1	85	-	-
14	16.52	-	6.04	87	0.3	198.2	88	-	-
14.5	16.41	-	6.21	90	0.2	197.2	91	-	-
15	20.98	-	0.00	1	0.4	54.4	1	-	-
15.5	21.01	-	0.00	1	0.3	47.7	1	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ฉ.5ผลการวิเคราะห์ไอเสียของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมดินขาว 12% (ต่อ)

เวลา (นาที)	% O_2	ppm CO	% CO_2i	ppm NO	ppm NO_2	°C FT	ppm NOx	ppm SO_2	ppm H_2
16	20.97	-	0.00	1	0.5	44.9	1	-	-
16.5	20.91	-	0.00	0	0.8	42.7	1	-	-

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกช

ผลการวิเคราะห์ความดันและอัตราการไหล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.1ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำ
ด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง

เวลา (นาที)	$T_{exhaust}$ (degC)	Pressure(bar)	Flow (kg/hr)
10.00	250	10	300
20.00	250	11	355
30.00	250	12	396
40.00	250	12	439
50.00	250	13	470
60.00	250	12	465
70.00	250	12	461
80.00	250	11	428
90.00	250	11	426
100.00	250	12	405
110.00	250	12	434
120.00	250	13	474
130.00	250	12	457
140.00	250	12	468
150.00	250	12	479
160.00	250	12	462
170.00	250	12	445
180.00	250	12	414
190.00	250	10	407
200.00	250	11	348
210.00	200	11	283
220.00	200	11	348
230.00	250	12	369
240.00	250	12	352
เฉลี่ย	246	11.68	409.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.2ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำ
ด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 5%

เวลา (นาที)	$T_{exhaust}$ (degC)	Pressure(bar)	Flow (kg/hr)
10.00	250	10	301
20.00	250	12	342
30.00	250	12	458
40.00	250	12	423
50.00	250	12	338
60.00	250	10	332
70.00	250	10	326
80.00	250	12	361
90.00	250	12	372
100.00	250	12	404
110.00	250	12	403
120.00	250	12	415
130.00	250	12	417
140.00	250	12	446
150.00	250	12	415
160.00	250	12	410
170.00	200	10	361
180.00	200	10	300
เฉลี่ย	244.7	11.36	377.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.3ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำ
ด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 10%

เวลา (นาที)	$T_{exhaust}$ (degC)	Pressure(bar)	Flow (kg/hr)
10.00	200	10	334
20.00	250	10	340
30.00	250	10	420
40.00	250	10	417
50.00	250	10	382
60.00	250	11	353
70.00	250	11	358
80.00	250	11	336
90.00	250	11	334
100.00	250	11	343
110.00	250	11	351
120.00	250	11	346
130.00	250	10	466
140.00	225	10	423
150.00	200	10	292
เฉลี่ย	241.7	10.47	366.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ช.4ผลการทดสอบความดันและอัตราการไหลของหม้อต้มไอน้ำ
ด้วยเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งผสมดินขาว 12%

เวลา (นาที)	$T_{exhaust}$ (degC)	Pressure(bar)	Flow (kg/hr)
10.00	250	12	665
20.00	250	10	435
30.00	250	10	500
40.00	250	7	512
50.00	250	5	443
60.00	250	6	439
70.00	250	6	423
80.00	250	6	392
90.00	250	6	344
100.00	250	6	321
เฉลี่ย	250	7.4	447.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวกซ

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ซ.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า AI

$$AI = \frac{kg(K_2O + Na_2O)}{GJ}$$

1. จากข้อมูลวัตถุดิบเปลือกไม้ยูคามีพลังงาน16,533.20 kJ/kg

2. มีเถ้า=9.17%

3. ถ้าต้องการเผาเปลือกไม้ยูคาลิปตัสให้ได้เถ้า 100 กรัม ต้องเผาเปลือกไม้ยูคาลิปตัส $=(100x100)/9.17 = 1090.5$ g หรือ 1.095 kg ซึ่งคิดเป็นพลังงาน 18103 kJ

4. จากภาคผนวก ง. 1 Na_2O เท่ากับ 3.28% และ K_2O เท่ากับ 17.09 % ต่อพลังงาน 18,103 kJ (เผาไป 1 kg)

5. จากสมการค่า AI แทนค่าในสมการ

$$AI = \frac{(3.28 + 17.09) \times 10^9}{18103 \times 10^3 \times 10^3} = 1.125$$

ซ.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า BAI (Bed Agglomeration Index)

จากภาคผนวก ง.1เฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3) เท่ากับ 2.05% โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 3.28% และโพแทสเซียม(K_2O) เท่ากับ 17.09%

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า

$$\begin{aligned} \text{BAI (BedAgglomeration Index)} &= \%(Fe_2O_3)/\%(K_2O + Na_2O) \\ &= 2.05/(3.28 + 17.09) \\ &= 0.1 \end{aligned}$$

ซ.3 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio)

จากภาคผนวก ง.1เฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3)เท่ากับ 2.05%, แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 62.66%, แมกนีเซียมออกไซด์(MgO) เท่ากับ 0.86%,โซเดียมออกไซด์(Na_2O) เท่ากับ 3.28% และโพแทสเซียมออกไซด์(K_2O) เท่ากับ 17.09%ส่วนที่เป็น Basic Oxides

จากภาคผนวก ง.1ซิลิคอนออกไซด์(SiO_2)เท่ากับ 4.62%, ไททาเนียมไดออกไซด์(TiO_2) เท่ากับ 0.53% และอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) เท่ากับ 0.93% ส่วนที่เป็น Acidic Oxides

$R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio)

$$= \%(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / \%(SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)$$
$$= \%(2.05 + 62.66 + 0.86 + 3.28 + 17.09) / \%(4.62 + 0.53 + 0.93)$$
$$= 15.02$$

ซ.4 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Rs (Slagging Index)

Ratio นี้จะบอกถึงแนวโน้มในการเกิด Slag เช่นเดียวกับ Basic/Acid Ratio ถ้ายิ่งค่า Rsมีค่าสูง โอกาสที่จะเกิด Slaggingก็เพิ่มขึ้น

จากภาคผนวก ง. 1 เฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3) เท่ากับ 2.05%, แคลเซียมออกไซด์(CaO) เท่ากับ 62.66%, แมกนีเซียมออกไซด์(MgO) เท่ากับ 0.86%,โซเดียมออกไซด์(Na_2O) เท่ากับ 3.28 % และโพแทสเซียมออกไซด์(K_2O) เท่ากับ 17.09%ส่วนที่เป็น Basic Oxides

จากภาคผนวก ง.1 ซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 4.62 %,ไทเทเนียมออกไซด์(TiO_2) เท่ากับ 0.53% และอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับ 0.93 % ส่วนที่เป็น Acidic Oxides

จากภาคผนวก ค. % Sulphur in Biomass (Dry Basis) มีค่า 0.41

$$Rs = (\text{Basic} / \text{Acid}) \cdot \%\ \text{Sulphur in Biomass}(\text{Dry Basis})$$
$$= \%(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / \%(SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3) * \ \%(\mathbf{S})_{\mathbf{db}}$$
$$= \%(2.05 + 62.66 + 0.86 + 3.28 + 17.09) / \%(4.62 + 0.53 + 0.93) x0.41$$
$$= 6.16$$

ซ.5 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Silica/Alumina Ratio

จากภาคผนวก ง.1 ซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับ 4.62% และอลูมิเนียมออกไซด์(Al_2O_3) เท่ากับ 0.93 % ส่วนที่เป็น Acidic Oxides

$$\text{Silica/Alumina Ratio} = SiO_2 / Al_2O_3$$
$$= 4.62 / 0.93$$
$$= 4.97$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ซ.6ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Iron/Calcium Ratio

จากภาคผนวก ง.1เฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3) เท่ากับ 2.05% และแคลเซียมออกไซด์CaOเท่ากับ 62.66%

Iron/Calcium Ratio = Fe_2O_3 / CaO

= 2.05/62.66

= 0.03

ซ.7 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Iron/Dolomite Ratio

Dolomite Percentage (D.P.) คือเปอร์เซ็นต์ของ Dolomite ใน Basic Oxides ทั้งหมด Parameter นี้ใช้กับเถ้าที่ปริมาณ Basic Oxides มากกว่า 40% เนื่องจากปริมาณ Basic Oxides มากกว่า 40% จะมีความสัมพันธ์กับค่า Viscosity ของเถ้าช่วงที่ใช้พิจารณาคือ Basic Oxides เท่ากับ 40-98% ถ้า Dolomite Percentage เพิ่มขึ้น ค่า Fusion Temperature และ Viscosity จะสูงขึ้นด้วย

จากภาคผนวก ง.1เฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3) เท่ากับ 2.05%, แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับ 62.66% และแมกนีเซียมออกไซด์MgOเท่ากับ 0.86%

Iron/Dolomite Ratio = $Fe_2O_3 / CaO + MgO$

= $2.05/(62.66+0.86)$

= 0.032

ซ.8 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Fouling Index (Rf)

$Rf = (Basic/\ Acid)\%\ Na_2O$ ในเถ้า

ตารางที่ ซ.1 แสดงเงื่อนไขกรณีของเถ้าที่มีค่า CaO + MgO < Fe_2O_3 เท่านั้น

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

ตารางที่ ซ.2 แสดงเงื่อนไขกรณีเถ้าที่มีค่า CaO + MgO > Fe_2O_3 ซึ่งปริมาณร้อยละของโซเดียมออกไซด์(Na_2O)ในเถ้าจะบอกถึงแนวโน้มการเกิด Fouling

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

จากภาคผนวก ง.1เฟอริคออกไซด์(Fe_2O_3) เท่ากับ 2.05%,แคลเซียมออกไซด์(CaO) เท่ากับ 62.66%, แมกนีเซียมออกไซด์(MgO) เท่ากับ 0.86% และโซเดียมออกไซด์(Na_2O) เท่ากับ 3.28%

$$CaO + MgO > Fe_2O_3)$$

$$62.66 + 0.86 > 2.05$$

ใช้ปริมาณโซเดียมออกไซด์(Na_2O)ใน เถ้าจะบอกถึงแนวโน้มการเกิด Fouling แนวโน้มการเกิด Fouling สูง

ซ.9 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

1.จากข้อมูลวัตถุดิบเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีพลังงาน 16,533.20 kJ/kg

2.เชื้อเพลิงอัดแท่งมีความชื้น 15%wb

3.จากสมการ

$$LHV = HHV - 159(MC)$$

$$LHV = 16{,}533 - (159x15) = 14{,}148 \text{ kJ / kg}$$

4.ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

= อัตราการไหลของไอน้ำ x (h_2-h_1) / อัตราการสิ้นเชื้อเพลิง (kg/hr) x LHV

= [409.2 kg/hr x (2783.5-410.61)kJ/kg] / [128 kg/hr x 14,148 kJ/kg]

= 53.6 %

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ฌ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

พินิจ จิรัคคกุลวีรชัย อาจหาญ สุภัทร หนูแย้ม และอนุสรณ์ เวชสิทธิ์ (2555).**ศักยภาพพลังงานจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ**. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ณ โรงแรมอิมพีเรียล แม่ปิง จังหวัดเชียงใหม่. ระหว่างวันที่ 4-5 เมษายน 2555

พินิจ จิรัคคกุล และ วีรชัย อาจหาญ (2558).**การศึกษาอิทธิพลของการใช้ดินขาวเพื่อลดการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและเถ้าหลอมจากเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อไอน้ำ**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 ณ โรงแรมเดอะ กรีนเนอรี่ เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา. ระหว่างวันที่ 1-3 กรกฎาคม 2558

Jirukkakul, P. and Arjharn, W. (2017). Elemental Influence of Eucalyptus Bark Pellet Ash on Corrosion of Tube in Small Boiler. Oriental Scientific of Chemistry, vol.33

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

EAE26

ศักยภาพพลังงานจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Energy Potential from Eucalyptus Bark Biomasses in North East

พินิจ จิรัคคกุล[1]*วีรชัย อาจหาญ[2] สุภัทร หนูแย้ม[2] และอนุสรณ์ เวชสิทธิ[1]

[1] ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร จ.ขอนแก่น 40000
[2] สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 043 255 038, โทรสาร: 043 255 038
E-mail: J_Pinit12@yahoo.com

บทคัดย่อ

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้โตเร็วเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศเนื่องจาก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย และเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ จากรายงานของกรมพัฒนาที่ดินในปี พ.ศ. 2544 พบว่ามีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งสิ้น 2,408,780 ไร่ แยกเป็นสวนป่าในเขตป่าสงวน 754,332 ไร่และสวนป่าเอกชนจำนวน 1,654,448 ไร่ซึ่งสามารถผลิตไม้ยูคาฯประมาณ 6 ล้านตัน โดยนำมาใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษ 60 % และเป็นเชื้อเพลิง30 %ทำให้บริษัทเอกชนกลุ่มอุตสาหกรรมกระดาษที่ใช้ไม้ยูคาฯ เพื่อผลิตเยื่อกระดาษได้มีโครงการส่งเสริมการปลูกไม้ยูคาฯออกมาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปัจจุบัน ปี 2553 เกิดการขยายพื้นที่การเพาะปลูกไม้ยูคาฯอย่างรวดเร็ว จากเดิม 5 ล้านไร่ เป็น 10 ล้านไร่ โดยปัจจุบันสามารถผลิตไม้ยูคาฯได้มากถึงปีละ 25 ล้านตันเพียงพอและรองรับต่อการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มที่ โดยจะมีเปลือกไม้อยู่ 20 % ของไม้สด หรือปริมาณเปลือกไม้ยูคาฯ4.3 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1,120 ktoe

จากการสำรวจทั้ง 19 จังหวัดภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่า มีโรงงานสับไม้ยูคาฯ 64 โรง เป็น โรงงานที่สับเฉพาะไม้ยูคาฯ จำนวน 44 โรงงาน และโรงงานที่สับไม้ที่ปลูกขึ้นเฉพาะ13 ชนิดอีก 20 โรงงานจำนวนไม้ยูคาฯโรงงานรับซื้อไม้ปีจะละ 5,092,392 ตัน จะมีเปลือกไม้ยูคาฯประมาณ 1,043,940ตันต่อปี และจากการประเมินพบว่าจำหน่ายให้โรงไฟฟ้าเพื่อเป็นเชื้อเพลิง 49.82 % หรือ 520,130ตัน/ปี และจำหน่ายให้แก่เกษตรกรแต่เป็นจำนวนที่น้อยมาก โดยยังมีปริมาณเปลือกไม้ยูคาฯ เหลือ 50.18 % หรือ 523,810.18 ตันต่อปี โดยต้นทุนการแปรรูปแบบการสับและอบราคา 1.180บาท/กก และแบบอัดเม็ด 1.525บาท/กก

คำสำคัญ: เปลือกไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus Bark), ชีวมวล (Biomass), ไม้สับ (Wood Chip)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Eucalyptus wood was classified to the major economic wood of Thailand because it has variety usage. In 2001, Land Development Department reported the growth area of eucalyptus was 2.4 MRai which separated in conserved forest 754,332 Rai and private forest 1,654,448 Rai. Eucalyptus wood was produced 6 Mtons, approximately. The eucalyptus wood utility was separated in 60% paper production and 30% fuel so the companies had the cultivation campaign, continuously. In 2010, the cultivated area of

eucalyptus increase from 5 MRai to 10 MRai, increasingly. At present, eucalyptus wood is produced 25 Mtons/year which enough for industrial expansion, extremely. They had the eucalyptus bark 20% of fresh wood or 4.3 Mtons/year. It can transform to 1120 ktoe of crude oil.

The observation of 19 provinces from northeast of Thailand, 64 eucalyptus wood chip industries was classified in only eucalyptus wood chip 44 industries and 13 specific wood chip 20 industries. The eucalyptus wood was brought 5 Mtons/year which had eucalyptus bark 1 Mtons/year, approximately. For the evaluation, eucalyptus bark was used for fuel in electric power plant 49.82% or 0.5 Mtons/year and the small amount was distributed to agriculturist. However, the residue eucalyptus bark was 50.18% or 0.5 Mtons/year. The capital cost of wood chip and pellet were 1.180 and 1.525 bath/kg, respectively.

***Keyword*:** Eucalyptus Bark, Biomass, Wood Chip

1. บทนำ

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้โตเร็วเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศเนื่องจาก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย และเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ จากรายงานของกรมพัฒนาที่ดินในปี พ.ศ. 2544 พบว่ามีพื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสทั้งสิ้น 2,408,780 ไร่ แยกเป็นสวนป่าในเขตป่าสงวน 754,332 ไร่และสวนป่าเอกชนจำนวน 1,654,448 ไร่ ซึ่งสามารถผลิตไม้ยูคาฯประมาณ 6 ล้านตัน โดยนำมาใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษ 60 % รองลงมา คือ นำมา ใช้เป็นชิ้นไม้สับเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตความร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ 3.5 ล้านตัน/ปี (30 %) และอื่นๆ เช่น ไม้เสาเข็ม ไม้ค้ำยัน ฯลฯ อีก 1 ล้านตัน/ปี โดยขณะนั้นปริมาณผลผลิตไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทยมีประมาณ 10-11 ล้านตัน/ปี มีพื้นที่ปลูก 4.5-5.0 ล้านไร่ และมีแนวโน้มที่จะเกิดการขาดแคลนไม้เกิดขึ้น ทำให้บริษัทเอกชนที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเยื่อกระดาษได้มีโครงการส่งเสริมการปลูกไม้ยูคาลิปตัสออกมาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปัจจุบัน ปี 2553 เกิดการขยายพื้นที่การเพาะปลูกไม้ยูคาลิปตัสอย่างรวดเร็ว จากเดิม 5 ล้านไร่ เป็น 10 ล้านไร่ภายในระยะเวลาเพียงไม่กี่ปี จากการประเมินผลผลิตของไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตไม้ยูคาลิปตัสได้มากถึงปีละ 25 ล้านตัน เพียงพอและรองรับต่อการขยายตัวของภาค อุตสาหกรรมได้อย่างเต็มที่

ซึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษจะมีการแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสให้เป็นผลิตภัณฑ์ไม้สับและผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ จะมีเปลือกไม้อยู่ในสัดส่วนร้อยละ 20 ของไม้สด หรืออาจกล่าวได้ว่าประเทศไทยมีผลพลอยได้จากกระบวนการสับไม้คือเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมากถึง 4.3 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 1,120 ktoe จากการสำรวจการใช้ประโยชน์เปลือกไม้ยูคาลิปตัส พบว่าปัจจุบันมีการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าและ/หรือความร้อน ได้เพียง 0.5 ล้านตัน คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 141 ktoe เท่านั้นสาเหตุเนื่องมาจาก เปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นสูง (ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์)และน้ำหนักเบา ทำให้ต้นทุนการขนส่งสูง มีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลต่อระบบป้อนเชื้อเพลิง นอกจากนี้ ในส่วนของสมบัติทางเคมี และองค์ ประกอบแยกธาตุ พบว่ามีสัดส่วนของเกลืออยู่ในปริมาณมาก ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและระบบผลิตความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม อันเนื่องมาจากการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการสึกกร่อนในระบบท่อ ทำให้ปัจจุบันไม่สามารถใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสผสมกับเชื้อเพลิงอื่นในสัดส่วนสูงๆ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักที่ศึกษาการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

สำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเน้นที่จะทำการแปรรูปเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสให้มีสมบัติเหมาะสม คือ เพิ่มกระบวนการลดขนาด ลดความชื้น ให้เหมาะสม ซึ่งมีข้อสมมติฐาน คือ การลดขนาดและความชื้น จะช่วยให้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสามารถผสม (คลุกเคล้า) กับเชื้อเพลิงอื่นได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น ทำให้สามารถใช้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในสัดส่วนที่สูงขึ้นโดยไม่มีผลต่อระบบป้อนเชื้อเพลิง และลดการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และ การสึกกร่อนภายในห้องเผาไหม้ได้ มีความคุ้มค่าด้านการลงทุน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อประเมินศักยภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 19 จังหวัด

2) เพื่อศึกษากระบวนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสให้เหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ชีวมวลในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม

3) เพื่อศึกษาต้นทุนในการแปรรูปเชื้อเพลิงจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

3. วิธีการศึกษา

1)ศึกษาข้อมูลศักยภาพเชิงปริมาณของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เช่น ปริมาณ, มูลค่า, ลักษณะการนำไปใช้ประโยชน์ จากแบบสอบถาม

2) ศึกษาข้อมูลศักยภาพเชิงคุณภาพ (Quality)

- ศึกษาสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties) ได้แก่ขนาด ความชื้น ความหนาแน่น
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 และASTM D2015
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่ C, H, N, S, O (CHNS Analyzer)
- วิเคราะห์องค์ประกอบเถ้าจากการเผาไหม้จากโครงสร้างผลึกของเถ้า

3)ศึกษาข้อมูลความต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลของผู้บริโภค (Demand Site)

- ด้านคุณภาพและมาตรฐานของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส
- ด้านความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพและราคาของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

4) ศึกษากระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิง

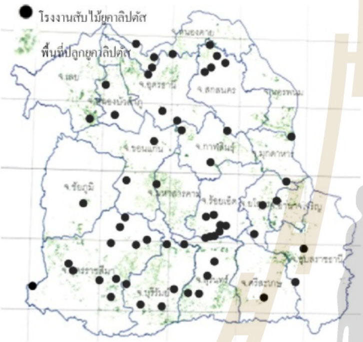
- ศึกษาการลดขนาด ลดความชื้น การอัดแท่งเชื้อเพลิง
- วิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงหลังแปรรูป
- ศึกษาต้นทุนการแปรรูป

5) วิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และพัฒนารูปแบบการบริหารจัดการ เชื้อเพลิงชีวมวลเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน

4. ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

การศึกษาศักยภาพเชิงปริมาณของเปลือกไม้ยูคาฯ19 จังหวัด เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งที่ตั้งดังรูปที่ 1 ปริมาณผลผลิตและราคาของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส การนำเปลือกไม้ยูคาลิปตัสไปใช้ประโยชน์พบโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสรวม 17 จังหวัด ยกเว้น จังหวัดนครพนม และจังหวัดมหาสารคาม โดยจังหวัดที่มีจำนวนโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัสมากที่สุด 3 ลำดับแรก คือ นครราชสีมา สุรินทร์ บุรีรัมย์ ตามลำดับโรงงานสับไม้มีทั้งหมด 64 โรงงาน จำนวนโรงงานสับไม้ตามจังหวัดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ โรงงานที่สับเฉพาะไม้ยูคาลิปตัส จำนวน 44 โรงงานเพื่ออุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ และโรงงานที่สับไม้ที่ปลูกขึ้นเฉพาะ13 ชนิดจำนวน 20 โรงงานโดยสัดส่วนระหว่างเปลือกไม้ยูคาลิปตัสกับเนื้อไม้มีค่าเฉลี่ย 20.5 : 79.5 และมีความหนาของเปลือกไม้เฉลี่ย 4-6 มิลลิเมตร จำนวนไม้ยูคาลิปตัสแต่ละโรงงานรับซื้อเพื่อ

มาแปรรูปในแต่ละปีจะมี 5.09 ล้านตัน จึงสามารถทราบปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้จากสัดส่วนคือ ประมาณ 1.04 ล้านตันต่อปีซึ่งจำหน่ายให้แก่โรงไฟฟ้าเพื่อเป็นเชื้อเพลิง 49.82 %ราคาขายหน้าโรงสับไม้จะอยู่ประมาณ 50-80 บาท และถ้านำไปขายที่โรงไฟฟ้า (รวมค่าขนส่ง) จะอยู่ประมาณ 100-250 บาท และยังเหลือปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอีก 50.18% หรือ 0.523ล้านตันต่อปี ที่ยังไม่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1แสดงตำแหน่งที่ตั้งโรงงานสับไม้ยูคาลิปตัส ใน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

การศึกษาศักยภาพเชิงคุณภาพของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เชิงกายภาพเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีความชื้นประมาณ59-63%,ค่าความหนาแน่นของเปลือกไม้ชิ้น 127.45 kg /m^3 และแบบฝอย 215.4kg /m^3

โดยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)ที่ 1

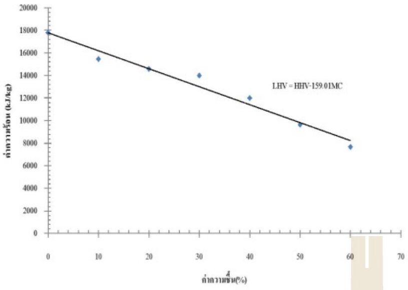
รูปที่15ลักษณะเปลือกไม้ยูคาลิปตัสของโรงงาน

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง		
ร้อยละของความชื้นเริ่มต้น(Wet basis)		48.27
องค์ประกอบแบบประมาณ (Dry basis)	ร้อยละของสารระเหย (VM)	69.79
	ร้อยละของเถ้า (Ash)	8.94
	ร้อยละของคาร์บอนคงตัว(FC)	21.27
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Dry basis)	ร้อยละของคาร์บอน (C)	38.57
	ร้อยละของไฮโดรเจน (H)	3.86
	ร้อยละของไนโตรเจน (N)	0.51
	ร้อยละของซัลเฟอร์(S)	0.31
	ร้อยละของออกซิเจน (O)	47.81
ค่าความร้อนสูง HHV(MJ/kg)		16.81
ร้อยละของคลอลีน(Dry basis)		0.98

ซึ่งเมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาพิจารณาพบว่า ค่าความร้อนต่ำมีค่าแสดงดังรูปที่ 2 โดยพิจารณาความชื้นของเปลือกยูคาฯ ที่ความชื้น59-66% จะมีที่ค่าความร้อนต่ำ (LHV) ของเชื้อเพลิงชีวมวลมีค่า 7849kJ/kgหรือ 1868 kcal

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ

การศึกษาองค์ประกอบเถ้าจากการเผาไหม้หรือการวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อหาส่วนประกอบต่าง ๆ ของเถ้าในรูป Oxides สำหรับนำไปประเมินผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้คือ การเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันและการผุกร่อนเป็นต้น ด้วยเครื่องX-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้าโดยใช้เครื่อง X-ray –Diffraction (XRD)โดยผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2องค์ประกอบของเถ้าสามารถทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้เช่นการเกิด Slagging, Fouling, การจับตัวเป็นก้อนเป็นต้นโดยสำหรับการทดลองนี้ใช้พารามิเตอร์Alkali Index,(AI),Bed Agglomeration Index(BAI)และBase to Acid Ratio($R_{b/a}$)

AI = kg(K_2O+Na_2O)/GJ-----------------(1)

AIเท่ากับ0.34 อยู่ในช่วง0.17-0.34 จะมีแนวโน้มการเกิด slagging, foulingสูง

BAI= %(Fe_2O_3) / %(K_2O+Na_2O)---------(2)

ค่า BAIเท่ากับ 0.1< 0.15 Bed จะจับตัวเป็นก้อน,

$R_{b/a}$= %(Fe_2O_3+CaO+MgO+ K_2O+Na_2O)/

%(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3)--------------(3)

ค่า $R_{b/a}$เท่ากับ 15.02 >2.6 มีแนวโน้มการเกิด slaggingและfouling (Norman Magasiner และคณะ) และยังมีพารามิเตอร์อื่นที่มีผลกระทบ คือ Rs , Silica/Alumina Ratio, Rf , Cl และ Na_2O

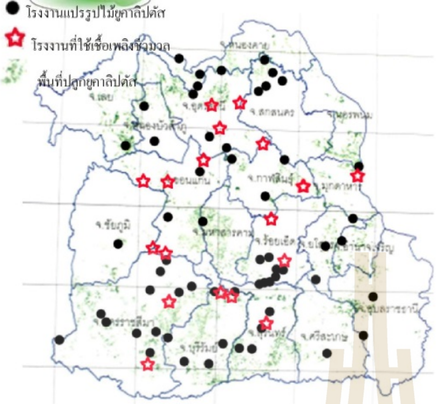
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในรูปสารประกอบออกไซด์

องค์ประกอบ	%wt	[1]%wt
SiO_2	4.62	10.04
Al_2O_3	0.93	3.1
Fe_2O_3	2.05	1.12
K_2O	17.09	9.29
TiO_2	0.53	0.12
MgO	0.86	10.91
CaO	62.66	57.74
Na_2O	3.28	1.86
P_2O_5	0.73	2.35
SO_3	1.85	3.47

หมายเหตุ : [1]Stanislav V. Vassilevet al.(2009)

ศึกษาข้อมูลความต้องการเชื้อเพลิงชีวมวลของผู้บริโภค (Demand Site)จากข้อมูลพบว่าในปี 2547 มีโรงงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทั้งหมด 21 แห่งมีขนาดโรงไฟฟ้ารวม 487.7 MW และในปี 2553 เพิ่มจำนวนขึ้นเป็น 37 แห่ง ขนาดโรงไฟฟ้ารวม 614.4 MW

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3แหล่งผลิตเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ปี2547ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ตารางที่3ข้อกำหนดเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงไฟฟ้าชีวมวล

ประเภทเปลือกไม้ยูคาลิปตัส		ชิ้น และฝอย
มาตรฐานและข้อกำหนด		ความชื้นเฉลี่ยไม่เกิน 50%
สิ่งเจือปน		หิน,ลูกรัง ดินเหนียว, เศษผ้า, เศษเหล็ก
ราคารับซื้อ (บาทต่อตัน)	รับซื้อหน้าโรงงานไฟฟ้า	200
	ขายหน้าโรงงานสับไม้	50

ศึกษากระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงได้มุ่งเน้นการพัฒนาคุณภาพสูงโดยทำการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง(Pellet) ซึ่งกระบวนการแปรรูปประกอบไปด้วยการลดขนาด ลดความชื้น และอัดแท่งการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสตั้งแต่เป็นเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสดที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 55-60 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่น 215 kg /m^3 จนถึงเป็นแท่งเชื้อเพลิงที่มีความชื้นประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่น 715 kg /m^3 จากการวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาฯ สามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบที่ 1 การสับและอบแล้วนำไปใช้เลย พบว่า ต้นทุนของการสับและอบราคา 1.180บาท/กก ที่ความชื้นต่ำกว่า 15 %wb ที่ค่าความร้อนประมาณ 16,000 kJ/kg ค่าพลังงานราคา 0.309บาท/Mcal

แบบที่สองคือการผลิตอัดเม็ด พบว่า ต้นทุนของการสับอบ และอัดเม็ดราคา 1.525 บาท/กก ที่ความชื้นต่ำกว่า 15 %wb ที่ค่าความร้อนประมาณ 16,000 kJ/kg ค่าพลังงานราคา 0.400บาท/Mcal

ตารางที่ 4ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงจากเปลือกไม้ยูคา

ต้นทุน	รายละเอียดการคำนวณ	คิดเป็น [บาท/กก.]
ต้นทุนวัตถุดิบ		
ค่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส	= 65฿/ton	0.065
ต้นทุนการลดขนาด		
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	=100 kWh/ton x3.2 ฿/kWh	0.320
ต้นทุนการอบแห้ง		
ค่าเชื้อเพลิงหม้อไอน้ำ+อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	=[200 [kg/hr.] x 1.5 [฿/kg]+(2.2+2.2+3.7+2.2+2.2)[kWh]x3.2 [฿/kWh]]/2000 [kg/hr]	0.17
ต้นทุนการอัดแท่งเชื้อเพลิง		
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า+ลำเลียง	=100.5 [kWh/ton] x3.2[฿/kWh]+7.5[kWh/ton]x 3.2 [฿/ kWh]]/1000kg	0.345
ค่าแรงคนงาน	=300฿/dayx3x4person/8hr/2000 kg/hr	0.225
รวม(1)		1.125
ต้นทุนคงที่(2)		
ต้นทุนเครื่องจักรทั้งชุด	=800[฿/hr]/2000 [kg/hr]	0.4
รวม(1)+(2)		1.525

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การพัฒนารูปแบบการบริหารจัดการเชื้อเพลิง ชีวมวลเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนพบว่า การจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสามารถแบ่งได้ 4รูปแบบคือ

1) รูปแบบการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเพื่อใช้งานเองในโรงงาน เช่นโรงงานกระดาษ ซึ่งสามารถนำไปผลิตทั้งความร้อนและไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานกระดาษ

2) รูปแบบการจัดตั้งโรงไฟฟ้าโดยอาศัยศักยภาพการผลิตของตนเองและรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากบริเวณใกล้เคียงทั้งขนาด SPP และ VSPP

3) รูปแบบการแปรรูป เช่น อัดแท่ง หรือการทำให้แห้ง เพื่อจำหน่ายให้กับอุตสาหกรรมและส่งออกเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง

4)รูปแบบการจัดจำหน่ายเพื่อเป็นเชื้อเพลิงผสมให้กับอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าที่สามารถใช้เชื้อเพลิงได้ทันที

5. สรุปและเสนอแนะ

การศึกษาศักยภาพพลังงานจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจากทดสอบและการสำรวจพบว่าข้อมูลเชิงปริมาณและข้อมูลเชิงคุณภาพของเปลือกไม้ยูคาฯยังมีศักยภาพต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานความร้อนและการผลิตไฟฟ้าโดยมีปริมาณมากถึง 0.523ล้านตันต่อปีหรือเทียบเท่ากับ 78 ktoe หรือ 26 MW โดยต้นทุนการผลิตเปลือกยูคาอัดเม็ดราคา 1,525 บาท/ตันโดยรูปแบบการใช้อาจเป็นเชื้อเพลิงหลักหรือเชื้อเพลิงเสริมกับถ่านหินซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในรูปสารประกอบออกไซด์ มีแนวโน้มที่จะส่งผลต่อการเกิดเถ้าหลอม, ตะกรันและการผุกร่อนในเตาหม้อไอน้ำโดยการใช้เปลือกยูคาลิปตัสในการเป็นเชื้อเพลิงนั้นจำเป็นต้องแปรรูปเพื่อลดการสูญเสียความร้อนในการระเหยน้ำในตัวเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและความสามารถในการผลิตไอน้ำของโรงไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบการจัดการสามารถนำไปผลิตเป็นพลังงานภายในโรงงานเองและการผลิตไฟฟ้าเพื่อจำหน่าย ตลอดจนการพัฒนาเพื่อการส่งออก

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนพลังงานทดแทน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่มอบทุนสนับสนุนมา ณ ที่นี้ด้วย

7.อ้างอิง

[1] Norman M., Chris van A., Michael B I., and Brendon J M., “Characterising fuels for biomass-coal fired cogeneration” , Thermal energy system .

[2] Stanislav V.,et al., (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel 89 (2010) 913-933.

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา

AMM-33

การศึกษาอิทธิพลของการใช้ดินขาวเพื่อลดการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและเถ้าหลอมจากเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อไอน้ำ

Study on Influence of Kaolin for Reducing Deposit and Sintering from Eucalyptus Bark Pellet in Boiler

พินิจ จิรัคคกุล[1]* และ วีรชัย อาจหาญ[2]

[1] สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ต. สุรนารี อ. เมือง จ.นครราชสีมา 30000
[2] สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ต. สุรนารี อ. เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*ติดต่อJ_pinit12@yahoo.com, 082-3055175, 043-255038

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตไม้ยูคาลิปตัสได้มากถึงปีละ 25 ล้านตัน มีเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมากถึง 4.3 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 932.46 ktoe ซึ่งสมบัติทางกายภาพมีความชื้นเริ่มต้น 59-63%, ความหนาแน่นของเปลือกเป็นชิ้น 127.5 kg /m^3 และแบบฝอย 215.4 kg /m^3 มีค่าความร้อนต่ำ เมื่อทำนายแนวโน้มการเกิด Slagging, Fouling, การจับตัวเป็นก้อน พบว่า AI (Alkali Index) มีค่า 1.13 จะมีแนวโน้มการเกิด slagging, fouling สูง BAI (Bed Agglomeration Index) มีค่า 0.10 มีแนวโน้มจับตัวเป็นก้อน และ $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) มีค่า15.02 มีแนวโน้มการเกิด sluggingและfouling และเมื่อนำเปลือกยูคาลิปตัสมาอัดแท่งความหนาแน่นจะเพิ่มเป็น 715.0 kg /m^3 ที่ความชื้น 16% wb ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm. เมื่อนำไปทดสอบในหม้อไอน้ำและวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาวพบว่า AI มีค่า 0.14-0.16 แนวโน้มจะไม่เกิด slagging, fouling BAI มีค่า 0.22-0.39 แนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนน้อย, $R_{b/a}$ มีค่า 1.23-1.75 ไม่มีแนวโน้มการเกิด slaggingและfouling แต่ผลการทดสอบหม้อไอน้ำ fouling ลดลงเมื่อใช้ดินขาว แต่การเกิดส่วนการเกิด Slagging ก็ยังเกิดขึ้น ประสิทธิภาพของหม้อต้มไอน้ำมีค่า 39.2-53.61%

คำหลัก: ตะกรัน, เถ้าหลอม, เปลือกไม้ยูคาลิปตัส, ดินขาว

Abstract

In Thailand, eucalyptus wood could be produced 25 Mtons/year. There were the eucalyptus bark 20% of fresh wood or 4.3 Mtons/year. It was equal to 932.46 ktoe of crude oil. Physical properties of eucalyptus bark had 47.65% moisture content, 127.45 kg/m^3 and 215.40 kg/m^3 density of pieces and shredded wood, respectively, and low heating value. The results of the probability of slagging, fouling and Agglomeration found that the AI (Alkali Index) was 1.13, which had tendency to slagging and fouling. The BAI (Bed Agglomeration Index) was 0.10, which had the agglomeration occurrence. The $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) was 15.02, which had tendency to slagging and fouling. The pressing of eucalyptus bark had 715.00 kg/m^3 density, 16.00% (wet basic) moisture content, and 8 mm diameter size. The experiment of the eucalyptus bark pellets in the boiler and the analyzation of the bottom ash of eucalyptus bark and mixed kaolin pellets found that AI (Alkali Index) was 0.14-0.16, which had not tendency to slagging and fouling. The BAI (Bed Agglomeration Index) was 0.22-0.39, which had the low agglomeration occurrence. The $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) was 1.23-1.75, which had not tended to slagging and fouling. In contrast, the fouling in the boiler decreased with kaolin. Efficiency of boiler had 39.2-53.61%.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29
1-3 กรกฎาคม 2558 จังหวัดนครราชสีมา

AMM-33

Keywords: Deposit, Sintering, Eucalyptus Bark, Kaolin

1. บทนำ

ไม้ยูคาลิปตัสจัดว่าเป็นไม้โตเร็วเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ และเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ (วีรชัย, 2554) จากข้อมูลความต้องการไม้ยูคาลิปตัสของประเทศไทยพบว่า ในปี 2545 ประเทศไทยใช้ไม้ยูคาลิปตัสในอุตสาหกรรมประมาณปีละ 11 ล้านตัน โดยนำมาใช้ผลิตเป็นเยื่อกระดาษ 6.5 ล้านตัน/ปี (60 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือนำมาใช้เป็นชิ้นไม้สับเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตความร้อนในอุตสาหกรรมต่างๆ 3.5 ล้านตัน/ปี (30 เปอร์เซ็นต์) โดยปัจจุบันบริษัทเอกชนที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเพื่อผลิตเยื่อกระดาษมีโครงการส่งเสริมการปลูกและพัฒนาพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสออกมาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ปัจจุบัน ปี 2553 เกิดการขยายพื้นที่การเพาะปลูกไม้ยูคาลิปตัสอย่างรวดเร็ว จากเดิม 5 ล้านไร่ เป็น 10 ล้านไร่ภายในระยะเวลาเพียงไม่กี่ปี สามารถผลิตไม้ยูคาลิปตัสได้มากถึงปีละ 25 ล้านตัน เพียงพอและรองรับต่อการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเต็มที่ อย่างไรก็ดี ในการแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสให้เป็นผลิตภัณฑ์ไม้สับสำหรับอุตสาหกรรมกระดาษนั้น มีผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ จะมีเปลือกไม้อยู่ในสัดส่วนร้อยละ 20 ของไม้ท่อนสด หรืออาจกล่าวได้ว่าประเทศไทยมีผลพลอยได้จากกระบวนการสับไม้ คือเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมากถึง 4.3 ล้านตัน/ปี คิดเป็นพลังงานเทียบเท่าน้ำมันดิบ 932.46 ktoe แต่ปัจจุบันยังไม่มีการนำไปใช้ เนื่องจาก 2 ปัจจัย คือ 1) สมบัติทางกายภาพไม่เหมาะสม คือ ความหนาแน่นต่ำ แต่ความชื้นสูง(ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์) และ 2) สมบัติทางเคมีไม่เหมาะสม คือ องค์ประกอบธาตุที่มีฤทธิ์เป็นด่าง(Alkali) อยู่ในปริมาณมาก เช่น คลอรีน(Cl) โซเดียม(Na) แคลเซียม(Ca) และโพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน และการสึกกร่อนในระบบท่อ และประสิทธิภาพของระบบการผลิตความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปัญหาดังกล่าวข้างต้นสามารถแก้ปัญหาได้โดยพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งและปรับสมบัติทางเคมีโดยใช้ดินขาวซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิจุดหลอมเหลวหรืออุณหภูมิ eutectic ทำให้ออกไซด์ของสารประกอบเปลี่ยนไป และสามารถลดการเกิดการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและการเกิดเถ้าหลอมในหม้อไอน้ำได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาการใช้เปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่ง (Eucalyptus Bark Pellet) ในระบบเผาไหม้โดยตรง (Direct Combustion) ของหม้อไอน้ำ
2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน การสึกกร่อน ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ
3) เพื่อศึกษาการใช้ดินขาว(Kaolin) เพื่อลดการเกิดเถ้าหลอม ตะกรัน การสึกกร่อน ในหม้อไอน้ำ

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ คือ ความชื้น (Moisture Content) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 และความหนาแน่น (Appearance Density) ของเปลือกยูคาลิปตัสชนิดเป็นชิ้นและเป็นฝอย
2) ศึกษาสมบัติทางเคมีของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 และASTM D2015 และวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ได้แก่ C, H, N, S, O (CHNS Analyzer) โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS Elemental Analyzer) รุ่น Analyzer CHNS-932
3) ประเมินแนวโน้มการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและการเกิดเถ้าหลอมจากวัตถุดิบที่ได้ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมจากโรงงาน โดยการวิเคราะห์ออกไซด์จากวัตถุดิบโดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) และนำมาประเมินดังสมการ (1)-(3) ซึ่งจะได้ค่าAI (Alkali Index), $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) และ BAI (Bed Agglomeration Index) โดยจะใช้ข้อมูลปริมาณ Cl และ Na เป็นส่วนประกอบการประเมินแนวโน้ม

$$AI=kg(K_2O+Na_2O)/GJ \quad (1)$$

$$R_{b/a}= \%(Fe_2O_3+CaO+MgO+K_2O+Na_2O)/\%(SiO_2+TiO_2+Al_2O_3) \quad (2)$$

$$BAI = \%(Fe_2O_3) / \%(K_2O+Na_2O) \quad (3)$$

AMM-33

ซึ่งถ้าค่า AI มีค่าอยู่ในช่วง 0.17-0.34 kg/GJ อาจเกิด Fouling และ Slagging แต่ถ้าค่า AI มากกว่า 0.34 kg/GJ มีแนวโน้มการเกิด Fouling และ Slagging แน่นอน ส่วนค่า BAI นั้น ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.15 เบด (Bed) จะจับตัวเป็นก้อน และ B/A ratio จะบอกแนวโน้มของเถ้าซึ่งประกอบด้วยโลหะต่าง ๆ จะรวมตัวกันที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นเกลือที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ B/A Ratio จะบอกถึง ลักษณะการหลอมตัวและแนวโน้มการเกิด Slag

4) การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ (Thermal Efficiency %) การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการวิจัยนี้อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน DIN EN 2032 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนหาได้จากค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำได้รับวัดค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำและอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงแล้วนำมาคำนวณหาดังสมการที่ (4) โดยการทดสอบในหม้อไอน้ำจะทำการผสมดินขาว(Kaolin) ในอัตรา 5, 10 และ 12 % โดยน้ำหนักกับเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งกำหนดให้ความดันในหม้อไอน้ำที่ 10-12 บาร์ และปล่อยไอน้ำสู่บรรยากาศเป็นภาระ และทำการป้อนอากาศเกิน 10-15% โดยวิเคราะห์จากไอเสียที่ปล่อยออกที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องเครื่องวัด Flue Gas Analyzer (Model Testo-350XL)

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_{Water}(h_{steam} - h_{water})}{\dot{m}_{fuel}(LHV)} \qquad (4)$$

$\dot{m}_{Water}$ คือ อัตราการผลิตไอน้ำ

$\dot{m}_{fuel}$ คือ อัตราการการป้อนเชื้อเพลิง

h_{water} คือ เอนทาลปีของน้ำที่ป้อน

h_{Steam} คือ เอนทาลปีของไอน้ำ

LHV คือ ความร้อนของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส (kJ/kg)

5) ศึกษาและประเมินแนวโน้มการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและการเกิดเถ้าหลอมจากเถ้าเชื้อเพลิงที่ทำการเผาไหม้ของการทดสอบหม้อไอน้ำโดยการวิเคราะห์เถ้าจะใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ออกไซด์ในเถ้าเพื่อใช้ในการประเมินดังสมการที่ (1)-(3) และใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และเครื่อง X-ray –Diffraction (XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเถ้า

4. ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

จากการสำรวจเปลือกไม้ยูคาฯ 20 จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดที่มีโรงงานสับไม้ยูคาฯมากที่สุด 3 ลาดับแรก คือ นครราชสีมา สุรินทร์ บุรีรัมย์ ตามลาดับ ในแต่ละปีภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีการแปรรูปประมาณ 5.09 ล้านตันต่อปี ซึ่งเมื่อประเมินปริมาณเปลือกไม้ยูคาฯจะมีประมาณ 1.04 ล้านตันต่อปี โดยสัดส่วนระหว่างเปลือกไม้ยูคาฯกับเนื้อไม้มีค่าเฉลี่ย 20.5 : 79.5 และมีความหนาของเปลือกไม้เฉลี่ย 4-6 มิลลิเมตร ความชื้นเริ่มต้น 59-63%, ความหนาแน่นของเปลือกเป็นชิ้น 127.5 kg /m^3 และแบบฝอย 215.4 kg /m^3 โดยเมื่อนำไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งจะได้เปลือกไม้ยูคาฯอัดแท่งมีความหนาแน่นเฉลี่ย 715.0 kg /m^3 ที่ความชื้นเฉลี่ย 16% wb ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm.

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาฯแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสแบบประมาณ (Proximate Value) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Value)

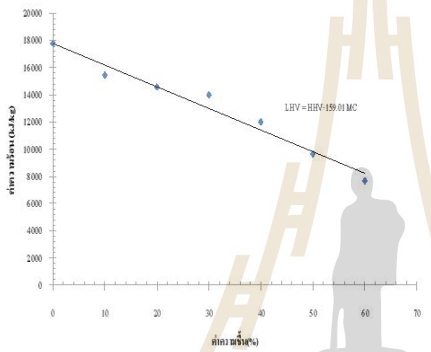
คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิง		
ร้อยละความชื้นเริ่มต้น(Wet basis)		47.65
องค์ประกอบแบบประมาณ (Dry basis)	ร้อยละของสารระเหย (%VM)	69.23
	ร้อยละของเถ้า (%Ash)	9.17
	ร้อยละของคาร์บอนคงตัว(%FC)	21.61
องค์ประกอบแบบละเอียด (Dry basis)	ร้อยละของคาร์บอน (%C)	39.13
	ร้อยละของไฮโดรเจน (%H)	3.91
	ร้อยละของไนโตรเจน (%N)	0.53
	ร้อยละของซัลเฟอร์(%S)	0.41
	ร้อยละของออกซิเจน (%O)	46.85
ค่าความร้อนสูง (kJ/kg)		16,533
ร้อยละของคลอลีน(Dry basis)		0.98

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

AMM-33

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสุทธิกับค่าความร้อนสูงและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส พบว่า ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสุทธิ (LHV) ค่อนข้างต่ำ อันเนื่องมาจากมีความชื้นสูง ดังรูปที่ 1 โดยพิจารณาความชื้นเริ่มต้นมีค่าสูงสุด 66.83 %wb ที่ค่าความร้อนสูงสุด(HHV) ของเชื้อเพลิงชีวมวล มีค่า 17.494 MJ/kg เมื่อนำมาหาค่าความร้อนสุทธิ (LHV) ดังสมการ (5) มีค่า 6.868 MJ/kg

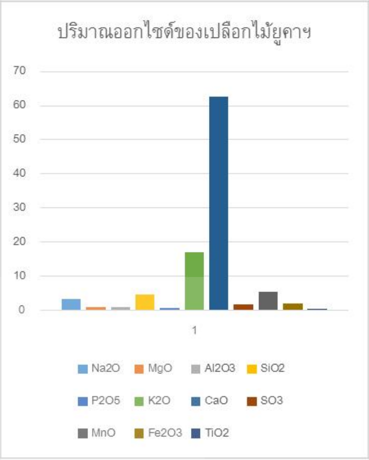
$$LHV=HHV-(159.01 \times MC) \qquad (5)$$



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนสุทธิกับค่าความชื้นสูงและความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับ

ผลการวิเคราะห์ออกไซด์จากวัตถุดิบเพื่อประเมินแนวโน้มการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและการเกิดเถ้าหลอมจากวัตถุดิบ พบว่า ปริมาณออกไซด์ของ CaO, K_2O, SiO_2, Na_2O, Fe_2O_3, SO_3 และอื่นๆ มีค่า 62.66, 17.09, 4.62, 3.28, 2.05,1.85, 8.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และ Cl มีค่า 0.98

ผลการการวิเคราะห์ออกไซด์จากเถ้า(Bottom Ash) ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและที่ผสมดินขาว ออกไซด์ของเถ้าจะเป็น SiO_2, CaO และ Al_2O_3 ส่วนใหญ่ ดังตารางที่ 2 **ซึ่ง** Al_2O_3 จะทำปฏิกิริยา K_2O **และ** SiO_2 จะส่งผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์เทียบ100% ของออกไซด์ที่วัดได้ ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสจากโรงงานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ของเปลือกไม้ยูคาฯจากโรงงานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ออกไซด์ของเถ้าเปลือกยูคาฯอัดแท่ง และเถ้าที่ผสมดินขาว

ออกไซด์	เปลือกยูคา		Kaolin		
	สด	อัดแท่ง	5%	10%	12%
SiO_2	4.62	56.53	63.26	68.74	66.04
Al_2O_3	0.93	9.64	10.45	10.27	11.82
Fe_2O_3	2.05	4.58	4.61	3.20	3.72
K_2O	17.09	2.62	2.81	2.60	2.84
TiO_2	0.53	1.35	1.04	1.03	0.89
MgO	0.86	3.48	2.70	1.85	1.99
CaO	62.66	15.64	12.33	10.04	9.74
Na_2O	3.28	ND	ND	ND	ND
P_2O_5	0.73	3.28	1.79	1.46	1.48
SO_3	1.85	ND	ND	ND	ND

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

AMM-33

ผลการทำนายผลกระทบที่มีต่อห้องเผาไหม้ของเปลือกยูคาฯในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของการเกิด Slagging, Fouling, การจับตัวเป็นก้อน พบว่า AI (Alkali Index) = kg(K_2O+Na_2O)/GJ ค่า AI >0.34 จะมีแนวโน้มการเกิด slagging, fouling สูง BAI (Bed Agglomeration Index) = %(Fe_2O_3) / %(K_2O+Na_2O) ค่า BAI < 0.15 Bed จะจับตัวเป็นก้อน, $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) = % (Fe_2O_3+CaO+MgO+K_2O+Na_2O)/ % (SiO_2+TiO_2+Al_2O_3) ค่า $R_{b/a}$ >2.6 มีแนวโน้มการเกิด slaggingและfouling ดังตารางที่ 3

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งและผสมดินขาวพบว่า AI (Alkali Index) = kg(K_2O+Na_2O)/GJ ค่า AI ต่ำกว่า 0.17 จะไม่เกิด slagging, fouling BAI (Bed Agglomeration Index) = %(Fe_2O_3) / %(K_2O+Na_2O) ค่า BAI > 0.15 Bed แนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนน้อย, $R_{b/a}$ (Base to Acid Ratio) = % (Fe_2O_3+CaO+MgO+ K_2O+Na_2O)/ % (SiO_2+TiO_2+Al_2O_3) ค่า $R_{b/a}$ <2.6 ไม่มีแนวโน้มการเกิด slaggingและfouling ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิด Slagging และ Fouling ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและการผสมดินขาว

พารามิเตอร์	AI	$R_{b/a}$	BAI
เปลือกยูคาลิปตัสสด	1.13	15.02	0.1
เปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง	0.14	1.75	0.39
Kaolin 5%	0.16	1.64	0.3
Kaolin 10%	0.14	1.23	0.22
Kaolin 12%	0.16	1.31	0.23
แนวโน้มเกิด Slagging และ Fouling	>0.34	>2.6	<0.15

การทดสอบหม้อไอน้ำด้วยเชื้อเพลิงอัดแท่ง และผสมสารเติมแต่ง โดยการทดสอบเบื้องต้นหม้อต้มไอน้ำสามารถทำความดันได้เพียง 10-13 บาร์ ทำการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงให้รักษาความดันไว้ที่ 10-12 บาร์แบบต่อเนื่อง พบว่า เชื้อเพลิงเปลือกยูคาอัดแท่งสามารถผลิตไอน้ำได้ 409.2 kg-steam/hr โดยเมื่อผสมดินขาวกับเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนักพบว่า อัตราการผลิตไอน้ำมีค่า 377.4, 366.3 และ 447.4 kg-steam/hr ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 โดยการใช้อัตราผสมดินขาว 12% ต้องใช้แรงงานในการช่วยงัดเตาเมื่อเวลาเถ้าหลอมและปิดช่องลม และความดันของไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงผสมดินขาว 12% ไม่สามารถทำความดันได้ถึง 10-12 บาร์ ทำได้เพียงเฉลี่ย 7.4 บาร์ ซึ่งจะส่งผลต่อการนำไอน้ำไปใช้งาน โดยประสิทธิภาพของหม้อต้มที่ใช้เชื้อเพลิงเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่ง100%และผสมดินขาวในอัตรา 5, 10 และ 12% โดยน้ำหนัก มีค่า 53.61, 48.5, 39.2 และ 48.5% ตามลำดับ โดยผลของตะกรันที่เกาะท่อความยาวท่อ 1 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว มีค่า 26.7, 10.9, 6.03 และ 5.02 g/hr ที่จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณดินขาวตามลำดับ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 การทดสอบสมรรถนะของการผลิตไอน้ำและประสิทธิภาพของ Boiler

ตัวอย่าง	แรงดันไอน้ำ (Bar)	ปริมาณไอน้ำที่ผลิต (kg/hr)	อัตราเชื้อเพลิง (kg/hr)	ประสิทธิภาพ (%)
เปลือกยูคาฯ อัดแท่ง	11.7	409.2	128	53.61
Kaolin 5%	11.4	377.4	131	48.5
kaolin 10%	10.5	366.3	157	39.2
kaolin 12%	7.4	447.4	155	48.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

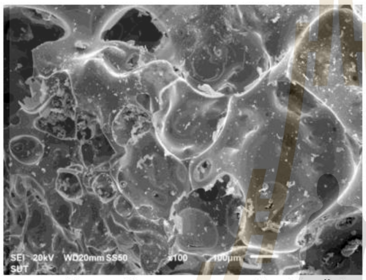
ตารางที่ 5 ผลการทดสอบปริมาณตะกรันที่เกาะท่อ อัตราการใช้เชื้อเพลิง และปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้น

ตัวอย่าง	ตะกรันเกาะท่อ (g/hr)	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr)	ปริมาณเถ้า (bottom ash) (%)	
			ผง	ก้อน
เปลือกยูคาอัดเม็ด	26.7	128	20.0	24.4
kaolin 5%	10.9	131	26.0	15.0
Kaolin 10%	6.03	157	22.4	13.6
Kaolin 12%	5.02	155	18.0	17.3

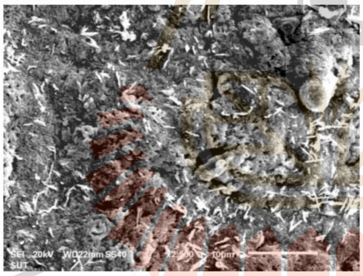
ผลการวิเคราะห์ของเถ้า(Bottom Ash) ของเปลือกยูคาฯอัดแท่ง ส่วนที่เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนแข็ง โดยใช้เครื่อง XRD ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย Silica เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกของเถ้าก้นเตาที่สภาพออกไซด์เป็น SiO_2 มีเพียงบ้างส่วนของเถ้าที่เป็นผงมี $CaCO_3$ และจากผลการวิเคราะห์เถ้าสภาพเป็นผงและจับตัวเป็นก้อนของเครื่อง XRF เถ้ามีปริมาณ SiO_2 สูงถึง 56.527 % และ 80.218 % และ มีปริมาณ $CaCO_3$ เท่ากับ 15.644 % และ 6.47 % ตามลำดับ ซึ่งสามารถจำแนกเป็นแร่ Silicate ซึ่งจะมีส่วนประกอบแร่มากกว่า 1/3 ของแร่ทั้งหมด และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD พบว่า แร่ Silica ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดของ Quartz และ Cristobalite ซึ่งแร่ทั้งสองชนิดนี้ จะเสถียรถึงอุณหภูมิ 867 องศาเซลเซียส และ ที่อุณหภูมิ 1470-1713 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยทั้งสองชนิดมีลักษณะรูปแบบเดียวกันคือ จุดเปลี่ยนจากรูปแบบอุณหภูมิสูง(high) ไปสู่รูปแบบอุณหภูมิต่ำ(Low) เช่น Quartz จุดเปลี่ยนจากรูปแบบอุณหภูมิสูงไปสู่รูปแบบอุณหภูมิต่ำ คือ อุณหภูมิ 573 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ และ High-Cristobalite เปลี่ยนเป็น Low- Cristobalite ระหว่างอุณหภูมิ 200-275 องศาเซลเซียส โดยในสภาวะอุณหภูมิปกติ Quartz จะอยู่ในรูปของ Low-Quartz เสมอ ซึ่งจากปัญหาของเถ้าหลอมส่วนใหญ่ของถ่านหินจะเกิดจากซิลิคอนกับโพแทสเซียมทำปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิเผาไหม้และเกิดเป็น eutectic compound ในเถ้าเป็นโพแทสเซียมซิลิเกท ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำประมาณ 700 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิเผาไหม้ภายในเตาของเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งมีค่าเฉลี่ย 549.1 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิสูงสุดคือ 834.8 องศาเซลเซียส จะส่งผลทำให้องค์ประกอบของธาตุหลอมตัวและจับตัวเป็นก้อน ดังรูปที่ 4 และผลของซิลิคอนจะเกิดการหลอมตัวและจับตัวเป็นก้อนแข็ง ส่งผลต่อการเผาไหม้ซึ่งอากาศจะไม่สามารถผ่านตะกรับขึ้นไปเผาไหม้กับเชื้อเพลิงได้ ทำให้เกิดอุปสรรคต่อการเผาไหม้และประสิทธิภาพของการผลิตไอน้ำ

ผลการศึกษาผลของเถ้าลอยและการเกิดตะกรันเกาะท่อของเชื้อเพลิงเปลือกยูคาอัดแท่งจากการวิเคราะห์ XRD และ XRF พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอย SiO_2 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเมื่อแยกองค์ประกอบของออกไซด์ทั้งหมดพบว่า ปริมาณ SiO_2, CaO, SO_3, Al_2O_3, Cl, Fe_2O_3, MgO K_2O_5 และ อื่นๆ มีค่าร้อยละ 43.648, 18.265, 9.793, 6.961, 5.592, 5.127, 4.739, 3.183, 2.692 ตามลำดับ ซึ่งออกไซด์ในเถ้าลอยจะส่งผลต่อตะกรันที่กัดกร่อนท่อ ดังรูปที่ 3 ซึ่งเมื่อนำเถ้าที่เกาะท่อมาวิเคราะห์ออกไซด์พบว่า จะมีการกัดกร่อนสูงเนื่องจากองค์ประกอบออกไซด์เป็น Fe_2O_3 และ SiO_2 ดังรูปที่ 5 เมื่อนำตะกรันไปวิเคราะห์ออกไซด์ด้วยเครื่อง XRF เพื่อหาปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้น คือ ปริมาณ Fe_2O_3, SiO_2, Al_2O_3, K_2O_5 และอื่นๆ มีค่าร้อยละ 82.933, 10.986, 1.693, 1.342, 3.046 ตามลำดับ ซึ่งการกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ผิวท่อสูงเกินกว่า 450-500 ^{o}C และไอระเหยที่มาในรูปของออกไซด์ของสารประกอบเถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาทำให้เกิดออกไซด์ของเหล็กและก๊าซที่เป็นคลอไรด์ เช่น Cl_2 และ HCl โดยตะกรันที่เกาะนอกท่อจะกัดกร่อนท่อที่ด้านล่างที่อุณหภูมิหลอมเหลวของ KCl และจุดที่หลอมเหลวผสม(eutectic) ก็จะต่ำลง โดยเมื่อตะกรอนเถ้าลอยของผสมระหว่าง KCl-$FeCl_2$ หรือ NaCl-$FeCl_2$ มีอุณหภูมิ eutectic จะต่ำลงอยู่ในช่วง 340-390 ^{o}C บริเวณที่ควบแน่นจะทำปฏิกิริยากับท่อและทำการกัดกร่อน ซึ่งส่วน HCl มีสถานะเป็นก๊าซจะแพร่เข้าสู่ผิวท่อและทำปฏิกิกริยากับท่อเช่นเดียวกัน ซึ่งอิทธิพลของการกัดกร่อนจากคลอไรด์

รูปที่ 3 ลักษณะของออกไซด์ของเถ้าทำปฏิกิริยาท่อไอน้ำ



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ของเถ้าเปลือกไม้ยูคาอัดแท่งที่เกาะจับตัวเป็นก้อนแข็ง



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ภาพ SEM ของตะกรันเกาะท่อไอน้ำ กำลังขยาย 2500 เท่า

ผลการผสมสารเติมแต่งดินขาวต่อเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอัดแท่งพบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยเปลือกไม้ยูคาอัดแท่ง 100% จะมีออกไซด์ SiO_2 และ CaO เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อผสมดินขาวออกไซด์ของเถ้าจะเพิ่มส่วนประกอบ Al_2O_3 เนื่องจากส่วนประกอบ Al_2O_3 ในดินมีอยู่ประมาณ 17-20% โดยน้ำหนักดินขาวที่ผสม (ฐานิตย์และคณะ,2553) ศึกษากระบวนการ Adsorbtion และ Chemical reaction ของดินขาวหรือ Kaolin พบว่า Kaolin จะดูดซับ Potassium เป็น $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ ที่อุณหภูมิ 700-800 °C โดยที่อุณหภูมิ 900 °C Potassium ซึ่งดูดซับไว้ที่ผิวของ Muscovite จะทำปฏิกิริยากับ Aluminum-silicate เป็นสารประกอบดังสมการที่ 6 แล้วจะเกิดสารประกอบ $KAlSiO_4$หรือ Kalsilite ซึ่งเป็น Crystalline และลักษณะเป็น Hexagonal จึงเรียกว่า Kaliophilite (Leucite) ซึ่งเป็น Crystalline เช่นกัน สารประกอบทั้งสองมีอุณหภูมิหลอมเหลวในช่วง 1165-1250 °C ปัญหาการเกิด fouling จึงลดลง ซึ่ง $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ จะแยกตัวจะเกิดขึ้นได้ในช่วง 850-1200 °C และเหลือเพียง Al_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งไม่ส่งผลต่อการกัดกร่อน

$$Al_2O_3+2SiO_2+2KCl+H_2O \rightarrow 2KAlSiO_4+2HCl \qquad (6)$$

ส่วนออกไซด์ของเถ้าลอยที่ส่งผลต่อตะกรันที่กัดกร่อนท่อ พบว่า ปริมาณออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากเชื้อเพลิงเปลือกยูคาอัดแท่งผสมดินขาวเป็นสารเติมแต่ง 5% 10% และ 12% โดยน้ำหนัก คือ ปริมาณ SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, K_2O_5 และอื่นๆ มีค่าร้อยละ 55.615, 22.993, 11.029, 2.836, 65.842, 9.439, 12.365, 3.766, 51.876, 28.477, 10.562 และ 2.99 % ตามลำดับ จะมีการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากองค์ประกอบออกไซด์เป็น Fe_2O_3 ลดลง โดยเชื้อเพลิงเปลือกยูคาอัดแท่งผสมดินขาวเป็นสารเติมแต่ง 5% 10% และ 12% โดยน้ำหนัก มีปริมาณ Fe_2O_3 มีค่า 22.99, 9.44 และ 28.48% ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดลงได้ 88.6% ที่ผสมดินขาว 10% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกับใช้เปลือกไม้ยูคาฯอัดแท่งเพียงอย่างเดียว ซึ่ง silicate จากเถ้าลอยจะสะสมอยู่บนด้านหลังท่อไอน้ำ

ซึ่งจากการทดสอบกับหม้อไอน้ำพบว่า จากการประเมินค่า AI, BAI และ $R_{b/a}$ จากเถ้า เปลือกยูคาฯอัดแท่ง AI ประเมินแนวโน้มว่าไม่เกิด slagging, fouling แต่ในการทดสอบพบว่า fouling มีแนวโน้มที่เกิดและกัดกร่อนท่อ ส่วนการเกิด Slagging ก็ยังเกิดขึ้น แต่เมื่อมีการผสมดินขาวแนวโน้ม fouling มีแนวโน้มไม่เกิดถึงเกิดขึ้นน้อยลง ส่วนการเกิด Slagging ก็ยังเกิดขึ้น ส่วนแนวโน้มจากค่า BAI ยังมีแนวโน้มการจับตัวเป็นก้อนเมื่อทดสอบ, $R_{b/a}$ แนวโน้มการเกิด Slag เมื่อทำการทดสอบยังเกิด Slag

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

AMM-33

5. สรุปและเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของการใช้ดินขาวเพื่อลดการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อและการเกิดเถ้าหลอมจากเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อไอน้ำ สามารถลดการเกิดตะกรันเกาะผิวท่อ เนื่องจากดินขาวจะดูดซับ Potassium เป็น $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ ที่อุณหภูมิ 700-800 ^{o}C ทำให้จุดหลอมเหลวสูงขึ้น แต่การเกิดเถ้าหลอมจากเปลือกยูคาลิปตัสอัดแท่งในหม้อไอน้ำยังไม่สามารถลดลงได้ เนื่องจากองค์ประกอบของออกไซด์ของเปลือกยูคาฯที่มีปริมาณ SiO_2 และ CaO อยู่มาก ซึ่งถ้าปริมาณแคลเซียมมีพอเพียงจะเพิ่มจุดหลอมเหลวในเถ้าได้ ซึ่งจากการประเมินแนวโน้มด้วยค่า AI, BAI และ $R_{b/a}$ ยังจำเป็นต้องนำพารามิเตอร์อื่นมาประเมินร่วม เช่น ปริมาณ Cl หรือ Na ซึ่งจะส่งผลพารามิเตอร์อื่นๆต่อการประเมินแนวโน้มการเกิด slagging, fouling เช่นค่า fouling index ที่ต้องทราบค่า Na_2O

6.กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอกราบขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนพลังงานทดแทน สานักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่มอบทุนสนับสนุนมาณ ที่นี้ด้วย

7.อ้างอิง

[1] วีรชัย อาจหาญ. (2554). รายงานฉบับสมบรูณ์ โครงการเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม.กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนพลังงานทดแทน. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

[2] ฐานิตย์ เมธิยานนท์, ประสาน สถิตเรืองศักดิ์, สราวุฒิ สังวรกาญจน์, นริศรา อินทรจันทร์ และ วิชชุลดา ชัยพร. (2553). การแก้ปัญหาการเกิด Fouling และ Sintering ในหม้อไอน้ำเพื่อนำทะลายปาล์มเปล่า (EFB) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับในผลปาล์มและกะลาปาล์มในการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำในโรงงานน้ำมันปาล์มอย่างมีประสิทธิภาพ. กองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน(สนพ.)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

BILL

ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY

Published by ORIENTAL SCIENTIFIC PUBLISHING CO.

Dr. S.A. Iqbal
Executive Editor

Postal Address
10, Gulshan-e-Iqbal, New Maulana Azad Colony,
Near St. Joseph Girls Convent School,
Bhopal - 462 001 (India)
Mobile : +91-9893222458
E-mail : iqbalojc@yahoo.com
www.ojchem.org

S.No. **OJC/11153/17**
M/s. Received on **27/05/2017**

Dear Dr. **PINIT JIRUKKAKUL**
School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology , Muang, Nakhon
Ratchasima 30000, Thailand

(A) Your manuscript **Elemental influence of eucalyptus bark pellet ash on corrosion of tube in small boiler**

has been accepted for publication in **ORIENTAL JOURNAL OF CHEMISTRY** Vol. **33**
No. - 20 **2017**

(B) To expedite the process of publication please send your subscription charges and of your co-authors subscription charges **WEERACHAI ARJHARN**

(C) Please send at your earliest A CROSSED BANK DRAFT OF **US$ 350** Drawn in favour of **ORIENTAL SCIENTIFIC PUBLISHING CO. , BHOPAL** failing which the paper may not be included in the coming issue.

Annual Subscription	:	**US$**	**Nil**
Printing Charges	:	**US$**	**350**
Color Printing Charges	:	**US$**	**Nil**
Cost of Reprints	:	**US$**	**Free**
Air mail/postal charges	:	**US$**	**0**

Total **US$ 350**
Three Hundred Fifty Only
0 Reprints will be supplied free of cost.

Dated **10-06-2017**

For : Executive Editor/Publisher

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Elemental influence of eucalyptus bark pellet ash on corrosion of tube in small boiler

Keywords: Eucalyptus bark pellet, boiler, fouling, slagging, agglomeration, kaolin

PINIT JIRUKKAKUL[1*] and WEERACHAI ARJHARN[2]

[1]School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology , Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

E-mail: j_pinit12@yahoo.com

[2]School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand. .

E-mail:arjharh@g.sut.ac.th

ABSTRACT

The elementary ash in eucalyptus bark affects the corrosion and efficiency of pipes in the boiler tube applying in food industries. The eucalyptus bark had high chloride content at 0.660-1.975%, which reacted with compound gaseous to form potassium chloride. The most oxide value (62.66%) of fresh eucalyptus bark was from calcium oxide, which promoted agglomeration. Reduction of agglomeration may be done by addition of kaolin. Therefore, kaolin was added into eucalyptus bark pellet for 5, 10, and 12% before using as fuel to produce steam compared with control (pellet without kaolin). The results showed that the tendency for fouling and agglomeration was decreased when 10 and 12% kaolin was added. At 10% kaolin addition, the slagging ash was lowest and the agglomeration was reduced for 77.4%. The eucalyptus bark pellet with 10% kaolin was the most effective fuel for water tube boiler.

ประวัติผู้เขียน

นายพินิจ จิรัคคกุล เกิดเมื่อวันที่ 22 กันยายน พ.ศ. 2517 ที่อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี เป็นบุตรของนายตี๋แซ่โง้ว และนางบุญมี แซ่โง้วเริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรีระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างกลโรงงาน วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาแม่พิมพ์พลาสติก วิทยาลัยเทคนิคมีนบุรีสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) พ.ศ. 2542จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) พ.ศ. 2548จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในขณะที่ศึกษาระดับปริญญาปริญญาโทได้เป็นผู้ช่วยสอนวิชาเขียนแบบวิศวกรรมI และวิชาอุณหพลศาสตร์ Iและทำงานในตำแหน่งวิศวกรประจำศูนย์พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนและในปี พ.ศ. 2552ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานแผนพลังงานทดแทน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ปีงบประมาณ 2553และระหว่างที่ศึกษาระดับปริญญาเอก ได้รับมอบหมายให้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง วิศวกรการเกษตรปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยเกษตรวิศวกรรมขอนแก่น สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ผลงานวิจัยระดับปริญญาเอกที่ได้รับการเผยแพร่มีรายละเอียดปรากฏดังแสดงในภาคผนวกฌ.