การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม
ในกระบวนการอบแห้งชีวมวล

นายธนธัช มุขขันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

PERFORMANCE EVALUATION OF FLASH DRYER

FOR BIOMASS DRYING PROCESS

Thanathant Mookkan

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Agricultural and Food Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งชีวมวล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.วีรชัย อาจหาญ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ธนธัช มุขขันธ์ : การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งชีวมวล (PERFORMANCE EVALUATION OF FLASH DRYER FOR BIOMASS DRYING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ, 90 หน้า.

การประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งชีวมวลที่มีลักษณะเป็นเส้นใยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะ พลังงาน และต้นทุนที่ใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ขั้นตอนการศึกษา 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว 2) ทำการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลให้เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมพร้อมทั้งพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป 3) ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบพาหะลมโดยทดสอบการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน 300, 480 และ 600 kg/hr อุณหภูมิลมร้อน 130 และ160 ^{o}C 4) ศึกษาต้นทุนในกระบวนการอบแห้งเชื้อเพลิงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ผลการศึกษาพบว่าค่าความชื้นและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด อยู่ระหว่าง 50-65% w.b. และ 120-150 kg/m^3 ตามลำดับ มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม นอกจากนี้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงไม่มีผลต่อความชื้นสุดท้ายของเชื้อเพลิงชีวมวล แต่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้น โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 300 kg/hr จะทำให้เชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีค่าความชื้นต่ำกว่า 30% w.b. อันเป็นค่าที่เหมาะสมจะนำไปอัดเม็ดเพื่อให้คงรูปได้ ในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าวที่อัตราการป้อน 300 kg/hr มีค่าพลังงานจำเพาะ 3.39, 2.84 และ 3.36 MJ/kg ตามลำดับ ประสิทธิภาพการอบแห้งมีค่า 78.85, 81.83 และ 68.90% ตามลำดับ ส่วนต้นทุนการแปรรูปพร้อมใช้ (ASFINE) มีค่า 0.43, 0.36 และ 0.43 บาท/Mcal ตามลำดับ ต่ำกว่าการใช้ถ่านหินซึ่งมีค่า ASFINE 0.55 บาท/Mcal ดังนั้นการแปรรูปและอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดมีศักยภาพที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเชิงพาณิชย์ได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร ลายมือชื่อนักศึกษา____________________

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_______________

THANATHANT MOOKKAN : PERFORMANCE EVALUATION OF FLASH DRYER FOR BIOMASS DRYING. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WEERACHAI ARJHARN, Ph.D., 90 PP.

BIOMASS/EUCALYPTUS/ FLASH DRYER

This study is a performance evaluation of a flash dryer for fibrous biomass drying process. The objectives were to study performance of the flash dryer as well as the energy used in biomass drying process and to study the cost of biomass drying using the flash dryer. The study consisted of 1) study of physical properties of selected biomass feedstocks, i.e. Eucalyptus bark, empty fruit bunch (EFB) and coconut fiber; 2) processing the biomass feedstocks to be suitable for the flash dryer along with recording their corresponding energy consumption; 3) biomass drying test at biomass feed rates of 300, 480 and 600 kg/hr and at hot air temperatures of 130 and 160 °C; and 4) cost analysis of biomass flash drying. Results showed that these biomass feedstocks had moisture content between 50 and 65% w.b. with density ranging from 120-150 kg/m^3. They are considered suitable for drying in a flash dryer. When drying these biomass feedstocks with the flash dryer, hot air temperature did not affect the final moisture content of these biomass feedstocks but it was affected by biomass feed rate. At a feed rate of 300 kg/h, the moisture content of these biomass feedstocks reduced to lower than 30% w.b., which is suitable for further use in pelletizing process. The specific energy consumption for Eucalyptus bark, EFB and coconut fiber drying at 300 kg/h was 3.39, 2.84 and 3.36 MJ/kg, respectively; with their respective drying efficiency of 78.85, 81.83 and 68.90%. The ready-to-use preparing cost (ASFINE) for Eucalyptus bark, EFB and coconut fiber was 0.43, 0.36 and 0.43

Baht/Mcal, respectively. They are cheaper than coal, whose price is 0.55 Baht/Mcal. Overall, processing and flash drying of these biomass feedstocks are commercially feasible.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Agricultural Engineering Student's Signature_______________________

Academic Year 2012 Advisor's Signature_________________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อาจหาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการ ช่วยแก้ไขปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศสิริโยธิน และอาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ และบุคลากรศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำปรึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้วิจัย และสำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้และมีหลักธรรมในการดำเนินชีวิตที่ดีตลอดมา

ธนธัช มุขขันธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 1
1.3 ขอบเขตการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.1 บทนำ 3
2.2 เชื้อเพลิงชีวมวล 3
2.2.1 โครงสร้างทางกายภาพ 3
2.3 หลักการอบแห้งเบื้องต้น การลดความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวล 4
2.3.1 หลักการลดความชื้น 5
2.4 ประเภทของเครื่องอบแห้งสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล 7
2.5 การขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลม 11
2.5.1 ประเภทของการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลม 11
2.6 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 12
2.6.1 ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 12
2.6.2 ข้อดีข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7 ประเภทของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 15
2.7.1 ชนิดที่ป้อนวัสดุเปียกเข้าเครื่องอบแห้งโดยตรง 15
2.7.2 ชนิดที่มีตัวกระจายวัสดุ 15
2.7.3 ชนิดที่มีเครื่อง disintegrater 16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
3 วิธีการดำเนินการวิจัย 19
3.1 บทนำ 19
3.2 วิธีการวิจัย 19
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด 22
3.3.1 วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง 22
3.3.2 เครื่องกำเนิดไอน้ำ 23
3.3.3 สายพานลำเลียงวัสดุ 25
3.3.4 เครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีวมวล 26
3.3.5 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 26
3.3.6 เครื่องบดละเอียด 27
3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล 28
3.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงต่าง ๆ ของการอบแห้งแบบพาหะลม 30
3.6 พลังงานในการอบแห้ง 31
3.7 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง 31
4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 33
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล 33
4.4.1 สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล 33
4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ 34
4.2.1 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส 34
4.2.2 ทะลายปาล์ม 36
4.2.3 ขุยมะพร้าว 38

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 อัตราการระเหยน้ำ 41
4.3.1 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส 41
4.3.2 ทะลายปาล์ม..........42
4.3.3 ขุยมะพร้าว 44
4.4 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง..........46
4.4.1 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส 46
4.4.2 ทะลายปาล์ม..........47
4.4.3 ขุยมะพร้าว 49
4.5 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง..........51
4.6 การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน 52
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..........55
5.1 สรุปผลการทดลอง..........55
5.1.1 สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล..........55
5.1.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ..........55
5.1.3 อัตราการระเหยน้ำ 55
5.1.4 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 55
5.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพรวมของการอบแห้ง..........56
5.1.6 การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน..........56
5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์..........56
5.3 ข้อเสนอแนะ 56

รายการอ้างอิง 57
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ..........59
ภาคผนวก ข. ตารางบันทึกข้อมูลการอบแห้งชีวมวลด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 62
ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา..........81

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ประวัติผู้เขียน 90

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 รายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน 24
3.2 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อย 26
3.3 ข้อมูล/ข้อกำหนดการออกแบบทางวิศวกรรมของเครื่องอบแห้ง 27
3.4 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อยแบบละเอียด 28
3.5 ลักษณะการทดลอง พารามิเตอร์ ความถี่ และดัชนีชี้วัด........31
4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล 33
4.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 34
4.3 การเปรียบเทียบผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้น 35
4.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของทะลายปาล์ม 36
4.5 การเปรียบเทียบผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้น 37
4.6 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขุยมะพร้าว 39
4.7 การเปรียบเทียบผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้น 39
4.8 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130°C........41
4.9 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 160°C........42
4.10 ผลการอบแห้งทลายปาล์มที่อุณหภูมิ 130°C 43
4.11 ผลการอบแห้งทลายปาล์มที่อุณหภูมิ 160°C 43
4.12 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 130°C........45
4.13 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 160°C........45
4.14 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130°C........46
4.15 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 160°C........47
4.16 ผลการอบแห้งทะลายปาล์มที่อุณหภูมิ 130°C 48
4.17 ผลการอบแห้งทะลายปาล์มที่อุณหภูมิ 160°C 48
4.18 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 130°C........50
4.19 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 160°C........50
4.20 ประสิทธิภาพในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้ง 52

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.21 การวิเคราะห์ต้นทุนในการอบแห้งชีวมวล 52
4.22 การวิเคราะห์ต้นทุนเทียบกับการระเหยน้ำ 53
4.23 การวิเคราะห์ต้นทุนเทียบกับค่าความร้อน 53
4.24 แสดงต้นทุนเชื้อเพลิงต่อพลังงานของถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ 54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น 6
2.2 เครื่องอบแห้งโรตารีแบบช่องเดี่ยว 7
2.3 ด้านข้างของ Disk dryers 8
2.4 ด้านข้างของ Cascade dryer 9
2.5 Superheat steam dryer 9
2.6 Batch dryer 10
2.7 เครื่องแห้งแบบพาหะลม (Flash dryer) 10
2.8 แสดงการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลมระบบดูด 11
2.9 แสดงการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลมระบบลมอัด 12
2.10 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมอย่างง่าย 12
2.11 ตัวกระจายวัสดุก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 13
2.12 เครื่องอบแห้งแบบวงแหวน 14
2.13 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนเข้าโดยตรง 15
2.14 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดที่มีเครื่องกระจายวัสดุ 15
2.15 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดที่มี Disintegrater 16
3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย 20
3.1 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย (ต่อ) 21
3.2 กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม 21
3.3 เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลอง 22
3.4 ทะลายปาล์มที่ใช้ในการทดลอง 22
3.5 ขุยมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง 22
3.6 ระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 23
3.7 ต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 24
3.8 ถังผสมไอเสียจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ 25
3.9 การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องสับย่อย 25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.10 เครื่องหั่นย่อยวัสดุชีวมวล 26
3.11 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 27
3.12 กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม 28
3.13 การทดสอบหาความหนาแน่นปรากฏ 29
3.14 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม 30
3.15 ลักษณะของจุดเก็บตัวอย่าง 30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับช่วงของจุดต่าง ๆ ของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130 และ 160°C 35
4.2 ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 และ 160°C 36
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับช่วงของจุดต่าง ๆ ของการอบแห้งทะลายปาล์มที่อุณหภูมิ 130 และ 160°C 37
4.4 ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 และ 160°C 38
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับช่วงของจุดต่าง ๆ ของการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ130 และ 160°C 40
4.6 ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 และ 160°C 40
4.7 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำที่อัตราการป้อนต่าง ๆ 42
4.8 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำที่อัตราการป้อนต่าง ๆ 44
4.9 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำที่อัตราการป้อนต่าง ๆ 46
4.10 การเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส 47
4.11 การเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการอบทะลายปาล์ม 49
4.12 การเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขุยมะพร้าว 51

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

q_T = Drying Time

h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนจากอากาศร้อนสู่ผิววัสดุ

h_r = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุกับผนังห้องอบ

u_k = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของการอบโดยการพาและการนำความร้อนผ่านชิ้นวัสดุสู่ผิวหน้าซึ่งมีการระเหย

T_v = ค่าอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้ง (°C)

T_i = ค่าอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและวัสดุ (°C)

$\overline{X}'_E$ = Equilibrium moisture content

R_c = Constant Rate Drying

R_f = Falling Rate Drying

η_t = ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง (%)

m_w = ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)

h_{fg} = ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ/kg)

m_f = มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบแห้ง (kg)

LHV = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kJ/kg)

MC = ความชื้นวัสดุชีวมวลมาตรฐานเปียก (%)

m_d = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

m_w = น้ำหนักตัวอย่างหลังก่อนอบ (g)

ρ_b = ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)

m = มวลของชีวมวลในภาชนะ (kg)

V = ปริมาตรของภาชนะ (m^3)

SEC = Specific Energy Consumption

P_e = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

Cp_{ex} = ค่าความจุความร้อนของไอเสีย (kJ/kg °C) = 1.12 kJ/kg°C

m_{ex} = มวลของไอเสีย (kg/s)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_{ex} = อุณหภูมิของไอเสีย °C

η_t = ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง (%)

m_w = ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)

h_{fg} = ความร้อนแผงที่ใช้ในการระเหยน้ำ (MJ/kg)

Q = พลังงานความร้อนของไอเสีย+พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า (MJ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น แกลบ กะลาปาล์ม ชานอ้อย ฯลฯ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ เช่น เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากโรงงานสับไม้ ทะลายปาล์มที่เหลือจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม และขุยมะพร้าวที่เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปมะพร้าว วัสดุดังที่กล่าวมานั้นยังอยู่ในสภาพที่ไม่พร้อมใช้ เช่น มีความชื้นสูง ขนาดไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นจึงควรมีกระบวนการจัดการกับชีวมวลที่ให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้เป็นเชื้อเพลิงให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานได้ เพื่อให้เหมาะกับลักษณะความต้องการใช้เป็นเชื้อเพลิง

การอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งในการแปรรูปเชื้อเพลิง เพื่อทำให้วัสดุชีวมวลมีความชื้นลดต่ำลง เหมาะกับสภาพการใช้งาน แต่เครื่องอบแห้งมีประเภท ข้อจำกัด และวิธีการใช้ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของวัสดุชีวมวล เช่น ขนาด น้ำหนัก ลักษณะของวัสดุที่ใช้อบแห้ง (ผง, เส้นใย, ท่อน) ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อหาความเหมาะสมในเลือกวิธีการอบแห้ง

การอบแห้งแบบพาหะลมเป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบโดยวิธีอื่น อย่างไรก็ตามการอบแห้งแบบพาหะลมมีข้อจำกัดคือ วัสดุที่ใช้อบแห้งต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาหรือความหนาแน่นต่ำ สามารถลอยตัวในอากาศได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุที่จะทำการอบแห้งเพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะทำการอบแห้งแบบพาหะลม

ในงานนี้จะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิด คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม ขุยมะพร้าว โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งจะทำการศึกษาเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อนำมาใช้อบแห้งแบบพาหะลม ต้นทุนการแปรรูปเชื้อเพลิง และพลังงานที่ใช้ในการผลิต

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลได้แก่ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว เพื่อทำการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวมวลให้เหมาะสมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมพร้อมทั้งพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งแบบพาหะลมโดยทดสอบการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราการป้อน 300 480 และ 600 kg/hr อุณหภูมิลมร้อน 130 และ 160^{o}C

1.2.3 ศึกษาต้นทุนในกระบวนการอบแห้งเชื้อเพลิงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้จะใช้ต้นแบบเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิด 2 ถังอบ ของศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยการนำไอเสียจากกระบวนการผลิตไอน้ำไปใช้ในการลดความชื้นเชื้อเพลิง 3 ชนิด คือ เปลือกยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว ที่อัตราการไหลลมร้อนประมาณ 0.43 m^3/s โดยควบคุมอุณหภูมิทางเข้าเครื่องอบที่ 130±10 ^{o}C และ160±10 ^{o}C

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ต้นทุนในการอบแห้งวัสดุชีวมวลชนิดต่างๆ

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประยุกต์ใช้หรือดัดแปลงใช้กับชีวมวลอย่างอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงประเภทของ เชื้อเพลิงชีวมวล หลักการลดความชื้น ประเภทของเครื่องอบแห้งสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2 เชื้อเพลิงชีวมวล

มวลชีวภาพหรือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้หรือเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร หรือจากการเก็บเกี่ยว เป็นที่ทราบกันดีว่า ประเทศไทยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น แกลบ กะลาปาล์ม ชานอ้อย ฯลฯ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต ที่เกิดขึ้นในโรงงาน อย่างไรก็ตามยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อัน เนื่องมาจากเศษวัสดุดังกล่าวยังอยู่ในสภาพที่ไม่พร้อมใช้ ต้องมีการจัดการแปรรูปเข้ามาเกี่ยวข้อง การจำแนกเชื้อเพลิงชีวมวลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) เชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ (commercialized biomass) คือ เศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูป ซื้อ-ขายง่าย ในที่นี้ได้แก่ แกลบ ชานอ้อย กะลาปาล์ม ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในเชิงพาณิชย์

2) เชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ (non-commercialized biomass) คือเศษวัสดุเหลือใช้ที่กระจัดกระจายในไร่ นา สวนเกษตร และเศษวัสดุเหลือใช้ที่ได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทันที เช่น ฟางข้าว ยอด/ใบอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง ทางปาล์ม ทะลายปาล์ม และเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งยังเป็นชีวมวลที่คงเหลือ ยังไม่ถูกนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ดีเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ได้ โดยผ่านกระบวนการจัดการคือการรวบรวมและแปรรูปให้พร้อมใช้ ทั้งนี้จำเป็นต้องทำการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงดังกล่าวอย่างละเอียดต่อไป

2.2.1 โครงสร้างทางกายภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดและรูปร่าง

เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นของแข็งแต่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล เช่นแกลบมีขนาดเล็กไม่เกิน 1 cm ปีกไม้ที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารามีความยาวประมาณ 1 m และชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาลจะมีสภาพเป็นเส้นยาว 10-20 cm เปลือกยูคาลิปตัสส่วนใหญ่มี 2 ขนาดคือมีลักษณะเป็นชิ้น และเป็นฝอย ขึ้นอยู่กับกระบวนการแปรรูป ซึ่งการที่เปลือกยูคาลิปตัสมีขนาดดังกล่าวทำให้มีความหนาแน่น (bulk density) ต่ำ

ความชื้น

เชื้อเพลิงชีวมวลในสภาพสดส่วนใหญ่จะมีความชื้นสูง เช่นไม้กระถินยักษ์สด มีความชื้นประมาณ 50% w.b. ทางปาล์มมีความชื้นประมาณ 70% w.b. เหง้ามันสำปะหลังมีความชื้นประมาณ 50-60% w.b. (สุภัทร หนูแย้ม, 2551) และซังข้าวโพดมีความชื้นประมาณ 40-50% w.b. ทะลายปาล์มมีความชื้นประมาณ 60-70% w.b. ขุยมะพร้าวมีความชื้นประมาณ 40-60% w.b. แต่มีชีวมวลบางชนิดที่มีความชื้นค่อนข้างต่ำ คือ แกลบ มีความชื้นประมาณ 12-14% w.b. ใบอ้อยยอดอ้อยมีความชื้นประมาณ 10% w.b. กะลาปาล์มมีความชื้นประมาณ 12% w.b.

2.3 หลักการอบแห้งเบื้องต้น การลดความชื้นเชื้อเพลิงชีวมวล

การลดความชื้นเป็นขั้นตอนหนึ่งในการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่ ที่ทำการเก็บรวบรวมและแปรรูปโดยการสับ/ย่อยลดขนาดจากพื้นที่ไร่-นา สวนเกษตร จะอยู่ในลักษณะเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เชิงพาณิชย์ มีความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งความชื้นจะมีความสัมพันธ์กับค่าการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรง กล่าวคือค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเชื้อเพลิงชีวมวลมีความชื้นสูงขึ้น (สาวิตรี คำหอม, 2551) จากการศึกษา “โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร” โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทต่าง ๆ ได้สรุปว่า ขนาดและความชื้นของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็ก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี คือขนาดโดยประมาณอยู่ที่ 40W x 40L x 60H mm^3 และ ความชื้นไม่เกิน 15% (วีรชัย อาจหาญ และคณะ, 2551) นอกจากนี้ยังพบว่าเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงจะมีแนวโน้มเสื่อมคุณภาพ ถูกทำให้ย่อยสลายได้ง่ายโดยเชื้อราและเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้ระยะเวลาการเก็บรักษาที่จะคงสภาพเชื้อเพลิงชีวมวลสั้นลง ส่งผลต่อการวางแผนการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลของโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเป็นอย่างยิ่ง

2.3.1 หลักการลดความชื้น

การลดความชื้นโดยปกติมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กับวัสดุทางการเกษตรหรือเชื้อเพลิงชีวมวลจะใช้วิธีการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลสาร โดยทั่วไปจะ

อาศัยความร้อนจากภายนอก ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่วัสดุที่ต้องการ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าไปจะทำให้ความชื้นของวัสดุที่อยู่ที่ผิวและเนื้อวัสดุระเหยออกมาดังแสดงไว้ในสมการ ที่ (2.1) ทั้งนี้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง จะถูกกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (drying time) จากความชื้นเริ่มต้นไปสู่ความชื้นที่ต้องการ

$$q_T = h_v A(T_v - T_i) = h_c A(T_v - T_i) + h_r A(T_v - T_i) + u_k A(T_v - T_i) \qquad (2.1)$$

เมื่อ

h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากอากาศร้อนสู่ผิววัสดุ

h_r = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุกับผนังของห้องอบ

u_k = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายเทความร้อนสู่ผิวหน้าของการอบโดยการพาและการนำความร้อนผ่านชิ้นวัสดุสู่ผิวหน้าซึ่งมีการระเหย

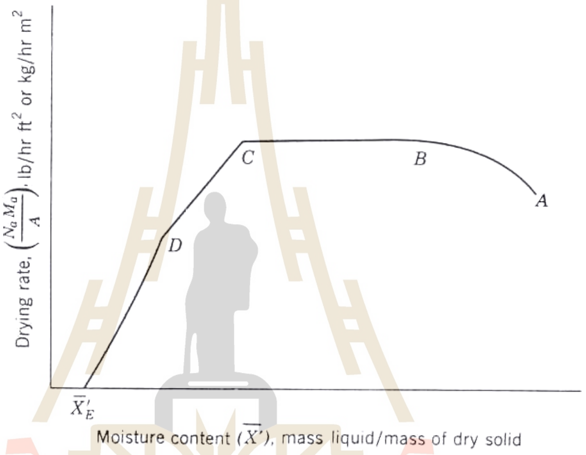
T_v , T_i คือค่าอุณหภูมิอากาศที่ใช้อบแห้งและอุณหภูมิผิวต่อระหว่างอากาศและวัสดุ

ความจุความชื้น (moisture content) สามารถระบุได้ทั้งเป็นความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis, % w.b.) และ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (dry basis, % d.b.) ซึ่งใช้ฐานในการเปรียบเทียบแตกต่างกัน ความชื้นมาตรฐานเปียกหมายถึงการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักรวมของวัสดุ ส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักแห้งของวัสดุเท่านั้นในการใช้คำนวณและออกแบบการอบแห้งนิยมใช้ความชื้นมาตรฐานแห้งเป็นมาตรฐาน

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้การอบแห้งคือสมบัติและประเภทของความชื้นของวัสดุ โดยปกติความชื้นที่อยู่ในวัสดุจะประกอบไปด้วย ความชื้นรอบผิว (adsorbed moisture) และความชื้นในเนื้อวัสดุ (absorbed moisture) ซึ่งความชื้นรอบผิวจะเป็นความชื้นที่ถูกดึงออกไปได้ง่ายนอกจากนี้ยังมีความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ (relative humidity) ซึ่งมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งยาวนานขึ้นอีกด้วย โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใด ๆ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ยังคงเหลืออยู่ในเนื้อวัสดุจะสมดุลกับความจุความชื้นอากาศที่ใช้อบ โดยที่ความชื้นในวัสดุดังกล่าวจะไม่ลดต่ำกว่านี้อีกแม้ว่าจะใช้เวลานานเท่าใดก็ตามเราเรียกความชื้น ณ จุดนี้ว่า ค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, $\overline{X}'_E$)

อัตราการอบ (drying rate) เป็นตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่สามารถบอกให้ทราบถึงระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง หรือกล่าวได้ว่าค่าความชื้นที่ระเหยออกไปได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หน่วยอาจเป็นปอนด์น้ำต่อตารางฟุตชั่วโมงหรือกิโลกรัมน้ำต่อตารางเมตรชั่วโมงดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 โดย

ปกติในการอบแห้งวัสดุหนึ่งๆ จะมีอัตราการอบแห้ง 2 ช่วง คือ ก) Constant Rate Drying (R_c) คือ การอบแห้งในช่วงที่มีอัตราการระเหยน้ำต่อพื้นที่เป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นเหลือเฟือความชื้นจึงเคลื่อนสู่ผิวหน้าได้ทันเวลากับความร้อนที่จ่ายจากลมร้อนมาที่ผิว ส่วนใหญ่จะเป็นความชื้นรอบผิว (adsorbed moisture) หรือ ความชื้นอิสระ (unbound moisture) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง B-C และ ข) Falling Rate Drying (R_f) คือการอบในช่วงที่ปริมาณน้ำที่ผิววัสดุแห้งลงเมื่อน้ำระเหยมาที่ผิวไม่ทันอัตราการระเหยต่อหน่วยพื้นที่และเวลาก็จะลดในช่วงนี้อุณหภูมิที่ผิวอาจค่อยๆเพิ่มขึ้นและค่า R_f อาจจะแปรผันตรงกับค่าความชื้นที่เหลืออยู่ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง C-D วัสดุบางประเภทอาจมีแต่ falling rate ตลอดการอบเลยก็ได้ ทั้งนี้การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อความชื้นของวัสดุลดลงถึงจุดความชื้นสมดุล



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

จากหลักการลดความชื้นโดยวิธีการอบแห้งที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าองค์ประกอบการอบแห้งจะประกอบไปด้วย 1) แหล่งพลังงานความร้อน 2) พัดลมในการพาความร้อน และ 3) ถังอบวัสดุ การเลือกใช้หรือการออกแบบเครื่องอบแห้งจะต้องพิจารณาถึงวัสดุที่ต้องการนำมาอบแห้ง เนื่องจากเครื่องลดความชื้นนั้นมีหลายอยู่รูปแบบจึงมีทฤษฎีจำนวนมาก ต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน

การหาประสิทธิภาพรวมการอบแห้งของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำต่อปริมาณความร้อนที่ให้ด้วยเชื้อเพลิงตามสมการที่ (2.2)

$$\eta_t = \frac{m_w h_{fg}}{m_f LHV} \times 100 \qquad (2.2)$$

โดยที่ η_t คือ ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง, %

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย, kg

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ, $\frac{kJ}{kg}$

m_f คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอบแห้ง , kg

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงที่ใช้ , $\frac{kJ}{kg}$

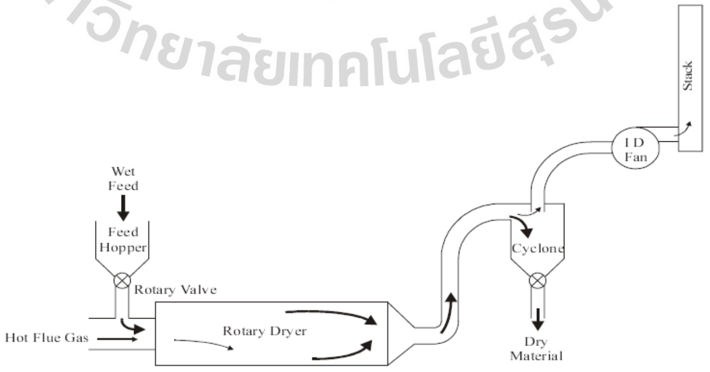
2.4 ประเภทของเครื่องอบแห้งสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล

เครื่องอบแห้งที่นิยมใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลมีอยู่หลายประเภทจำแนกตามวิธีการ และชนิดของถังอบแห้ง อาจแบ่งได้ 6 ประเภท (Wade A.Amos, 1998) คือ

1) Rotary dryer (เครื่องอบแห้งแบบโรตารี)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลายชนิด แต่นิยมใช้สำหรับอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีลักษณะเป็นแบบช่องเดียวที่รับสัมผัสความร้อนโดยตรง ดังรูปที่ 2.2 หลักการทำงานจะใช้ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุอบโดยตรงภายในตัวถังที่หมุน การหมุนของตัวถังทรงกระบอกจะอาศัยใบพาช่วยโรยวัสดุอบผ่านอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิและเพิ่มอัตราการลดความชื้น ท่อลมร้อนจะต่อตรงเข้าไปในเครื่องอบแห้งโดยตรง และอีกด้านหนึ่งจะติดตั้งหัวเผาหรือเครื่องทำความร้อน

เครื่องอบแห้งโดยทั่วไป วัสดุอบและลมร้อนจะไหลขนานกัน โดยลมร้อนที่สุดจะสัมผัสกับวัสดุอบที่มีความชื้นสูงที่สุด แต่สำหรับวัสดุที่อุณหภูมิไม่มีผลกับวัสดุ ลมร้อนกับวัสดุจะไหลในทิศสวนทางกัน คือวัสดุอบที่แห้งที่สุดจะปะทะลมร้อนที่ร้อนที่สุดและมีความชื้นสัมผัสน้อยที่สุด ในสุดท้ายวัสดุอบที่มีความชื้นน้อยก็จะออกจากเครื่องอบแห้ง แต่อาจจะมีการลุกไหม้เกิดขึ้น หากวัสดุอบที่แห้งแล้วเจอกับลมร้อนที่อุณหภูมิสูงเครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีความหนาแน่นปานกลาง เช่น ไม้สับ เหง้ามันสำปะหลังสับ ทางปาล์มสับ

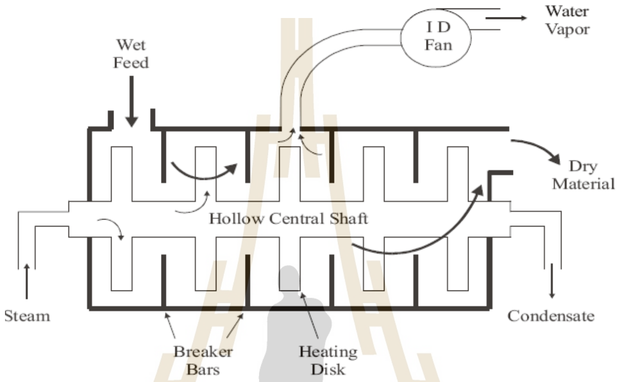


รูปที่ 2.2 เครื่องอบแห้งโรตารี (rotary dryer) แบบช่องเดี่ยว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) Disk dryers

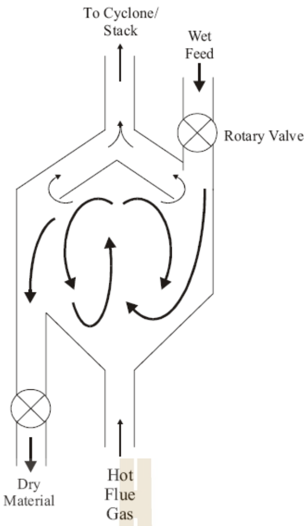
เครื่องอบชนิดนี้เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีการเคลื่อนตัวต่ำ ภายในเครื่องอบ วัสดุอบจะถูกทำให้ร้อนโดยไอน้ำจะเข้าไปในเพลากลาง ซึ่งมีจานที่มีรูติดอยู่เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน โดยมีส่วนที่ยื่นออกมา (finger) เพื่อช่วยผสมวัสดุและช่วยเก็บสะสมความร้อน เครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถใช้งานได้ในสภาวะสุญญากาศ หรือแรงดันต่ำได้ ส่วนไอน้ำที่ควบแน่นจากการอบสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และนำกลับไปสู่หม้อต้ม (boiler) ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เครื่องอบแห้งชนิดนี้เหมาะสำหรับอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะหมาดน้ำ เช่น sludge ต่างๆ



รูปที่ 2.3 ด้านข้างของ disk dryers

3) Cascade dryers (เครื่องอบแห้งแบบโรยตัว)

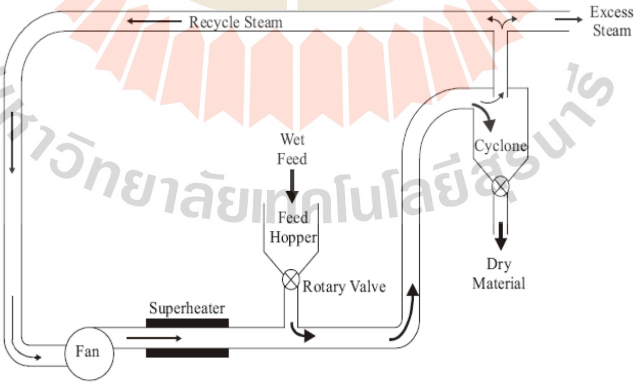
เครื่องอบแห้งชนิดนี้โดยทั่วไปจะใช้ในการอบแห้งเมล็ดพืช แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวัสดุอบที่เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล หลักการทำงานคือวัสดุอบจะถูกนำเข้าสู่ถังและถูกโรยตัวเข้าไปในห้องอบและลอยตัวโดยลมร้อน หมุนเวียนในห้องอบแห้ง (รูปที่ 2.4) เมื่อความชื้นลดลงจะทำให้น้ำหนักวัสดุอบเบาลงจะถูกเป่าให้เคลื่อนที่ออกไปทางด้านช่องเปิดด้านข้างของถัง โดยทั่วไปวัสดุจะใช้เวลาอยู่ในถังอบประมาณ 2 นาที เครื่องอบแห้งแบบโรยตัวนี้เหมาะสำหรับวัสดุอบที่มีน้ำหนักเบา และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เหมือนกับเครื่องอบแบบพาหะลม



รูปที่ 2.4 ด้านข้างของ Cascade dryer

4) Superheat steam dryer

เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีลักษณะการทำงานคล้ายๆกับ Flash dryers แต่จะใช้ไอน้ำแทนลมร้อน ดังรูปที่ 2.5 หลักการทำงานคือเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำให้สูงกว่าอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำยิ่งยวดมาดึงความชื้นออกจากวัสดุอบ ซึ่งไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวดจะเปลี่ยนเป็นไอน้ำอิ่มตัว สามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการอบแห้งได้อีกประมาณ 90% ขณะที่อีก 10% จะถูกระบายทิ้งหรือเอาไปใช้ในส่วนอื่นของโรงงานได้

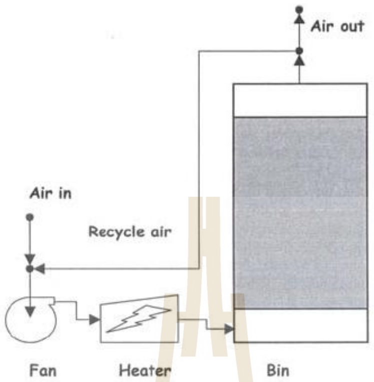


รูปที่ 2.5 Superheat steam dryer

5) Batch dryer (เครื่องอบแห้งแบบกระบะ)

กระบวนการอบแห้งของเครื่องแห้งแบบกระบะอาศัยหลักการเดินทางของลมร้อนผ่านวัสดุซึ่งอยู่กับที่โดยการไหลของลมร้อนจะมีทั้งแบบไหลตั้งฉากกับวางของวัสดุ ไหลขนานไปกับการ

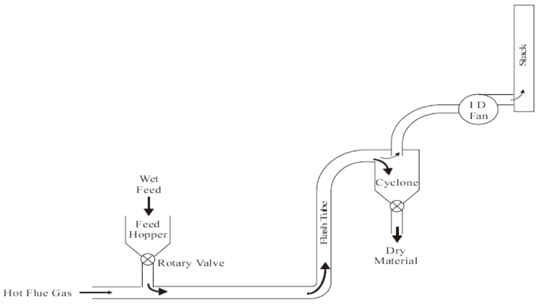
วางตัวของวัสดุและไหลสวนทางกับการวางตัวของวัสดุ ซึ่งประสิทธิภาพในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุที่ใส่ลงไปในกระบะ ถ้าใส่วัสดุมากจนเกินไปลมร้อนก็ไม่สามารถที่ลดความชื้นวัสดุได้แห้งเท่ากันโดยต้องอาศัยการพลิกกับของวัสดุเครื่องถึงจำมีประสิทธิภาพ ซึ่งลมร้อนจะไหลออกสู่บรรยากาศหรือสามารถนำกลับมาใช้อีกได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Batch dryer

6) เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Flash dryers)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีหลักการทำงาน คือ วัสดุอบจะถูกผสมกับลมร้อนที่มีความเร็วสูง การสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดกันของวัสดุอบกับลมร้อนจะทำให้เกิดการลดความชื้นอย่างรวดเร็ว วัสดุอบและลมร้อนจะถูกแยกออกโดยใช้ไซโคลน ดังแสดงไว้รูปที่ 2.7 ในกรณีต้องการปล่อยลมร้อนออกสู่บรรยากาศอาจจะต้องทำการดักฝุ่นละเอียดออกอีกครั้งโดยใช้ water scrubber ข้อดีของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมคือ ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบโรตารี อย่างไรก็ตามอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าจะสูง เพราะใช้ปริมาณลมร้อนที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัด คือ วัสดุอบจะต้องมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา หรือความหนาแน่นต่ำ และสามารถลอยตัวในอากาศได้ เครื่องอบประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล คือ ทะลายปาล์มสับ และ ชานอ้อย



รูปที่ 2.7 เครื่องแห้งแบบพาหะลม (Flash dryer)

2.5 การขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลม (ทนงค์ ฉายาวัฒนะ, 2537)

ระบบการขนถ่ายวัสดุโดยพาหะลมเหมาะกับวัสดุที่ลักษณะเป็นผงหรือเป็นเม็ด การขนถ่ายชนิดนี้มีประโยชน์ เนื่องจากระหว่างการขนถ่ายจะไม่มีการเปรอะเปื้อนและช่วยทำให้วัสดุแห้งด้วย

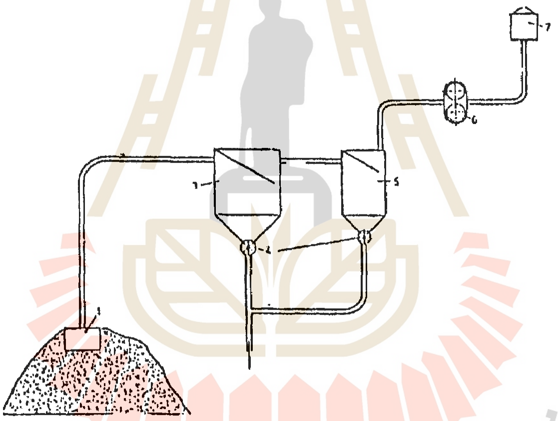
หลักการที่สำคัญของการขนถ่ายวัสดุโดยพาหะลม คือ ต้องใช้ความเร็วของอากาศมากพอที่จะทำให้วัสดุไหลไปกับอากาศได้ ดังนั้นความเร็วของอากาศจะต้องมีค่ามากกว่าความเร็วสุดท้ายก่อนตกของวัสดุ (terminal velocity) แต่ความเร็วของวัสดุจะต่ำกว่าความเร็วของอากาศเล็กน้อย โดยทั่วไปจะให้ความเร็วของวัสดุที่ถูกพาไปกับอากาศมากกว่า 80% ของความเร็วอากาศ

2.5.1 ประเภทของการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลม

แบ่งตามลักษณะของความดันลมได้ 2 ประเภท

1) ระบบลมดูด

วัสดุจะถูกดูดผ่านตัวดูดไหลไปตามท่อผ่านเข้าถังแยกวัสดุจากลม ท่อดูดมักเป็นท่ออ่อนโยกย้ายตำแหน่งได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

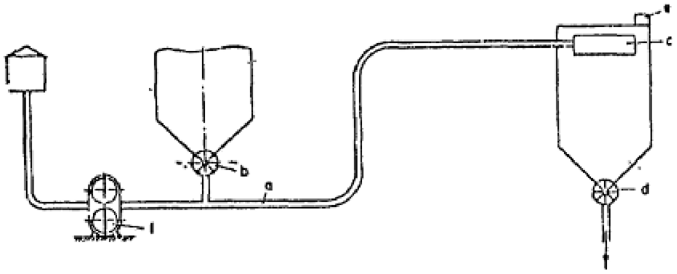


รูปที่ 2.8 แสดงการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลมระบบดูด

2) ระบบลมอัด

ระบบขนถ่ายวัสดุนี้มีข้อได้เปรียบที่สามารถทำความดันสูงได้ (ประมาณ 6 บาร์เกจ) ทำให้ขนถ่ายวัสดุได้เป็นระยะทางไกล และขนถ่ายวัสดุที่มีน้ำหนักได้ รูปที่ 2.9

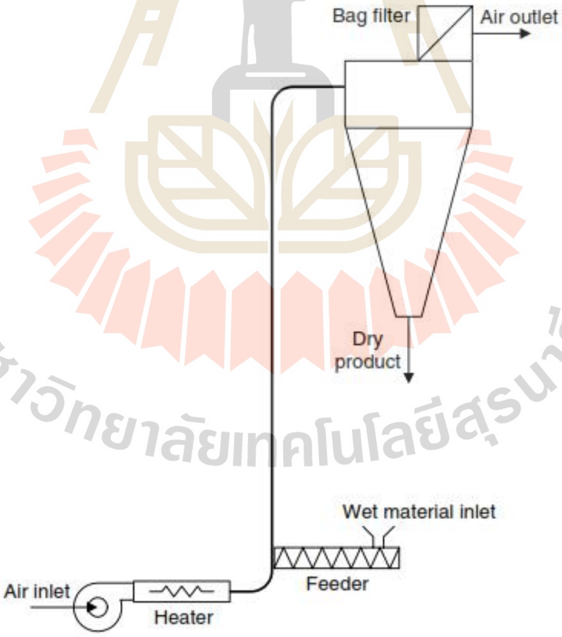
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.9 แสดงการขนถ่ายวัสดุโดยใช้พาหะลมระบบลมอัด

2.6 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveyor dryer)

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเป็นเครื่องอบแห้งแบบหนึ่ง ที่เหมาะสมกับการอบแห้งวัสดุที่มีลักษณะเป็นผงหรือเมล็ดเล็ก ๆ ระบบนี้จะรวมคุณสมบัติทางกลและการถ่ายเทความร้อนเข้าด้วยกัน วัสดุจะถูกอบในขณะที่พาไปกับลมร้อนจนกระทั่งถึงตัวเก็บผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้แก่ไซโคลน ถุงกรอง เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ในช่วง 2-5 s การกระจายตัวของวัสดุขณะสัมผัสกับอากาศมีความสำคัญมาก



รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมอย่างง่าย

2.6.1 ข้อจำกัดของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

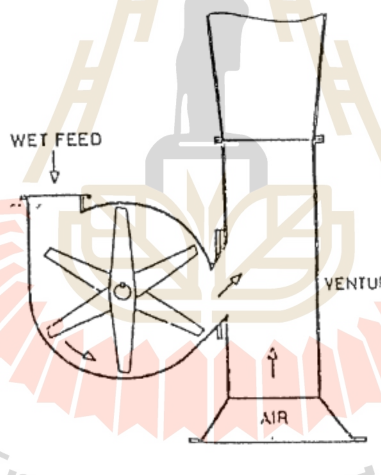
1) วัสดุอบแห้งจะต้องถูกพาไปกับอากาศร้อนได้ง่าย

2) การกระจายของวัสดุกระทำได้ง่าย

3) ถ้าวัสดุมีการกระจายขนาดมาก พบว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่จะแห้งเพียงบางส่วนเท่านั้นซึ่งข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการแก้ที่ตัวป้อนวัสดุ หรือการแก้ไขที่การออกแบบ

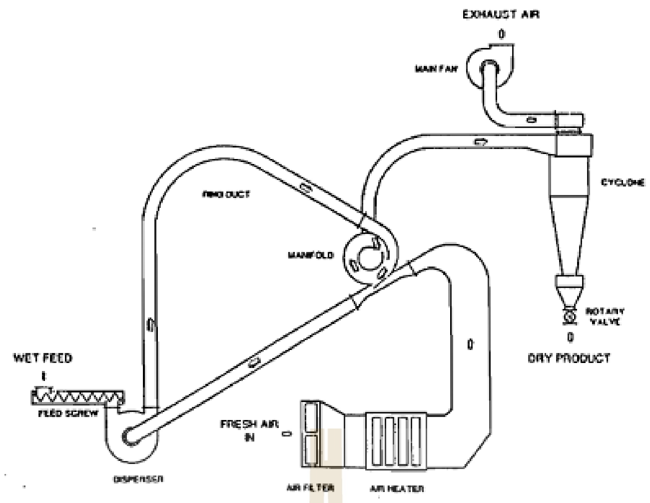
ก) การแก้ที่ตัวป้อนวัสดุ ใช้ตัวกระจายวัสดุแบบตี (disintegrator) ติดไว้ด้านข้างของเครื่องอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ตัวกระจายจะทำหน้าที่วัสดุจับตัวเป็นก้อนแตกออกและมีขนาดเล็กลง หรือการใช้การผสมกับ (back mixing) ใช้กับวัสดุที่เปียกมาก ๆ โดยนำวัสดุที่อบแห้งแล้วบางส่วนกลับมาผสมกับวัสดุก่อนอบแห้ง

ข) การแก้ไขที่การออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยการขยายช่วงเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (resident time) ให้มากขึ้นโดยใช้ thermo venture drying concept ทำให้ท่อในแนวตั้งมีการขยายออกเพื่อลดความเร็วอากาศ วัสดุที่หยาบจะกระจายอยู่ในเครื่องอบแห้งขณะที่วัสดุเล็กจะถูกพาไปกับอากาศ เหมาะกับวัสดุทรงกลมและการกระจายของขนาดไม่มากนัก การใช้ ring dryer เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการขยายเวลาการอบแห้ง โดยใช้เครื่องแยกแบบหอยโข่ง (centrifugal classifier) เพื่อแยกวัสดุที่ยังไม่แห้งกลับเข้าไปในขบวนการใหม่ (recycle) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 ตัวกระจายวัสดุก่อนเข้าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.12 เครื่องอบแห้งแบบวงแหวน

2.6.2 ข้อดีข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ข้อดี

1) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นมาก เหมาะกับวัสดุที่มีความไวต่อความร้อน

2) การใช้อุณหภูมิทางเข้าเครื่องอบแห้งสูงแม้อัตราการไหลของลมจะต่ำก็สามารถทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนได้สูงได้

3) สามารถขนถ่ายวัสดุได้โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นช่วยพาวัสดุในระหว่างอบแห้ง

4) การอบแห้งจะเกิดอย่างสม่ำเสมอ

5) โครงสร้างส่วนใหญ่ใช้พื้นที่น้อย

6) ต้นทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่น

ข้อเสีย

1) ประสิทธิภาพในการเก็บวัสดุของไซโคลนมีขีดจำกัด

2) อาจมีวัสดุบางส่วนติดไปกับอากาศร้อนทางออก จึงไม่ควรอบวัสดุที่มีพิษ

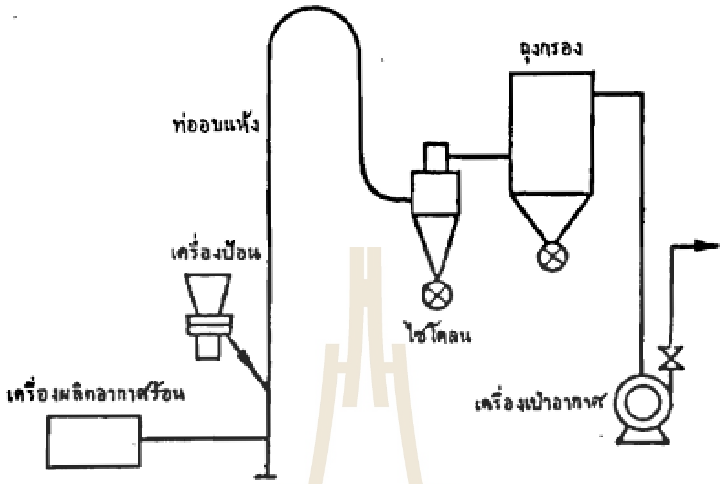
3) ถ้าวัสดุเป็นก้อนใหญ่จะทำให้การกระจายวัสดุทำได้ยาก

4) สิ้นเปลืองพลังงานความร้อนมาก

2.7 ประเภทของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

2.7.1 ชนิดที่ป้อนวัสดุเปียกเข้าเครื่องอบแห้งโดยตรง

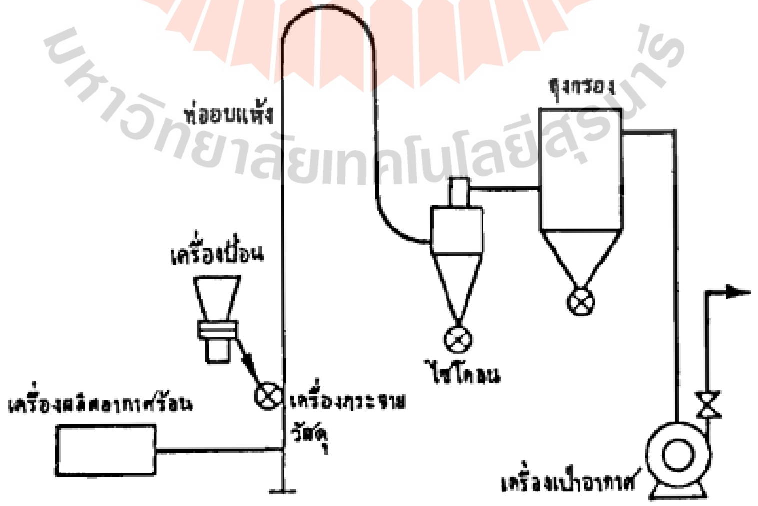
เครื่องอบแห้งชนิดนี้ ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกระจายวัสดุ (disperser หรือ disintegrater) วัสดุจะถูกผ่านไปยัง chut เข้าไปในท่อส่วนเร่งความเร็วที่มีอากาศร้อนไหลผ่านด้วยความเร็ว 20-40 m/s เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นผง ง่ายต่อการกระจาย (รูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดป้อนเข้าโดยตรง

2.7.2 ชนิดที่มีตัวกระจายวัสดุ (Disperser – attached type)

เครื่องอบชนิดนี้จะมีการป้อนวัสดุผ่านตัวกระจายวัสดุเข้าสู่ท่ออบแห้งที่มีกระแสอากาศร้อนไหลผ่าน แสดงดังรูปที่ 2.14

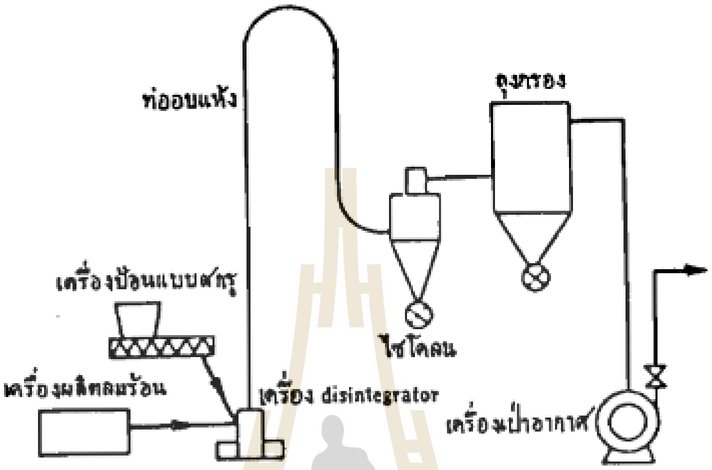


รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดที่มีเครื่องกระจายวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.7.3 ชนิดที่มีเครื่อง disintegrater

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดนี้จะมีเครื่อง disintegrater หรือ cage mill ช่วยทำให้วัสดุที่ค่อนข้างนิ่มแตกกระจายวัสดุเข้าสู่อากาศร้อนได้ดี จึงทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรสูงมาก (3,000-10,000 kcal/m^3-hr) ลดความชื้นได้ถึง 50-80% ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมชนิดที่มี disintegrater

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งชีวมวลแบบพาหะลม สามารถสรุปได้ดังนี้

ทวิช จิตรสมบูรณ์, โศรฎา แข็งการ และเกรียงไกร เพ็ชรน้ำเขียว (2549) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกแบบหล่นอิสระ โดยการเป่าลมร้อนเข้าทางด้านล่างของท่ออบแห้งที่ตั้งอยู่ในแนวดิ่ง และทางออกทางด้านบนสวนทางกับข้าวเปลือกที่ตกลงมาอย่างอิสระจากถังพักโดยแรงโน้มถ่วง ผลการทดลองพบว่าสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาอบแห้งเพียง 30 s ลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 kg จาก 23.75% d.b. เหลือ 15.5% d.b. โดยอุณหภูมิอบแห้ง 100°C ใช้พลังงานในการอบแห้งเท่ากับ 1.4 MJ/kg$_{water}$ ซึ่งนับว่ารวดเร็วและประหยัดพลังงานมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งวิธีอื่น

ธนะรัชต์ วิจินธนสาร และคณะ (2554) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสชนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมแบบต่อเนื่อง ซึ่งนำข้อดีของเครื่องอบแห้งทั้งสองชนิดมารวมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความชื้นข้าวเปลือกให้ได้มากขึ้น และในการศึกษาจะจะอบแห้งข้าวเปลือกจะอยู่ในช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่เท่านั้นโดยข้าวเปลือกมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28-30% d.b. โดยกำหนดตัวแปรที่จะศึกษาครั้งนี้คือ อุณหภูมิลมร้อน 70 90 และ 110°C อัตราการป้อนวัสดุ 22 47 และ 62 kg/hr จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 112°C

และอัตราการป้อนวัสดุ 62 kg/hr นั้นสามารลดความชื้นได้ถึง 10.78% d.b. โดยคุณภาพของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และใช้เวลาอยู่ในระบบประมาณ 4 s

Kaensup et. al. (2006)ได้ศึกษาเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมลดความชื้นข้าวเปลือก พบว่าความชื้นสุดท้ายของการทดลองที่ความเร็วลมร้อน 20- 30 m/s จะมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิของลมร้อน 35–50°C หลังจากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนให้สูงขึ้น ผลของความเร็วของลมร้อนที่ทำให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายเปลี่ยนแปลงคือที่ความเร็วของอากาศร้อนมีส่วนทำให้ปริมาณความชื้นสุดท้ายมีค่าต่ำกว่าการทดลองที่ความเร็วลมร้อนสูง เนื่องจากที่ ความเร็วลมร้อนต่ำการเคลื่อนตัว ของข้าวเปลือกที่อยู่ในท่ออากาศร้อนเคลื่อนตัวไปได้ช้าทำให้ระยะเวลาของข้าวเปลือกที่อยู่ในท่อของอากาศร้อนยาวนานกว่าการทดลองที่ใช้ความเร็วของลมร้อนสูง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างข้าวเปลือกกับลมร้อนและการระเหยตัวของน้ำจากข้าวเปลือกระเหยตัวได้ดีกว่า

ฉัตรชัย นิมมล (2555) ได้กล่าวว่า ในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเป็นหนึ่งในเครื่องอบแห้งที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงที่เหมาะสำหรับใช้ในการลดความชื้นที่ผิวของวัสดุอนุภาคซึ่งรวมถึงข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวมาใหม่ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งดังกล่าวยังสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก จึงได้ทำวิจัยหออบแห้งชนิดท่อเกลียวได้ถูกติดตั้งแทนหออบแห้งแบบดั้งเดิม (ท่อเรียบ) เพื่อเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของอากาศซึ่งถูกใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้งจากนั้นผลกระทบของปัจจัยต่างๆเช่นอุณหภูมิของอากาศขาเข้า (อุณหภูมิอบแห้ง)ความเร็วของอากาศและอัตราการป้อนข้าวเปลือกที่มีต่อความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือกและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้ง ผลที่ได้ยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับกรณีใช้หออบแห้งชนิดท่อเรียบ จากการศึกษาพบว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกลงได้ 4.4-10.3% d.b. ภายในระยะเวลา น้อยกว่า 5 s โดยความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ได้มีค่า 17.7% d.b. นอกจากนี้ยังพบว่า SEC ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่พัฒนาขึ้นมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ SEC ในกรณีใช้หออบแห้งชนิดท่อเรียบในทุกเงื่อนไขการทดลอง งานวิจัยนี้SEC ต่ำที่สุดมีค่า 1.78 MJ/kg_{water} ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้หออบแห้งชนิดท่อเกลียวที่อุณหภูมิ 100°C ความเร็วของอากาศ 30 m/s และอัตราการป้อนข้าวเปลือก 150 $kg_{drysolid}$/hr

ศรัณย์ วัฒนไชย (2545) ได้ทำการจำลองและทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบพาหะลมและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วย ความชื้นของกากอ้อย ความชื้นของลมร้อน อุณหภูมิของลมร้อน อุณหภูมิของกากอ้อย และความเร็วของกากอ้อย เครื่องทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 mm สูง 6 m มีสภาวะการทดลองคือความชื้นของกากอ้อย 50.9-52.8% w.b. ความชื้นของลมร้อน 0.018 - 0.019 kg_{water}/kg_{dryair} อุณหภูมิของลมร้อน 170-200°C อัตราการไหลลมร้อน 0.02-0.05 kg_{dryair}/s และอัตราการป้อนกากอ้อยเท่ากับ 0.005 $kg_{dry\ solid}$/s จากผลการศึกษาพบว่าขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเทียบเท่าของกากน้อยที่เหมาะสมใช้ในการจำลองแบบ เครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบพาหะลมมีค่าเท่ากับ 1.57 mm

จำลักษณ์ ศรีนาคเรือง (2543)ได้ศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งคือ ความเร็วลม 2.32-3.85 m/s อุณหภูมิอากาศร้อน 80-100^{o}C ความสูงของเบด 3.5-9.5 cm สำหรับการทดลองแบบกะ ส่วนการทดลองอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดเซชันแบบต่อเนื่องมีอัตราการไหลของวัตถุดิบ 0.125 kg/min ความสูงของเบด 10 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือกไม้ 0.5 cm มีตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเร็วลม 2.32-2.85 m/s อุณหภูมิอากาศร้อน 90-110^{o}C จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองเพื่อใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง จากการทดลองที่ความชื้นเริ่มต้น 55-60% w.b. เหลือความชื้นประมาณ 10% w.b. ซึ่งภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบกะคือ ความสูงเบด 9.5 cm ความเร็วลม 2.32 m/s และอุณหภูมิ 80^{o}C ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแบบต่อเนื่องคือ อุณหภูมิ 90^{0}C ความเร็วลม 2.85 m/s เนื่องจากความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งต่ำกว่า 10% w.b. ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ ประสิทธิภาพสูง และอัตราการผลิตสูง จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งที่ได้ นำมาใช้กับทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง พบว่าสามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ดีกับการทดลองแบบต่อเนื่อง เนื่องจากให้ค่าใกล้เคียงกับทุกช่วงอุณหภูมิและทุกช่วงความเร็วลม ส่วนการทดลองแบบกะนั้นสามารถทำนายได้ดีพอสมควร กล่าวคือในช่วงเวลาการอบแห้งที่ความสูงของเบดต่ำ ๆ สามารถทำนายความชื้นได้ใกล้เคียงกับการทดลอง แต่ไม่สามารถใช้ได้กับที่ความสูงเบด 9.5 cm เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างตัวกลางไม่คงที่ เกิดฟองอากาศมาก

วีรชัย อาจหาญ และคณะ (2555) ได้ทำการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการสับด้วยเครื่องอบแห้งระบบพาหะลมแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ลมร้อนที่ใช้ความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้แหล่งความร้อนจากไอน้ำ ซึ่งมีอุณหภูมิ 130^{o}C แล้วใช้ blower ที่มีต้นกำลังจากมอเตอร์ขนาด 3 Hp ในการเป่าลมร้อนด้วยความเร็วลม 8.2 m/s จำนวน 3 ตัว ในการส่งเปลือกไม้สับที่มีความชื้นเริ่มต้น 55% w.b. ผ่านห้องอบจำนวน 2 ห้อง อย่างต่อเนื่อง พบว่าสามารถอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสับได้ประมาณ 500 kg/hr และเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบนี้มีความชื้นเฉลี่ย 22% w.b.

จากงานวิจัยทั้งหมดที่กล่าวมาขั้นต้น สรุปได้ว่าเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม เหมาะสมกับวัสดุที่มีลักษณะเป็นอนุภาคหรือมีขนาดเล็ก และวัสดุชีวมวลที่เป็นเส้นใย โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมนั้นมีอยู่หลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิแก๊สทางเข้า (อุณหภูมิลมร้อน) ความเร็วลมร้อน และอัตราการป้อนวัสดุที่ทางเข้าเครื่องอบแห้ง ซึ่งสามารถหาสภาวะการทำงานของที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้มีความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมเพื่อใช้อบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลที่เป็นเส้นใย รวมถึงต้นทุนในการอบแห้งเชื้อเพลิงด้วย

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

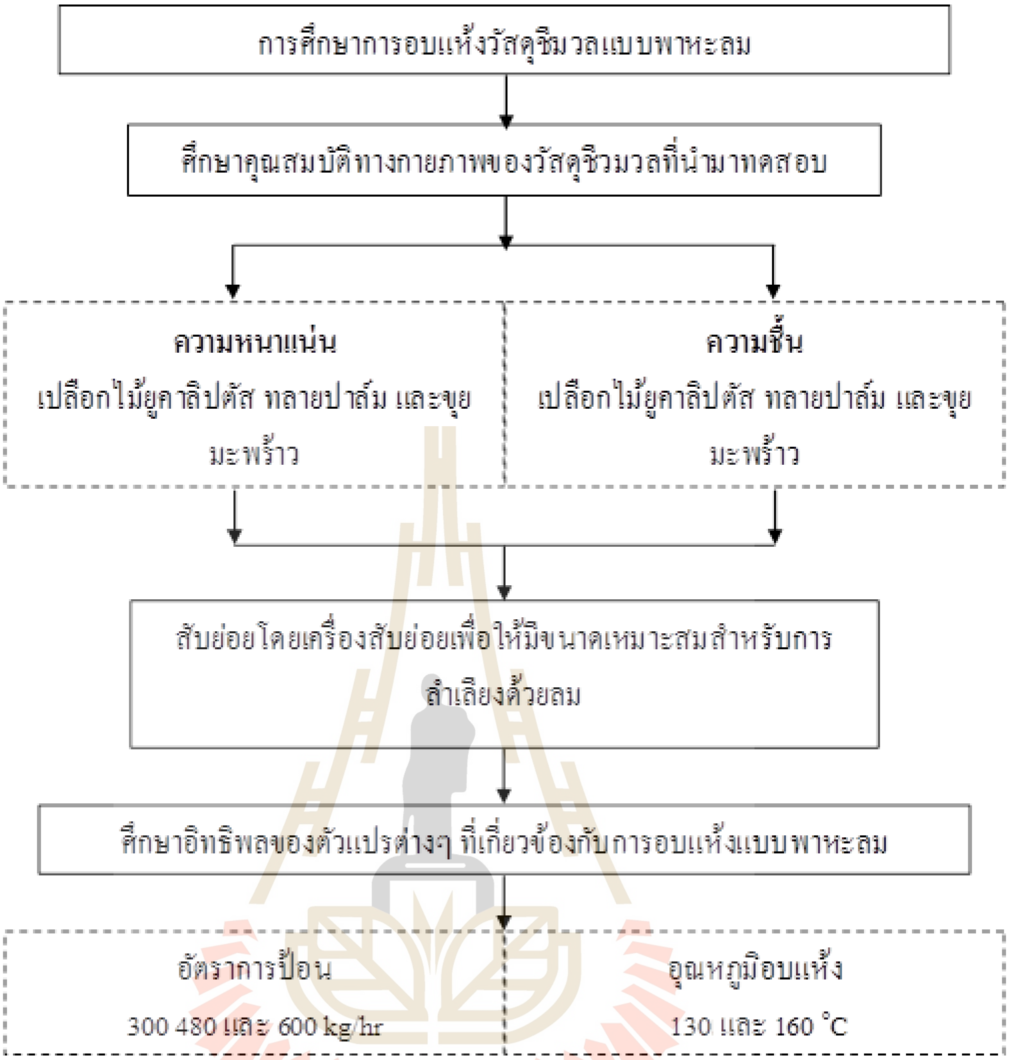
3.1 บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายถึงวัสดุชีวมวลที่นำมาใช้ในการอบแห้ง เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย ซึ่งสามารถแยกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของวัสดุชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง มีรายละเอียดอุปกรณ์และการดำเนินวิจัยดังนี้

3.2 วิธีการวิจัย

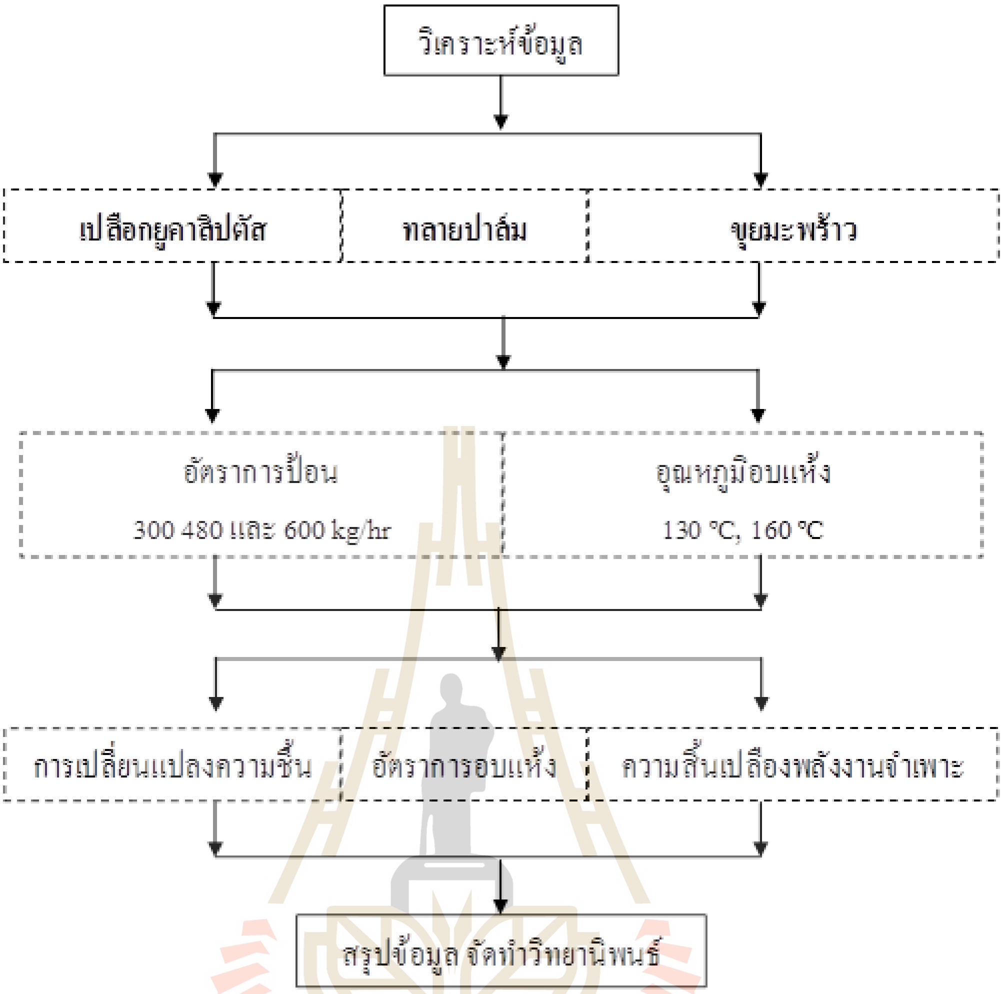
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 0.5 ton/hr การทดสอบเพื่อดูผลของอุณหภูมิและอัตราการป้อนวัตถุดิบที่มีต่อการอบแห้ง โดยทำการกำหนดสภาวะการทดสอบดังนี้ อัตราการไหลอากาศ 0.43 m^3/s อุณหภูมิในการอบแห้ง 130 และ 160°C อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 300 480 และ 600 kg/hr ในระหว่างการทดลอง จะทำการเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้นที่จุดต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้ง ตรวจสอบปริมาณการใช้พลังงานความร้อน และค่าพลังงานไฟฟ้า จากนั้นทำการประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากค่าอัตราการอบแห้ง (drying rate) โดยคิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง มีหน่วยเป็น kg/hr ดังรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



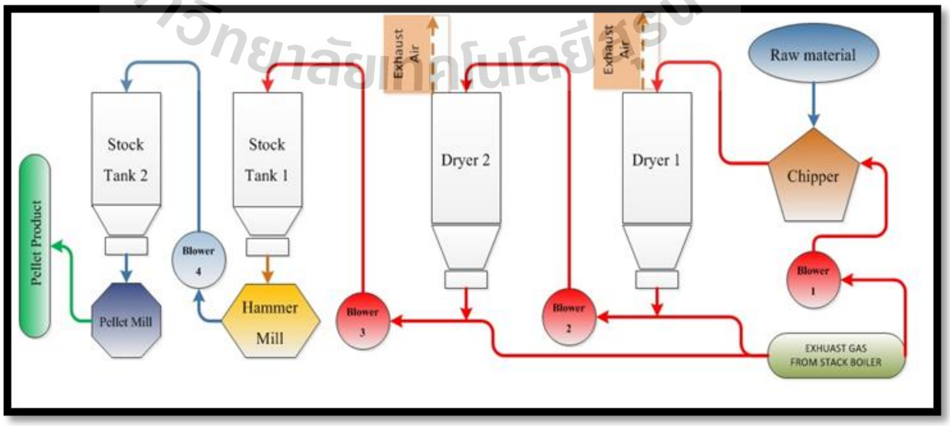
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 กระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.3.1 วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุชีวมวลที่ใช้ในการทดลองอบแห้งโดยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต้องเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและสามารถลำเลียงด้วยลมได้ ในการศึกษานี้ จะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการทดสอบ 3 ชนิด คือเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และ ขุยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งของอุตสาหกรรมต่างๆ ดั้งนี้

1) เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่เหลือจากกระบวนการผลิตไม้สับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3
2) ทะลายปาล์มที่เหลือทิ้งจากระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.4
3) ขุยมะพร้าวที่ได้จากกระบวนการแยกใยออกจากกะลา ดังแสดงในรูปที่ 3.5

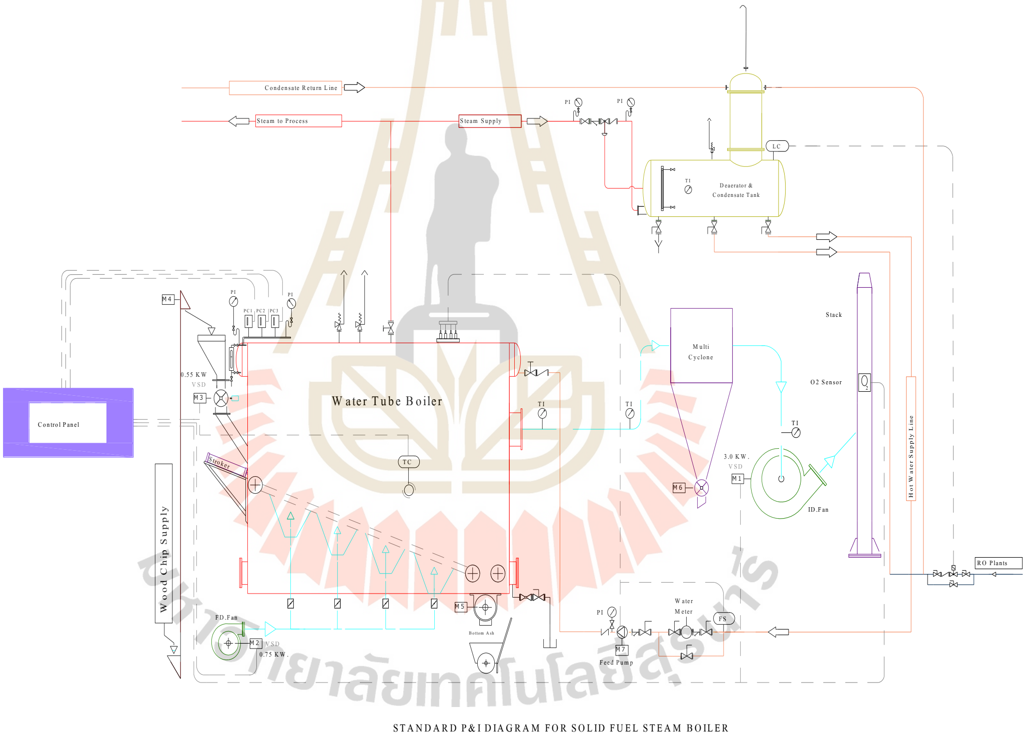
รูปที่ 3.3 เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.4 ทะลายปาล์มที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.5 ขุยมะพร้าวที่ใช้ในการทดลอง

3.3.2 เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler)

การศึกษาครั้งนี้จะใช้เครื่องกำเนิดไอน้ำแบบท่อน้ำของ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ดังแสดงใน รูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นระบบผลิตพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของชีวมวลเพื่อผลิตไอน้ำสำหรับเครื่องจักรกังหันไอน้ำ ตามการทำงานของวัฏจักรแรงคิน (Rankine cycle) ได้ถูกออกแบบเพื่อผลิตไอน้ำที่มีสภาวะการทำงานที่ ความดันสูงสุด 22 bar สามารถผลิตไอน้ำได้สูงสุด 500 kg/hr ในกระบวนการผลิตไอน้ำเพื่อน้ำไปใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานพบว่า มีแหล่งความร้อนเหลือทิ้งที่สามารถดึงกลับมาใช้งานหรือเป็นแหล่งความร้อนสำหรับกระบวนการอบแห้งได้ ดังนั้น ปล่องควันไอเสียที่ออกมาจากห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำหลังจากนำไปอุ่นน้ำก่อนเข้าระบบแล้ว มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 160-250^{o}C ซึ่งระบบการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ระบบการทำงานของเครื่องกำเนิดไอน้ำของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รูปที่ 3.7 ต้นแบบเครื่องกำเนิดไอน้ำของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดต่างๆ ที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไอน้ำและพลังงานความร้อน

รายการ	รายละเอียด
ชนิดของเครื่องกำเนิดไอน้ำ	ชนิด Water Tube Boiler
แรงดันใช้งานสูงสุด	22 Bar
กำลังการผลิตไอน้ำสูงสุด	500 kg/hr
ระบบเตาเผาและระบบป้อนเชื้อเพลิง	Grate stoker
อุณหภูมิไอเสียหลังจากต้มน้ำแล้ว	160-250 $^{\circ}$C

ในการศึกษาครั้งนี้นำความร้อนจากไอเสียของเครื่องกำเนิดไอน้ำเพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับการอบแห้งวัสดุชีวมวล โดยมีวิธีการคือใช้พัดลมดูดไอเสียแล้วส่งเข้าห้องผสมอากาศเพื่อปรับอุณหภูมิ จากนั้นส่งลมร้อนเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.8 ถังผสมไอเสียจากเครื่องกำเนิดไอน้ำ

3.3.3 สายพานลำเลียงวัสดุ

ในกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมจำเป็นต้องมีเครื่องมือช่วยเพื่อให้อัตราการป้อนวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นการทดลองครั้งนี้ใช้สายพานลำเลียงเป็นเครื่องลำเลียงเข้าเครื่องสับย่อยเพื่อให้มีขนาดสม่ำเสมอโดยใช้แรงงานคนป้อนวัตถุดิบดังแสดงในรูปที่ 3.9

รูปที่ 3.9 การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องสับย่อย

3.3.4 เครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีวมวล (biomass chipper)

โดยคุณลักษณะสำคัญของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบเครื่องสับย่อยก่อนทำการอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และแสดงในรูปที่ 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อย

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

รูปที่ 3.10 เครื่องหั่นย่อยวัสดุชีวมวล (biomass chipper)

3.3.5 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (flash dryer)

โดยคุณลักษณะของเครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบพาหะลม ซึ่งเป็นแบบ 2 ห้องอบต่อเนื่องกัน แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ส่วนคุณลักษณะจำเพาะของเครื่องอบแห้งแสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งในส่วนนี้จะทำการศึกษาความชื้นเปลือกไม้หลังการอบแห้งผ่านเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม และความสามารถในการอบแห้ง

ตารางที่ 3.3 ข้อมูล/ข้อกำหนดการออกแบบทางวิศวกรรมของเครื่องอบแห้ง

พารามิเตอร์	**ข้อมูล/ข้อกำหนด**
จำนวนห้องอบ	2 ห้อง
ขนาดห้องอบ 1	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m สูง 4.6 m
ขนาดห้องอบ 2	เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m สูง 4.6 m
ระบบอากาศหมุนเวียน	ต้นกำลัง 3 Hpความเร็วลม 12.5m/s
อัตราไหลของอากาศ	0.43 m^3/s
แหล่งความร้อน	ไอเสียจากเครื่องผลิตไอน้ำ

รูปที่ 3.11 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

3.3.6 เครื่องบดละเอียด (hammer mill)

โดยคุณลักษณะสำคัญของเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบเครื่องบดละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และแสดงในรูปที่ 3.8 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.4 ข้อมูล/ข้อกำหนดของเครื่องหั่นย่อยแบบละเอียด

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

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.12 เครื่องบดละเอียด

3.4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

สมบัติทางกายภาพของวัสดุชีวมวลเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะนำมาเป็นตัวชี้วัดหรือเป็นตัวตัดสินใจว่าจะเลือกวิธีการอบแห้งแบบใดจึงจะเหมาะสมกับการอบแห้งวัสดุชีวมวลจึงจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการอบแห้งดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชีวมวลโดยทำการศึกษาลักษณะทั่วไป ความชื้น และค่าความหนาแน่นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ขุยมะพร้าว และทะลายปาล์ม

การหาค่าความชื้นอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3173 ความชื้นวัสดุชีวมวลสามารถทำได้โดยใช้วิธีการหาความชื้นทางตรงด้วยการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 hr (อบจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างคงที่) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุชีวมวลด้วยตาชั่งละเอียด ±0.01 จากนั้นคำนวณหาความชื้นโดยใช้สมการที่ (3.1)

$$MC = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100 \qquad (3.1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นวัสดุชีวมวลมาตรฐานเปียก (%)

m_d คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

m_w คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังก่อนอบ (g)

การหาค่าความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการอบแห้งวัสดุชีวมวล ค่าความหนาแน่นปรากฏเป็นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและปริมาตรของวัสดุชีวมวลทำได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของวัสดุชีวมวลดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยใช้ภาชนะทรงกระบอกในการหาปริมาตรสมการที่ (3.2)

$$\rho_b = \frac{m}{V} \qquad (3.2)$$

เมื่อ ρ_b คือ ความหนาแน่นปรากฏ (kg/m^3)

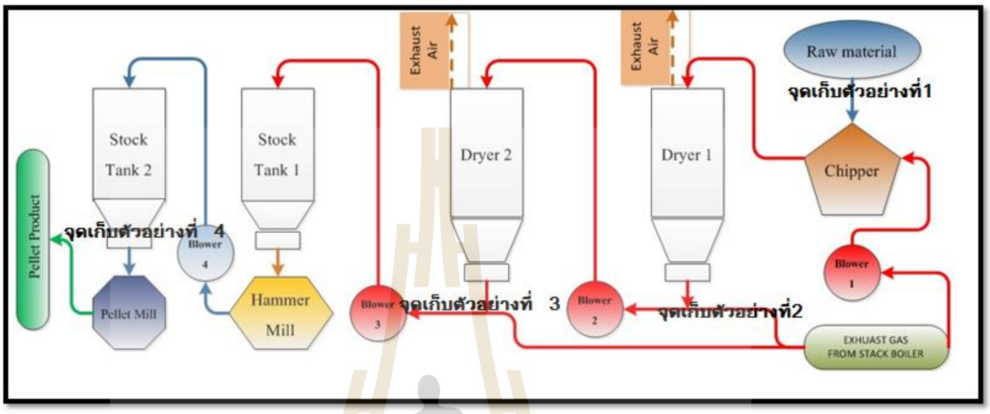
m คือ มวลของชีวมวลในภาชนะ (kg)

V คือ ปริมาตรของภาชนะ (m^3)

รูปที่ 3.13 การทดสอบหาความหนาแน่นปรากฏ

3.5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงต่าง ๆ ของการอบแห้งแบบพาหะลม

การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่างๆเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญหนึ่งที่จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการระเหยน้ำดังนั้นจึงได้กำหนดจุดเก็บตัวอย่างเพื่อที่จะนำไปหาค่าความชื้นซึ่งในแต่ละจุดจะมีช่องสำหรับเก็บตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.14 แสดงตำแหน่งการเก็บตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลในเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

รูปที่ 3.15 ลักษณะของจุดเก็บตัวอย่าง

3.6 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

เก็บข้อมูลการใช้พลังงานในการอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานไฟฟ้าจากมอเตอร์ขับพัดลม เครื่องสับย่อย เครื่องบดละเอียด และพลังงานความร้อนที่ได้จากปล่องไอเสีย จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณหาพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง ดังสมการที่ 3.3

SEC = พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง / ปริมาณน้ำระเหย (3.3)

= (พลังงานจากระบบไฟฟ้า + พลังงานความร้อนปล่องไอเสีย) / ปริมาณน้ำระเหย

ตารางที่ 3.5 ลักษณะการทดลอง พารามิเตอร์ ความถี่ และดัชนีชี้วัด

ลักษณะการทดลอง	พารามิเตอร์	ความถี่	ตัวชี้วัด
เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ 130 และ 160 $^{\circ}$C	1 อุณหภูมิ 2 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 3 ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ 4 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 5 พลังงานความร้อนของไอเสีย 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้น	ทุกๆ 5 min เป็นเวลารวม 3 hr ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย	1 DR (kg/hr) 2 SEC (MJ/$kg_{น้ำ}$) 3 η_t (%) 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้น
เปรียบเทียบอัตราการป้อนที่ 300 480 และ 600 kg/hr	1 อุณหภูมิ 2 อัตราการป้อนวัตถุดิบ 3 ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ 4 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 5 พลังงานความร้อนของไอเสีย 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้น	ทุกๆ 5 min เป็นเวลารวม 3 hr ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย	1 DR(kg/hr) 2 SEC (MJ/$kg_{น้ำ}$) 3 η_t (%) 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้น

3.7 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง

ทำได้โดยการหาพลังที่ใช้ในการระเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณ ดังสมการที่ (3.4)

$$\eta_t = (m_w h_{fg}/Q)x100 \qquad (3.4)$$

เมื่อ

η_t คือ ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง, %

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย, kg

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ, MJ/kg

Q คือ พลังงานความร้อนของไอเสีย+พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า MJ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

ในการศึกษานี้ใช้วัสดุชีวมวล 3 ชนิด คือ เปลือกไม้ไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ และประเมินความเป็นไปได้ในการนำมาทดสอบอบแห้งแบบพาหะลม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวัสดุชีวมวลจากทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล (physical properties)

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่าเปลือกไม้ยูคาลิปตัส มีความชื้นอยู่ระหว่าง 50-60% w.b. มีความหนาแน่น 122 kg/m^3 มีลักษณะเป็นชิ้น ๆ ยาวประมาณ 50-100 mm หนาประมาณ 5 mm ทะลายปาล์มที่นำมาทำการทดสอบอบแห้งมีความชื้นอยู่ระหว่าง 50-60% w.b. มีความหนาแน่น 145 kg/m^3 มีลักษณะเป็นชิ้น ๆ ยาว 50-100 mm ส่วนขุยมะพร้าวมีความชื้นอยู่ในช่วง 50-60% w.b. มีลักษณะเป็นผงปนกับเส้นใย มีความหนาแน่น 120 kg/m^3 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล

วัสดุชีวมวล	ลักษณะทั่วไป	ความชื้น (%MC)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ยาว 50-100 mm หนา 5 mm	50-60	122
ทะลายปาล์ม	ยาว 50-100 mm	50-60	145
ขุยมะพร้าว	เป็นผงปนเส้นใย	50-60	120

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ

ในการศึกษาในหัวข้อนี้ทำการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล 3 ชนิด คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว อุณหภูมิในการอบแห้ง 130 และ 160^{o}C ที่อัตราการป้อนที่ 300 480 และ 600 kg/hr ผลการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชื้นดังนี้

4.2.1 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากตารางจะเห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 150 kg/hr ความชื้นสุดท้ายของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสลดลงได้ถึง 18.88% w.b. ซึ่งเป็นค่าที่ดีมาก แต่โดยทั่วไปในกระบวนการอัดเม็ดความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอัดเม็ดต้องการที่ 30% w.b. ดังนั้นจึงต้องทำการป้อนวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเพื่อหาอัตราการป้อนสูงสุดของการป้อนวัตถุดิบ เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงแรกสูงมากทั้งที่อุณหภูมิที่ 130 และ 160^{o}C และความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลสามารถลดลงได้ต่ำกว่า 30% w.b. ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดส่วนที่อัตราการป้อนที่ 480 และ 600 kg/hr ไม่สามารถทำให้ความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลลดลงถึงค่าที่ต้องการได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

อุณหภูมิ (^{o}C)	อัตราการป้อน (kg/hr)	ความชื้น จุดที่ 1 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 2 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 3 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 4 %w.b.
130	150	52.44	38.37	27.39	18.88
130	300	51.01	40.95	33.29	27.27
130	480	50.72	45.70	42.24	37.32
130	600	53.12	46.06	42.38	40.44
160	150	53.42	36.54	25.42	16.62
160	300	51.31	37.65	29.78	25.15
160	480	56.96	51.52	45.49	41.86
160	600	54.55	47.69	45.06	43.46

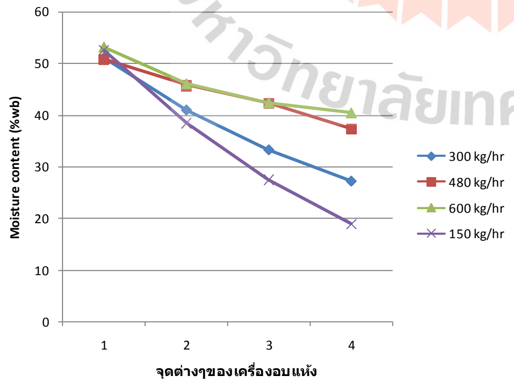
จากตารางที่ 4.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส สามารถนำมาวิเคราะห์ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่อัตราการป้อนต่างๆ โดยใช้ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบเป็นตัวเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนที่ 150 kg/hr มีผลต่างของการ

เปลี่ยนแปลงความชื้นสูงสุดคือ 35.82% w.b. ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการอบแห้งแบบพาหะลมที่กล่าวว่าอัตราการป้อนของวัตถุดิบมีผลต่อความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบ ดังนั้นจึงเลือกที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr ซึ่งเป็นอัตราการป้อนที่ทำให้ความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงที่ต้องการ

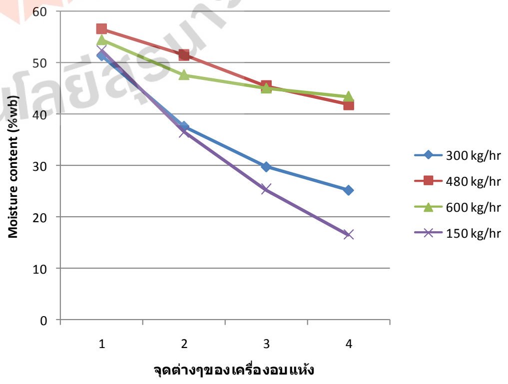
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้น

อุณหภูมิ (^{o}C)	อัตราการป้อน (kg/hr)	ความชื้น จุดที่ 1 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 2 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 3 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 4 %w.b.
130	150	0	14.07	25.05	33.56
130	300	0	10.06	17.72	23.74
130	480	0	5.02	8.48	13.4
130	600	0	7.06	10.74	12.68
160	150	0	15.90	27.02	35.82
160	300	0	13.66	21.53	26.06
160	480	0	5.04	11.07	14.7
160	600	0	6.86	9.49	11.09

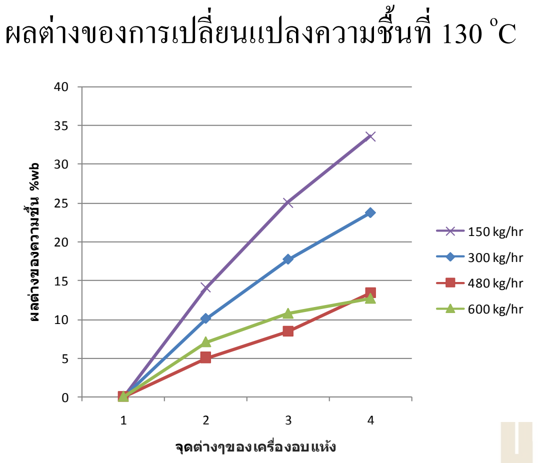
พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 ^{o}C

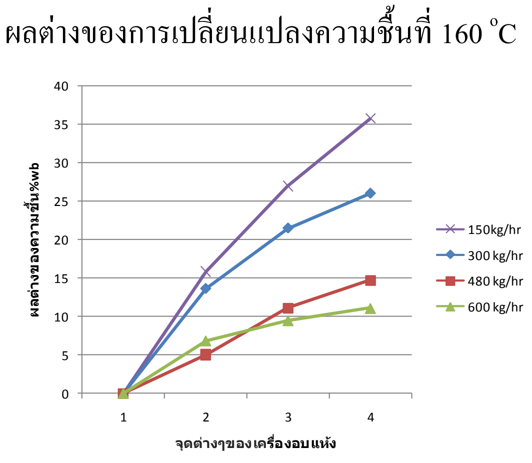


พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 160 ^{o}C



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับช่วงของจุดต่างๆของการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130 และ 160^{o}C





รูปที่ 4.2 ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 และ 160°C

4.2.2 ทะลายปาล์ม

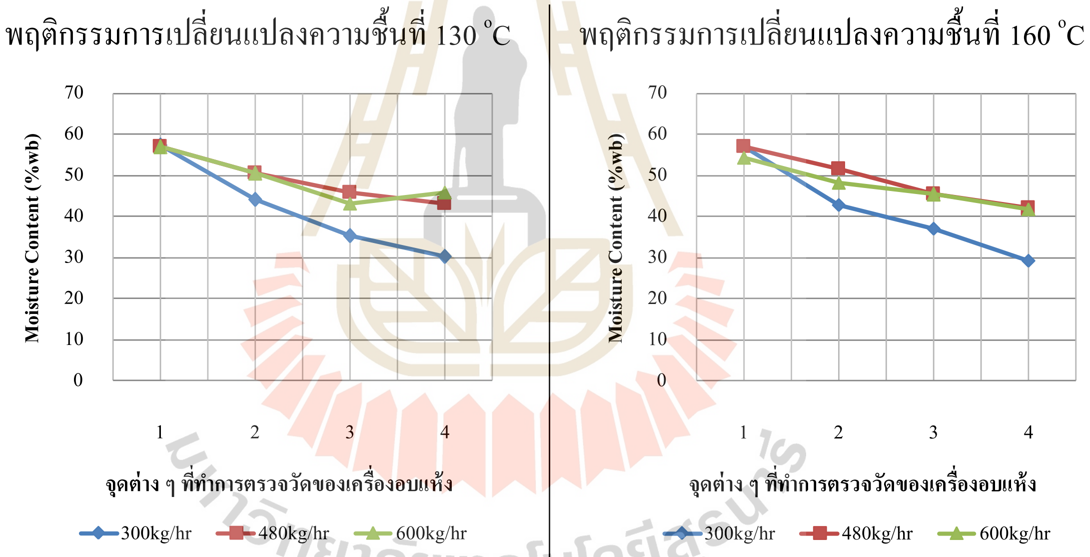
จากผลการทดลองที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 150 kg/hr ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นที่ต้องการ ดังนั้นจึงพิจารณาที่อัตราการป้อนที่สูงสุดแล้วทำให้ความชื้นสุดท้ายของวัสดุต่ำกว่า 30% w.b. จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูงสุดคือ 27.16 ซึ่งความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลมีค่าอยู่ในช่วงความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการอัดเม็ดส่วนที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 480 และ 600 kg/hr ไม่สามารถทำให้ความชื้นสุดท้ายลดลงได้ถึงค่าความชื้นที่ต้องการ

ตารางที่ 4.4 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของทะลายปาล์ม

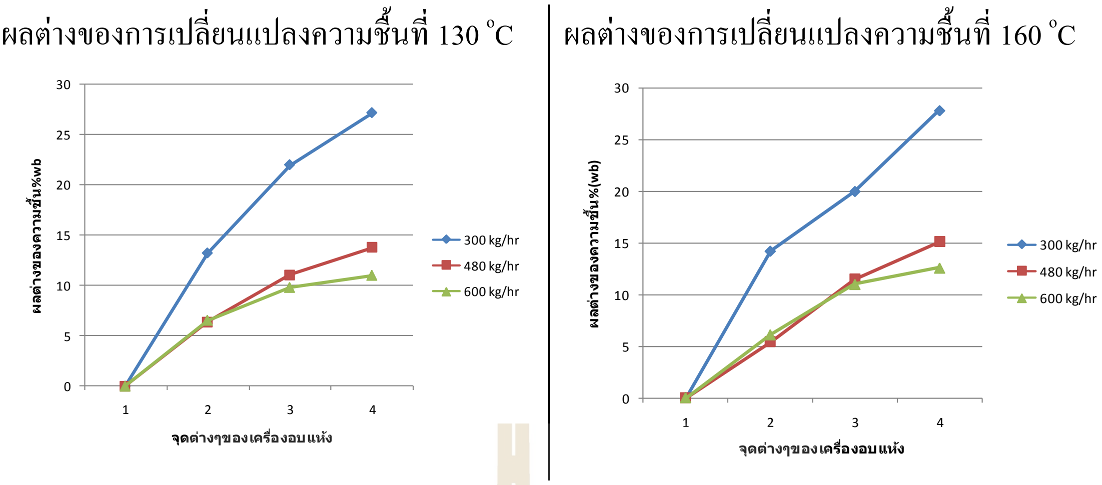
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg/hr)	ความชื้น จุดที่ 1 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 2 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 3 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 4 %w.b.
130	300	57.15	43.93	35.16	29.99
130	480	56.96	50.59	45.91	43.19
130	600	56.90	50.37	47.12	45.92
160	300	56.96	42.76	36.96	29.12
160	480	56.96	51.52	45.49	41.86
160	600	54.36	48.25	45.35	41.76

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้น

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการป้อน (kg/hr)	ความชื้น จุดที่ 1 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 2 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 3 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 4 %w.b.
130	300	0	13.22	21.99	27.16
130	480	0	6.37	11.05	13.77
130	600	0	6.53	9.78	10.98
160	300	0	14.2	20	27.84
160	480	0	5.44	11.47	15.1
160	600	0	6.11	11.01	12.6



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับช่วงของจุดต่างๆของการอบแห้งทลายปาล์มที่อุณหภูมิ 130 และ 160°C



รูปที่ 4.4 ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 และ 160°C

4.2.3 ขุยมะพร้าว

จากผลการทดลองที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 150 kg/hr ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ความชื้นสุดท้ายของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าความชื้นที่ต้องการดังนั้นจึงพิจารณาที่อัตราการป้อนที่สูงสุดแล้วทำให้ความชื้นสุดท้ายของวัสดุต่ำกว่า 30%(wb)จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr มีอัตราการลดความชื้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากค่าความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทลายปาล์มและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเนื่องมาจากสมบัติของขุยมะพร้าวมีลักษณะเป็นผงสามารถกระจายตัวได้ดีกว่าวัสดุทั้ง2 ที่กล่าวมาแล้วและความชื้นสุดท้ายของขุยมะพร้าวสามารถลดลงได้ถึง 23.03% (wb) และที่อัตราการป้อนที่ 480 kg/hr เส้นกราฟแยกออกจากที่อัตราการป้อนที่ 600 kg/hr อย่างชัดจนและจะเห็นได้ว่าเส้นค่าร้อยละความชื้นที่อัตราการป้อนที่ 480 kg/hr มีค่าความชื้นสุดท้ายใกล้เคียงกับค่าความชื้นที่ต้องการคือ 30% (wb) ซึ่งต่างจากสองวัสดุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

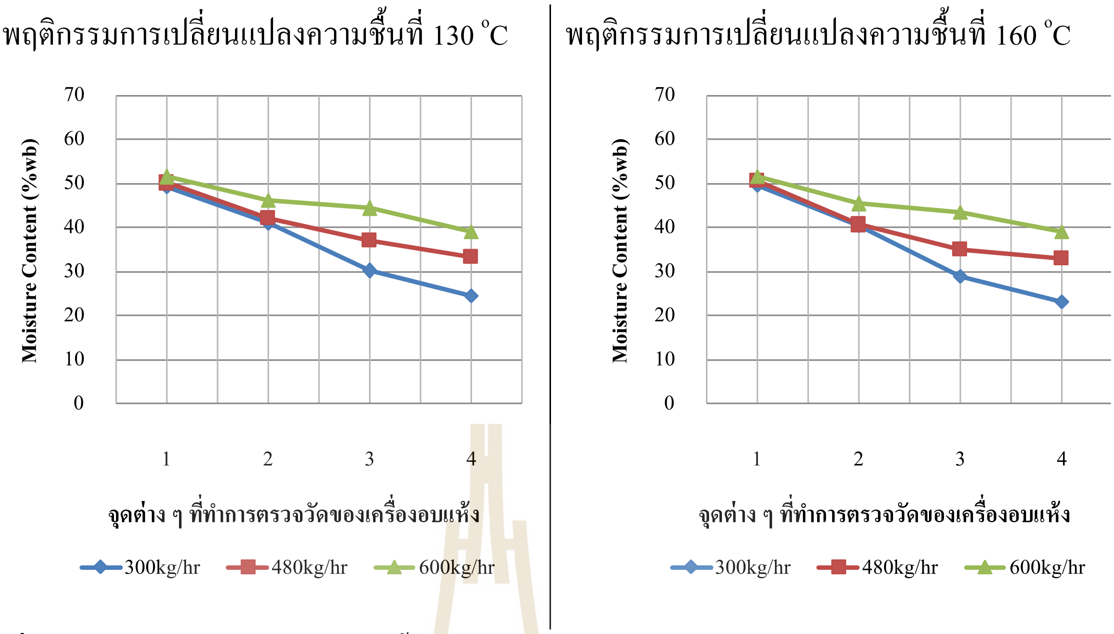
ตารางที่ 4.6 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขุยมะพร้าว

อุณหภูมิ (^{o}C)	อัตราการป้อน (kg/hr)	ความชื้น จุดที่ 1 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 2 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 3 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 4 %w.b.
130	300	49.10	40.78	29.99	24.40
130	480	50.11	42.01	36.92	33.29
130	600	51.42	46.05	44.34	39.09
160	300	49.47	40.30	28.94	23.03
160	480	50.63	40.56	35.03	32.96
160	600	51.67	45.35	43.50	39.04

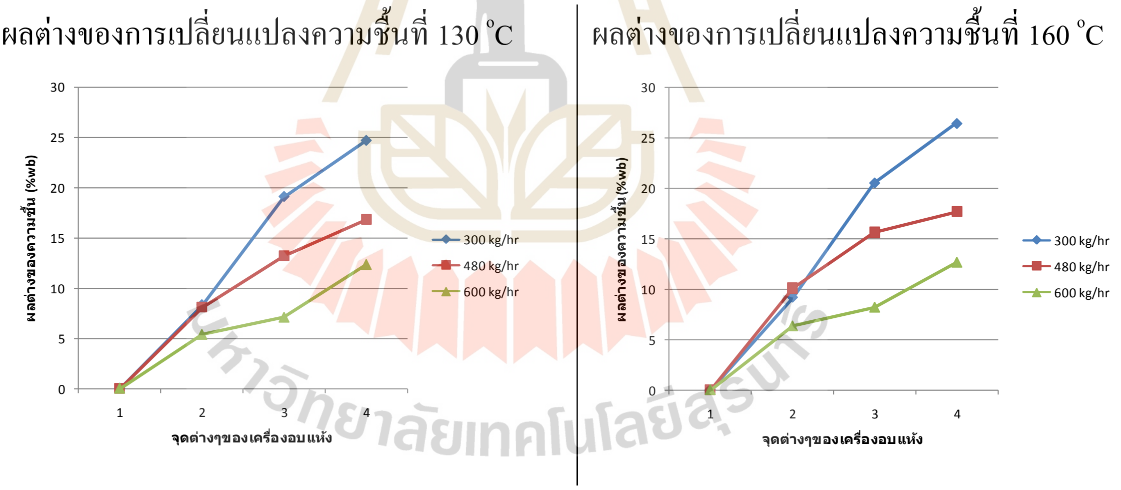
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้น

อุณหภูมิ (^{o}C)	อัตราการป้อน (kg/hr)	ความชื้น จุดที่ 1 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 2 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 3 %w.b.	ความชื้น จุดที่ 4 %w.b.
130	300	0	8.32	19.11	24.7
130	480	0	8.1	13.19	16.82
130	600	0	5.37	7.08	12.33
160	300	0	9.17	20.53	26.44
160	480	0	10.07	15.6	17.67
160	600	0	6.32	8.17	12.63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับช่วงของจุดต่างๆของการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 130 และ 160°C



รูปที่ 4.6 ผลต่างของการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ 130 และ 160°C

การเปลี่ยนแปลงความชื้นที่จุดต่างๆของวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิดที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งอุณหภูมิที่ 130 และ 160°C และสามารถทำให้ความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลลดลงต่ำกว่า 30% w.b. ส่วนที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 480 และ 600 kg/hr เปลือกไม้ยูคาลิปตัสและทะลายปาล์มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ขุยมะพร้าวที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 480 kg/hr มีอัตราการลดความชื้นได้ดีกว่า เนื่องจากขุยมะพร้าวมีลักษณะเป็นผงสามารถกระจายตัวได้มากกว่า ต่าง

จากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและทะลายปาล์มที่มีขนาดใหญ่กว่า ทำให้ความร้อนสัมผัสกับผิววัสดุได้น้อย จึงทำให้การลดความชื้นของวัตถุดิบได้น้อยกว่าที่อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 300 kg/hr

4.3 อัตราการระเหยน้ำ

4.3.1 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 130^{o}C ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 150 300 480 และ 600 kg/hr มีค่าเท่ากับ 62.06, 97.93, 125.38 และ 127.77 kg/hr ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ 41.37, 32.64, 26.12 และ21.3% อัตราการป้อนที่ 150 มีค่าสูงสุดคือ 41.37% ระเหยน้ำได้ 62.06 kg/hr แต่การทดสอบครั้งนี้ได้เน้นที่ความชื้นสุดท้ายของวัสดุเป็นหลัก จึงเลือกที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr ซึ่งมีอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 32.64% ระเหยน้ำได้ 97.93 kg/hr

จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 160^{o}C ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 150 300 480 และ 600 kg/hr มีค่าเท่ากับ 66.20, 104.86, 128.52 และ 117.34 kg/hr เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ 44.13, 34.95, 26.77 และ 19.55% ที่อัตราการป้อนที่ 150 มีค่าสูงสุดคือ 44.13% ระเหยน้ำได้ 66.20 kg/hr แต่การทดสอบครั้งนี้ได้เน้นความชื้นสุดท้ายของวัสดุเป็นหลัก จึงเลือกอัตราการป้อนที่ 300 kg/hr ซึ่งมีอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบเท่ากับ 34.95% ระเหยน้ำได้ 104.86 kg/hr

ตารางที่ 4.8 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130^{o}C

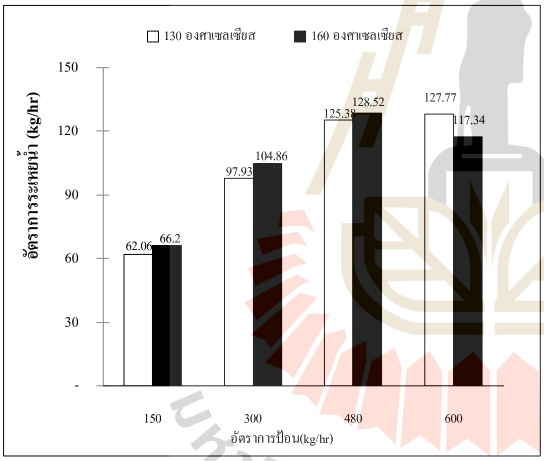
รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)			
	150	300	480	600
น้ำหนักเปลือกยูคาลิบตัสก่อนอบ (kg/hr)	150	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (% w.b.)	52.44	51.01	50.72	53.12
น้ำหนักเปลือกยูคาลิปตัสหลังอบ (kg/hr)	87.94	202.07	354.61	472.22
ความชื้นหลังอบ (% w.b.)	18.88	27.72	37.32	40.44
น้ำหนักน้ำระเหย (kg/hr)	62.06	97.93	125.38	127.77
ร้อยละของการระเหยน้ำ (%)	41.37	32.64	26.12	21.13

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

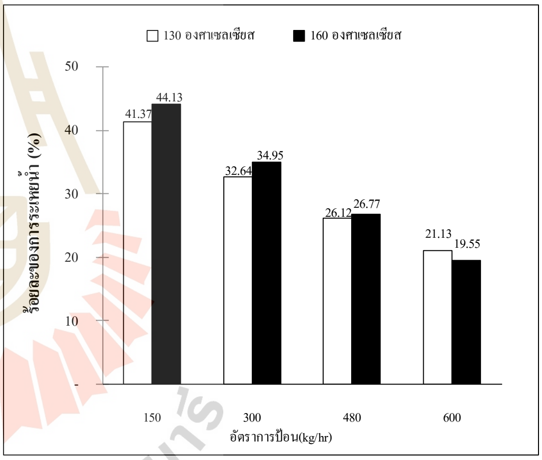
ตารางที่ 4.9 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ $160^{\circ}C$

รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)			
	150	300	480	600
น้ำหนักเปลือกยูคาลิบตัสก่อนอบ (kg/hr)	150	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (%wb)	53.42	51.31	54.60	51.66
น้ำหนักเปลือกยูคาลิบตัสหลังอบ (kg/hr)	83.79	195.14	351.47	482.65
ความชื้นหลังอบ (%wb)	16.62	25.48	41.39	43.50
น้ำหนักน้ำระเหย (kg/hr)	66.20	104.86	128.52	117.34
ร้อยละของการระเหยน้ำ (%)	44.13	34.95	26.77	19.55

อัตราการระเหยน้ำ(kg/hr)



ร้อยละของการระเหยน้ำ(%)



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำที่อัตราการป้อนต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.3.2 ทะลายปาล์ม

จากตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ $130^{\circ}C$ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 300 480 และ 600 kg/hr มีค่าเท่ากับ 116.37, 116.33 และ 128.14 kg/hr ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ 38.79, 24.23 และ 21.36% ซึ่งที่อัตราการป้อน 300 kg/hr มีค่าสูงสุดคือ 38.79% ระเหยน้ำได้ 116.37 kg/hr

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ $160^{\circ}C$ ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 300 480 และ 600 kg/hr มีค่าเท่ากับ 117.79, 124.52 และ 129.84 kg/hr เมื่อเปรียบเทียบ

อัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ 39.26, 25.94 และ 21.64% ที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr มีค่าสูงสุดคือ 39.26% ระเหยน้ำได้ 117.79 kg/hr

เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการป้อนเดียวพบว่าค่าร้อยละของการระเหยน้ำทั้งที่ 130 และ 160°C มีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ 130 และ 160°C ไม่มีความแตกต่างกันสำหรับอัตราการอบแห้งของทะลายปาล์ม

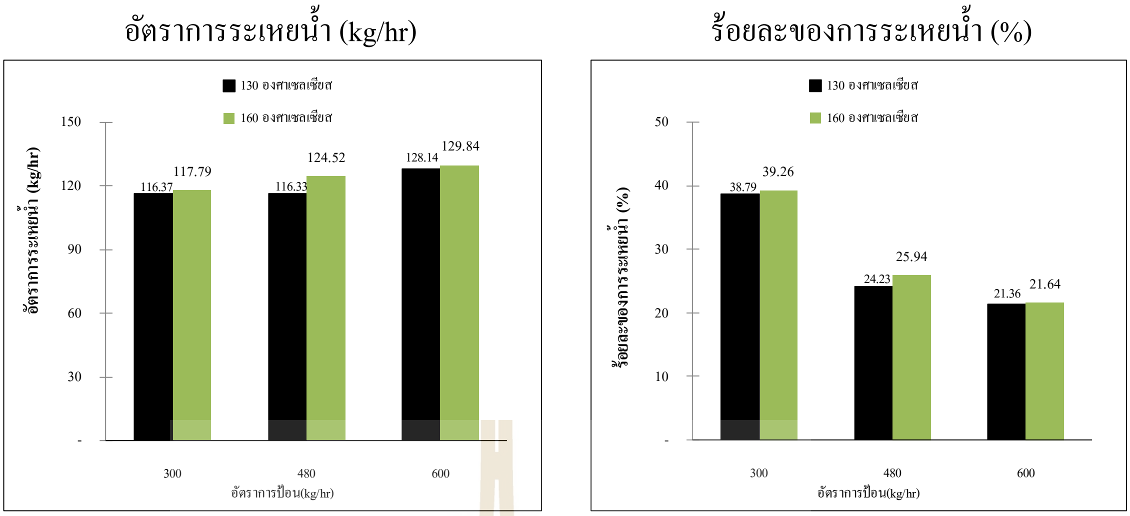
ตารางที่ 4.10 ผลการอบแห้งทลายปาล์มที่อุณหภูมิ 130°C

รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)		
	300	480	600
น้ำหนักทะลายปาล์ก่อนอบ (kg/hr)	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (%wb)	57.15	56.96	56.90
น้ำหนักทะลายปาล์มหลังอบ (kg/hr)	183.62	363.66	471.86
ความชื้นหลังอบ (%wb)	29.99	43.19	45.92
น้ำหนักน้ำระเหย (kg/hr)	116.37	116.33	128.14
ร้อยละของการการระเหยน้ำ (%)	38.79	24.23	21.36

ตารางที่ 4.11 ผลการอบแห้งทลายปาล์มที่อุณหภูมิ 160°C

รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)		
	300	480	600
น้ำหนักทะลายปาล์มก่อนอบ (kg/hr)	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (%wb)	56.95	56.96	54.36
น้ำหนักทะลายปาล์มหลังอบ (kg/hr)	182.20	355.42	470.16
ความชื้นหลังอบ (%wb)	29.12	32.58	43.45
น้ำหนักน้ำระเหย (kg/hr)	117.79	124.52	129.84
ร้อยละของการการระเหยน้ำ (%)	39.26	25.94	21.64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำที่อัตราการป้อนต่าง ๆ

4.3.3 ขุยมะพร้าว

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 300 480 และ 600 kg/hr มีค่าเท่ากับ 98.01, 121.01 และ 121.49 kg/hr ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ 32.63, 25.21 และ 20.25% ที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr มีค่าสูงสุดคือ 32.63% ระเหยน้ำได้ 98.01 kg/hr

จากตารางที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 300 480 และ 600 kg/hr มีค่าเท่ากับ 103.07, 126.51 และ 124.60 kg/hr เมื่อเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำเทียบกับน้ำหนักที่ป้อนวัตถุดิบมีค่าเท่ากับ 34.36, 26.35และ 20.77% ที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr มีค่าสูงสุดคือ 34.36% ระเหยน้ำได้ 103.07 kg/hr

เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการป้อนเดียวพบว่าค่าร้อยละของการระเหยน้ำทั้งที่ 130 และ 160°C มีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ 130 และ 160°C ไม่มีความแตกต่างกันสำหรับอัตราการอบแห้งขุยมะพร้าว

ตารางที่ 4.12 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 130°C

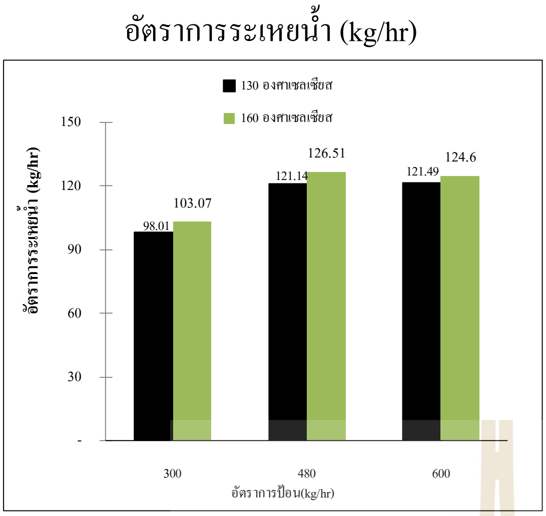
รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)		
	300	480	600
น้ำหนักขุยมะพร้าวก่อนอบ (kg/hr)	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (%wb)	49.10	50.11	51.66
น้ำหนักขุยมะพร้าวหลังอบ (kg/hr)	201.98	358.98	478.50
ความชื้นหลังอบ (%wb)	24.40	33.25	39.08
น้ำหนักน้ำระเหย (kg/hr)	98.01	121.01	121.49
ร้อยละของการการระเหยน้ำ (%)	32.62	25.21	20.25

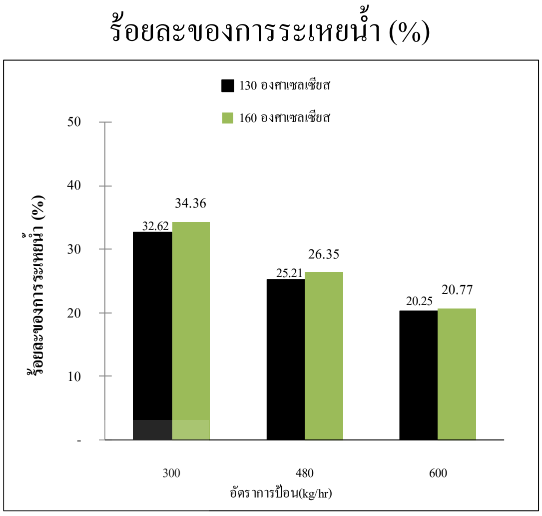
จากค่าอัตราการระเหยน้ำของวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าการระเหยน้ำของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว มีค่าเท่ากับ 97.93, 116.37 และ 98.01 kg/hr ตามลำดับ ซึ่งทะลายปาล์มมีอัตราการระเหยน้ำที่สูงสุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักคือ 38.79%

ตารางที่ 4.13 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 160°C

รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)		
	300	480	600
น้ำหนักขุยมะพร้าวก่อนอบ (kg/hr)	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (% w.b.)	49.47	50.63	51.67
น้ำหนักขุยมะพร้าวหลังอบ (kg/hr)	196.92	353.48	475.39
ความชื้นหลังอบ (% w.b.)	23.32	32.96	39.04
น้ำหนักน้ำระเหย (kg/hr)	103.07	126.51	124.60
ร้อยละของการการระเหยน้ำ (%)	34.36	26.35	20.77

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบอัตราการระเหยน้ำที่อัตราการป้อนต่าง ๆ

4.4 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

4.4.1 เปลือกไม้ยูคาลิปตัส

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.14 -4.15 เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราการป้อน 150 300 480 และ 600 kg/hr ที่อุณหภูมิ 130°C ค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 5.25, 3.39, 2.65 และ 2.59 MJ/kg$_{water}$ ตามลำดับ และที่ 160°C ค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 5.56,3.56, 2.91 และ3.19 MJ/kg$_{water}$ ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 160°C ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิ 130°C ในทุกกรณี กล่าวคือ อัตราการป้อนสูงจะทำให้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งต่ำลง แต่ความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบลดลงไม่ถึงค่าความชื้นที่ต้องการ ดังนั้นที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr เป็นอัตราการป้อนที่เหมาะสมสำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.39 MJ/kg$_{water}$

ตารางที่ 4.14 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130°C

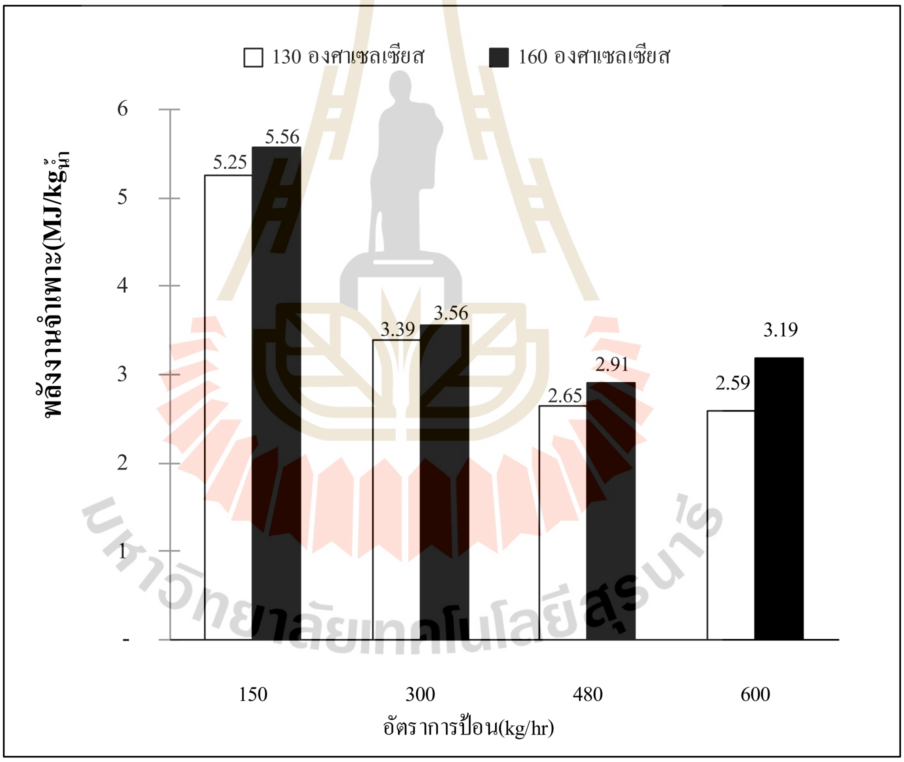
รายการ	อัตราการป้อน (kg/hr)			
	150	300	480	600
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	152.40	155.06	152.86	154.51
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	48.26	49.30	49.72	49.53
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	173.74	177.47	178.98	178.31
SEC (MJ/kg$_{water}$)	5.25	3.39	2.65	2.59

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4.15 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 160°C

รายการ	อัตราการป้อน (kg/hr)			
	150	300	480	600
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	195.36	195.65	198.88	195.22
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	48.06	49.31	48.87	49.62
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	173.02	177.50	175.94	178.63
SEC (MJ/kg_{water})	5.56	3.56	2.91	3.19

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส

4.4.2 ทะลายปาล์ม

จากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.16 -4.17 ทะลายปาล์มที่อัตราการป้อน 300 480 และ 600 kg/hr ที่อุณหภูมิที่ 130°C ค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 2.84, 2.86 และ 2.60 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 160°C ค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 3.15, 3.00 และ2.84 MJ/kg_{water} จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ

160°C ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิ 130°C ในทุกกรณี กล่าวคืออัตราการป้อนสูงจะทำให้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งต่ำลง แต่ความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบลดลงไม่ถึงค่าที่ต้องการ ดังนั้นที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr เป็นอัตราการป้อนที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งทะลายปาล์มซึ่งมีค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 2.84 MJ/kg_{water}

ตารางที่ 4.16 ผลการอบแห้งทะลายปาล์มที่อุณหภูมิ 130°C

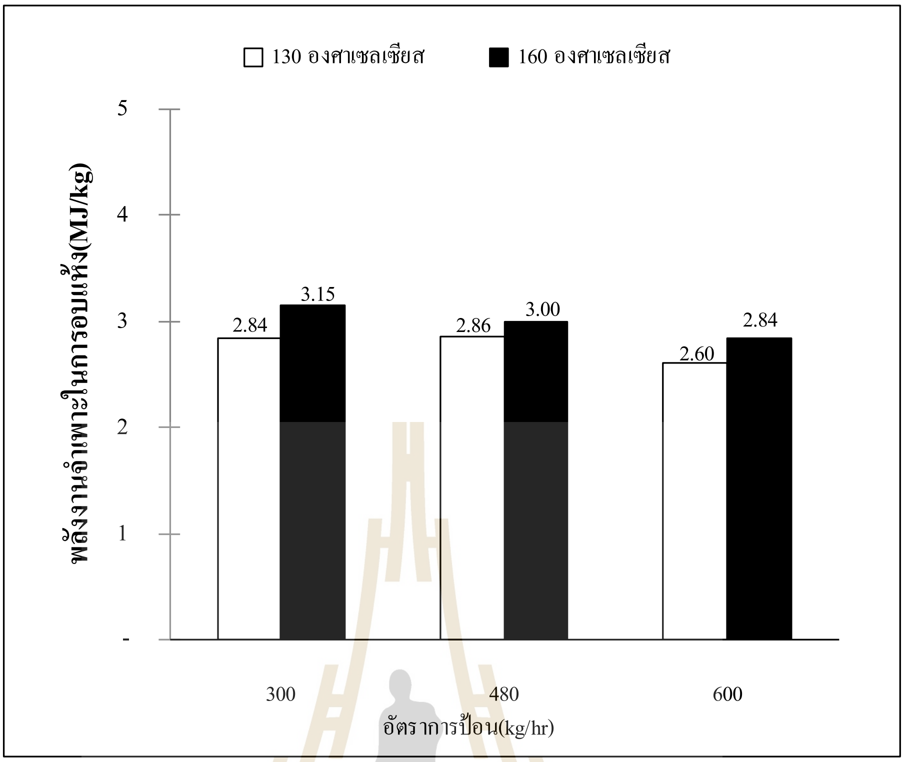
รายการ	อัตราการป้อน (kg/hr)		
	300	480	600
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	157.11	154.32	153.95
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	48.14	49.44	49.96
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	173.29	178.05	179.85
SEC (MJ/kg_{water})	2.84	2.86	2.60

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4.17 ผลการอบแห้งทะลายปาล์มที่อุณหภูมิ 160°C

รายการ	อัตราการป้อน (kg/hr)		
	300	480	600
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	196.92	198.82	194.48
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(kWh)	48.62	48.64	48.36
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	175.03	175.11	174.74
SEC (MJ/kg_{water})	3.15	3.00	2.84

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการอบทะลายปาล์ม

4.4.3 ขุยมะพร้าว

จากรูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.18 -4.19 ขุยมะพร้าวที่อัตราการป้อนที่ 300 480 และ 600 kg/hr ที่อุณหภูมิ 130°C ค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 3.36, 2.71 และ 2.76 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิ 160°C ค่าพลังงานจำเพาะมีค่า 3.58, 2.95 และ3.01 MJ/kg_{water} จากกราฟจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 160°C ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิ 130°C ในทุกกรณี กล่าวคือ อัตราการป้อนสูงจะทำให้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งต่ำลง แต่ความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบลดลงไม่ถึงค่าที่ต้องการ แต่ที่อัตราการป้อนวัตถุดิบ 480 kg/hr ค่าความชื้นสุดท้ายของขุยมะพร้าวลดลงใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ ดังนั้นที่อัตราการป้อนที่ 300-480 kg/hr เป็นช่วงอัตราการป้อนที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งขุยมะพร้าวซึ่งมีค่าพลังงานจำเพาะเท่ากับ 3.36 MJ/kg_{water}

ตารางที่ 4.18 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 130°C

รายการ	อัตราการป้อน (kg/hr)		
	300	480	600
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	157.61	153.19	153.65
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	47.96	48.81	50.30
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	173.64	175.70	181.08
SEC (MJ/kg_{water})	3.36	2.71	2.76

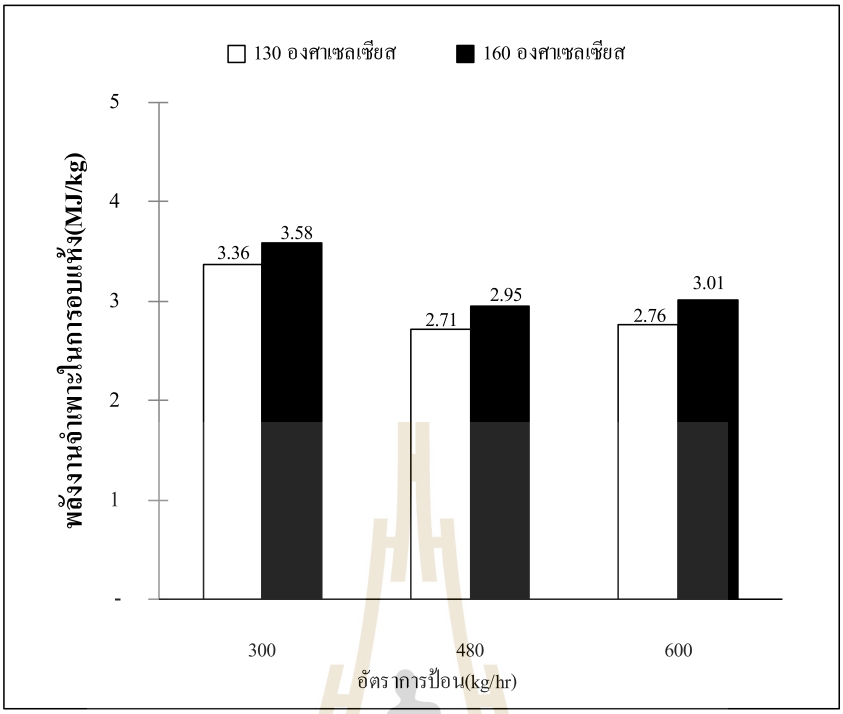
หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

ตารางที่ 4.19 ผลการอบแห้งขุยมะพร้าวที่อุณหภูมิ 160°C

รายการ	อัตราการป้อน (kg/hr)		
	300	480	600
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	197.93	197.93	197.97
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)	47.71	49.02	49.04
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	171.76	176.46	176.54
SEC (MJ/kg_{water})	3.58	2.95	3.01

หมายเหตุ: ค่าที่ได้เป็นผลการทดลองเฉลี่ย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบพลังงานจำเพาะในการอบแห้งขุยมะพร้าว

พลังงานจำเพาะในการอบวัสดุชีวมวลของวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ 130^{o}C มีค่าต่ำกว่าที่ 160^{o}C และที่อัตราการป้อนที่ 480 kg/hr ค่าพลังงานจำเพาะต่ำแต่ความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบไม่ถึงค่าความชื้นที่ต้องการ ดังนั้นจึงเลือกที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr ที่อุณหภูมิ 130^{o}C เป็นตัวพิจารณาในการเปรียบเทียบทั้งสามวัตถุดิบ พบว่าอยู่ระหว่าง 2.84-3.39 MJ/kg_{water} โดยที่พลังงานจำเพาะในการอบแห้งทะลายปาล์มมีค่าต่ำที่สุดสำหรับการอบแห้งแบบพาหะลม

4.5 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง

ผลการศึกษานี้แสดงถึงความสามารถของเครื่องอบแห้งที่สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากปล่องไอเสียของเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 500 kg_{vapor}/hr ระเหยน้ำภายในเนื้อของวัสดุชีวมวล ซึ่งจากการทดลองพบว่าการอบแห้งวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 130^{o}C อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr เป็นอัตราการป้อนที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งแบบพาหะลมสำหรับเครื่องต้นแบบอบแห้งนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการอบแห้งจากผลคูณของมวลของน้ำระเหยกับค่าความร้อนแฝงของน้ำหารด้วยพลังงานทั้งหมดทั้งจากไอเสียและจากไฟฟ้าที่ใช้ลำเลียงและสับย่อย ค่าที่ได้พบว่า ทะลายปาล์มมีประสิทธิภาพในการระเหยน้ำได้สูงสุดคือ 76.42% ส่วนเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและขุยมะพร้าวเท่ากับ 63.90 และ 64.21% ตามลำดับดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้ง

รายการ	วัสดุชีวมวล		
	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ทะลายปาล์ม	ขุยมะพร้าว
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	155.06	157.11	157.61
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (MJ)	177.47	173.29	173.64
น้ำหนักน้ำระเหย (kg)	97.93	116.37	98.01
พลังงานน้ำระเหย (MJ)	212.51	252.52	212.68
ประสิทธิภาพการอบแห้ง (%)	63.90	76.42	64.21

4.6 การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน

การวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้งวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ประเภท ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อาทิ ต้นทุนค่าเครื่องอบแห้งและเครื่องจักร ต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนการจัดหาพลังงาน และต้นทุนจากแรงงานในขั้นตอนการผลิต โดยในการศึกษาครั้งนี้เมื่อไม่คำนึงถึงต้นทุนของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

เมื่อนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้ง ที่ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด จำนวน 1ตัน โดยคิดราคาวัตถุดิบที่ 100 บาท/ตัน ใช้แรงงานคนในการลำเลียงวัตถุดิบ 2 คน และปริมาณไฟฟ้าในการลำเลียงและสับย่อย 165 หน่วย (Kwh) ซึ่งใช้ระยะเวลาทั้งหมดจนเสร็จสิ้นกระบวนการ 3.3 ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.21

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์ต้นทุนในการอบแห้งชีวมวล

รายการ	**ราคา (บาท)**
ค่าวัตถุดิบสด 1000 kg x 0.1 บาท/ kg	100
แหล่งความร้อนจากปล่องไอเสีย (ผลพลอยได้)	-
แรงงานในการลำเลียงวัสดุ 2 คน x 40บาท/ชั่วโมง x 3.3ชั่วโมง	264
ค่าไฟฟ้า 50 KWh x 3.3 ชั่วโมง x 3 บาท/KWh	495
รวม	**859**

ตารางที่ 4.22 การวิเคราะห์ต้นทุนเทียบกับการระเหยน้ำ

รายการ	เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	ทะลายปาล์ม	ขุยมะพร้าว
ต้นทุนในการผลิต (บาท)	859	859	859
น้ำหนักน้ำระเหย (kg)	346.00	388.70	340.13
น้ำหนักหลังการอบแห้ง(kg)	654.00	611.30	659.87
ต้นทุนในการระเหยน้ำ (บาท/kg)	2.48	2.21	2.53
ต้นทุนต่อน้ำหนักหลังการอบแห้ง(บาท/kg)	1.31	1.40	1.30

เมื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปพร้อมใช้ (ASFINE) โดยคิดที่ความชื้น 30% w.b. มีค่าแสดงดังตารางที่ 4.23 และเมื่อเปรียบเทียบค่าต้นทุนในอบแห้งที่อัตราการป้อน 300 kg/hr พบว่ามีต้นทุนในการผลิตใกล้เคียงกับการใช้ถ่านหิน ซึ่งกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลมโดยใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไอน้ำสำหรับการอบแห้งชีวมวลทั้ง 3 ชนิด มีค่าเท่ากับ 0.43, 0.39 และ 0.43 บาท/Mcal เมื่อเปรียบเทียบกับค่าต้นทุนเชื้อเพลิงอื่น ๆ ดังตารางที่ 4.24 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าต้นทุนต่อพลังงานของถ่านหิน ดังนั้นวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด มีศักยภาพในการแปรรูปในเชิงอุตสาหกรรมได้โดยที่ทลายปาล์มมีศักยภาพสูงสุด

ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์ต้นทุนเทียบกับค่าความร้อน

Biomass	**ค่าความร้อน (kcal/kg)**	**ต้นทุนการผลิต (บาท/Mcal)**
เปลือกไม้ยูคาลิปตัส	3,010	0.43
ทะลายปาล์ม	3,580	0.39
ขุยมะพร้าว	3,027	0.43

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.24 แสดงต้นทุนเชื้อเพลิงต่อพลังงานของถ่านหินและเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์

ประเภทเชื้อเพลิง	ความชื้น (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ค่าความร้อน (Mcal/kg)	ต้นทุนเชื้อเพลิง ต่อน้ำหนัก (บาท/kg)	ต้นทุนเชื้อเพลิง ต่อปริมาตร (บาท/m^3)	ต้นทุนเชื้อเพลิง ต่อพลังงาน (บาท/Mcal)
เชื้อเพลิงขยะ RDF4	7.87	38.9	10.36	1.03	40.07	0.10
เชื้อเพลิงขยะ RDF5	11.30	430.0	10.36	1.25	537.5	0.12
แอนทราไซด์ (anthracite)	12-15	850	7.51	3.6	3,060	0.48
บิทูมินัส (bituminous)	12-15	850	6.31	3.0	2,550	0.48
ลิกไนต์ (lignite)	12-15	850	2.50	1.2	1,020	0.48
น้ำมันเตา	-	940	9.51	18.0	16,920	1.89
แกลบ	12-15	150	2.97	1.0	150	0.34
ซังข้าวโพด	12-15	138	3.73	1.0	138	0.27
กะลามะพร้าว	12-15	228	3.82	2.5	570	0.66

หมายเหตุ: ยังไม่รวมค่าขนถ่ายขึ้นรถบรรทุกและค่าขนส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งแบบพาหะลมโดยการนำความร้อนเหลือทิ้งปล่องไอเสียของเครื่องกำเนิดไอน้ำมาใช้ในการอบแห้งชีวมวล สรุปได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

5.1.1 สมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิดพบว่ามีค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 50-65% w.b. และมีค่าความหนาแน่นที่ 120-150 kg/m^3 ซึ่งเหมาะสมสำหรับการอบแห้งแบบพาหะลมเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

5.1.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่าง ๆ

จากการทดสอบสภาวะการอบวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ เปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว อุณหภูมิในการอบแห้ง 130 และ160^{o}C ที่อัตราการป้อน 300 480 และ 600 kg/hr อุณหภูมิที่สูงกว่าไม่มีผลต่อความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลที่ใช้ทำการอบแห้ง แต่อัตราการป้อนวัสดุชีวมวลมีผลต่อความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวล ดังนั้นที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr ให้ความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลลดลงต่ำกว่า 30% w.b. ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมสำหรับอัดเม็ดชีวมวลให้คงรูปได้

5.1.3 อัตราการระเหยน้ำ

ผลการศึกษาอัตราการระเหยน้ำของวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าการระเหยน้ำของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว มีค่าเท่ากับ 97.93, 116.37 และ 98.01 kg/hr ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักน้ำระเหยต่อน้ำหนักที่ป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 32.64, 38.79 และ 32.62% ซึ่งทะลายปาล์มมีอัตราการระเหยน้ำที่สูงสุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักคือ 38.79%

5.1.4 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

ผลการศึกษาพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าวที่อัตราการป้อน 300 kg/hr มีค่า 3.39, 2.84 และ 3.36 MJ/kg ตามลำดับ ซึ่งทะลายปาล์มมีค่าพลังงานจำเพาะน้อยสุดคือ 2.84 MJ/kg_{water} ส่วนที่อัตราการป้อนที่ 480 และ 600 kg/hr ค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งต่ำกว่า แต่ความชื้นสุดท้ายของวัสดุชีวมวลยังมีค่าสูงมาก ไม่สามารถนำมาอบแห้งได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.1.5 ศึกษาประสิทธิภาพรวมของการอบแห้ง

ผลจากการศึกษาการการอบแห้งชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่าทะลายปาล์มมีประสิทธิภาพรวมของการอบแห้งสูงสุดคือ 76.42% ส่วนประสิทธิภาพรวมของการอบแห้งสำหรับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสและขุยมะพร้าว มีค่าเท่ากับ 63.90 และ 64.21% ตามลำดับ

5.1.6 การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน

จากการวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปวัสดุชีมวลทั้ง 3 ชนิดพบว่ามีต้นทุนในการแปรรูป 1,300 บาท/ตัน ที่ความชื้น 30% w.b. ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม และขุยมะพร้าว มีค่าความร้อน 3009.68, 3580.49 และ 3026.82 kcal/kg หรือ 12.34, 14.68 และ 12.41 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปพร้อมใช้ (ASFINE) มีค่า 0.43, 0.39 และ 0.43 บาท/Mcal ตามลำดับ ต่ำกว่าการใช้ถ่านหินซึ่งมีค่า ASFINE 0.49บาท/Mcal เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนพบว่า การอบแห้งวัสดุชีวมวลด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมโดยใช้แหล่งความร้อนจากปล่องไอเสียของเครื่องกำเนิดไอน้ำ มีศักยภาพที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ได้

5.2 การนำผลการศึกษาไปใช้ประโยชน์

1) จากการศึกษาการนำความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียของเครื่องกำเนิดไอน้ำมาอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลพบว่าสามารถใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพดี โดยเครื่องอบแห้งที่ใช้ความร้อนประเภทนี้สามารถใช้ในการอบแห้งวัสดุประเภทอื่นได้อีก เช่น ใบอ้อย ฟางข้าว วัสดุที่มีมวลเบาสามารถขนถ่ายในอากาศได้

2) จากข้อมูลการศึกษาการอบแห้งชีวมวลทั้งสามชนิดนี้ทำให้พบว่าที่อัตราการป้อนสูงทำให้ความชื้นของวัสดุชีวมวลลดลงได้ไม่ถึงค่าที่ต้องการ ดังนั้นจึงได้สร้างถังอบเพิ่มขึ้นอีก 1 ถัง เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสความร้อนให้นานขึ้น เพื่อที่จะทำให้ความชื้นสุดท้ายของวัตถุดิบมีค่าต่ำลงถึงค่าที่ต้องการ

5.3 ข้อเสนอแนะ

พลังงานจำเพาะพบว่าที่อัตราการการป้อนสูงขึ้นทำให้ค่าพลังงานจำเพาะลดลง แสดงว่าเครื่องอบแห้งที่ทำการทดสอบสามารถปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้มีความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 30% w.b. ได้ โดยการเพิ่มปริมาณลมร้อนและระยะทางหรือช่วงเวลาของการอบแห้ง

รายการอ้างอิง

ฉัตรชัย นิมมล. 2555. ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้หออบแห้งชนิดท่อเกลียว. **KKU Res.J.2012 ; 17(1)** : 97-109.

ทนงค์ ฉายาวัฒนะ (2537). เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเกษตร ครั้งที่ 6** ณ อาคารศูนย์เครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดนครปฐม วันที่ 18-20 พฤษภาคม: 122-135.

ธนะรัชต์ วิจินธนสาร และคณะ. 2554. การลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสชนทำงานร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม. **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25** ณ จังหวัดภูเก็ต วันที่ 19-21 ตุลาคม 2554.

วีรชัย อาจหาญ และคณะ 2554. "**การเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้ เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม**". รายงานการวิจัย สำนักนโยบายแผนและพลังงาน กระทรวงพลังงาน

สาวิตรี คำหอม และวีรชัย อาจหาญ. 2551. "**การศึกษาผลกระทบของสมบัติของเชื้อเพลิงต่อค่าความร้อน**" เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551., คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สุภัทร หนูแย้ม และคณะ. 2551. "**การศึกษาลักษณะการอบแห้งของเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบโรตารี**" .เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 9 ประจำปี 2551., คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สุรเดช ภัทรวิเชียร. 2541. การปรับปรุงกระบวนการอบแห้งแป้งมันสำปะหลัง. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.** : 15-16

ศรัณย์ วัฒนไชย. 2545. การจำลองแบบและทดลองเครื่องอบแห้งกากอ้อยแบบพาหะลม. **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**

ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. 2549. " **ชีวมวล**" , บริษัท คิว พริ้นท์ แมเนจเม้นท์ จำกัด., กรุงเทพ

W. Kaensup, Kulwong, S., and S. Wongwises. 2006. "**Comparison of Drying Kinetics of Paddy using a Pneumatic Conveying Dryer with and without a Cyclone**", **Drying Technology**, Vol. 24, No. 8, pp. 1039-1045.

Wade A. Amos, 1998. **Report on Biomass Drying Technology**. National Renewable Energy Laboratory A national laboratory of the U.S. Department of Energy Managed by Midwest Research Institute for the U.S. Department of Energy.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

ก1 การหาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุชีวมวล

ก1.1 ความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นของวัสดุชีวมวลจะอยู่ในรูปของความหนาแน่นปรากฏ (bulk density) หาได้จากอัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของวัสดุชีวมวล วิธีการทำได้โดยใส่วัสดุชีวมวลในภาชนะที่วัดปริมาตรได้แน่นอนให้เต็มไม่ให้เหลือช่องว่างภายในภาชนะ นำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณค่าความหนาแน่นตามสมการดังต่อไปนี้

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

ก1.2 ความชื้น

คือร้อยละของน้ำต่อน้ำหนักวัสดุชีวมวลแห้งซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1 อบถาดอลูมิเนียมในเตาอบ (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105ºC เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสสิเคเตอร์ (desiccator) ทิ้งให้เย็นลงประมาณ 15 นาที จากนั้นนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก

2 ชั่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองลงในถาดอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

3 นำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ105ºC เป็นเวลา 72 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักตัวอย่างของตัวอย่างคงที่

4 นำถาดอลูมิเนียมเข้าเดสสิเคเตอร์ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาทีจึงทำการชั่งน้ำหนักถาดอลูมิเนียมที่มีตัวอย่างที่ทำการอบแล้วอยู่ภายในทำการบันทึกผลจากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณ

ความชื้นมาตรฐานเปียก จะแสดงของน้ำหนักของน้ำที่มีอยู่ต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ โดยปกติจะแสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์

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

เมื่อ

M_{wb}	คือ	ร้อยละของความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis)
W_1	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการอบ (g)
W_2	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหลังทำการอบ (g)

ก2 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

SEC = $(3.6Pe)+(m_{ex}Cp_{ex}T)$/ปริมาณน้ำระเหย

SEC = พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง / ปริมาณน้ำระเหย

= (พลังงานจากระบบไฟฟ้า + พลังงานความร้อนปล่องไอเสีย) / ปริมาณน้ำระเหย

เมื่อ

Pe คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

Cp_{ex} คือ ความจุความร้อนของไอเสีย(kJ/kg °C)=1.12 kJ/kg°C

ก3 ประสิทธิภาพรวมของเครื่องอบแห้ง

ทำได้โดยการหาพลังที่ใช้ในการระเหยน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในเครื่องอบแห้ง จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณ

$$\eta_t = (m_w h_{fg}/Q) x 100$$

เมื่อ

η_t	คือ	ประสิทธิภาพรวมการอบแห้ง, %
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหย, kg
h_{fg}	คือ	ความร้อนแผงที่ใช้ในการระเหยน้ำ, MJ/kg
Q	คือ	พลังงานความร้อนของไอเสีย+พลังงานความร้อนจากไฟฟ้า MJ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกข้อมูลการอบแห้งชีวมวลด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ตารางที่ ข1 ข้อมูลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 300 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	195	132	8.2			50.2	39.9	33.4	26.2	31	74.3
13:05	194	131		11.2	11.8	50.5	40.3	34.3	28.6	31	72.5
13:10	196	133	8.4			52.4	42.4	31.2	28.5	31	69.7
13:15	197	130		12.2	11.3	48.3	41.2	34.2	30.2	31	71.1
13:20	195	129	8.1			44.3	43.5	31.2	29.5	31	72.8
13:25	194	129		11.2	11.8	52.3	40.2	40.2	25.6	31	73.1
13:30	193	129	8.3			54.3	39.8	31.2	26.6	31	74.7
13:35	192	131		11.8	12.4	56.5	37.2	34.2	28.3	31	70.3
13:40	193	132	8.2			53.4	41.5	37.4	27.4	32	74.1
13:45	195	132		12.1	13.2	54.4	42.3	31.2	27.6	32	72.9
13:50	193	131	8.6			52.3	42.6	32.1	26.4	32	74.2
13:55	196	130		10.9	12.8	53.2	40.3	31.2	28.4	32	71.6
14:00	198	130	8.4			55.3	41.2	31.2	26.6	32	69.2
14:05	195	130		10.3	12.5	51.4	39.2	38.5	25.3	31	72.6
14:10	195	130	8.2			49.2	37.8	31.2	30.6	32	70.9
14:15	198	129		12.2	10.9	44.3	38.9	31.2	27.7	32	72.5
14:20	192	129	8.6			55.6	39	34.4	30.3	32	65.8
14:25	194	129		13.1	11.2	56.3	40.5	31	28.1	31	69.5
14:30	194	128	8.2			51.4	33.8	32.4	30	32	72.4
14:35	194	129		12.2	12.4	53.2	39.2	32.1	25.4	32	69.2
14:40	193	130	8.4			48.8	42.5	31.6	25.2	31	71.1
14:45	195	132		11.8	13.2	43.4	47.4	33.1	28.9	32	68.4
14:50	194	132	8.9			41.3	48.9	32.5	28.5	32	67.3
14:55	195	131		11.8	13.4	50.4	41.4	40.2	25.6	32	67.9
15:00	192	130	8.4			52.6	42.8	31.2	27.6	31	68.4
เฉลี่ย	**194.48**	**130.32**	**8.38**	**11.73**	**12.24**	**51.01**	**40.95**	**33.30**	**27.72**	**31.52**	**71.16**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข2 ข้อมูลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 480 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	193	131	8.4			50.2	42.3	42.3	40.4	31	69.8
13:05	195	131		10.2	11.3	55	50.2	43.2	37.4	31	69.9
13:10	196	132	8.3			52.4	41.2	42.4	38.5	31	68.9
13:15	195	130		10.3	11.4	51.3	42.4	42.4	36.2	31	71.1
13:20	192	129	8.6			55.8	50.6	43.7	35.3	31	72.8
13:25	192	129		10.4	12.4	52.5	50.4	44.4	40.3	31	72.6
13:30	194	129	8.4			48.4	42.2	42.2	40.4	31	74.2
13:35	192	129		11.2	13.2	48.4	52.4	43.3	32.6	31	72.4
13:40	192	129	8.4			48.4	42.2	41.5	34.1	31	74.1
13:45	192	129		12.5	11.1	51.2	50.4	42.3	39.5	31	72.6
13:50	191	131	8.9			53.2	42.2	42.5	39.4	31	74.4
13:55	196	130		10.5	12.2	53.2	42.2	45.5	33.4	31	72.2
14:00	190	132	8.6			49.6	41.2	41.2	34.1	31	74.4
14:05	190	131		10.2	12.5	52.2	42.4	42.3	40.4	31	74.4
14:10	191	131	8.2			51.2	43.3	39.9	32.2	31	74.5
14:15	192	129		10.2	11.9	47.2	42.4	41.2	32.1	32	72.5
14:20	190	129	8.2			48.4	42.2	42.4	33.1	32	65.8
14:25	193	129		12.4	10.2	54.6	48.6	42.2	40.6	31	71.5
14:30	194	129	8.2			48.4	48.4	42.2	39.4	32	72.5
14:35	192	129		11.2	11.8	48.5	49.8	42.2	33.1	32	71.5
14:40	191	130	8.4			49.2	48.3	42.5	39.4	31	71.1
14:45	190	131		11.6	11.2	48.2	41.6	42.2	39.8	31	69.9
14:50	191	130	8.2			49.4	48.8	42.2	40.6	32	70.2
14:55	190	129		11.8	11.4	51.2	48.4	42.2	40.5	31	70.2
15:00	190	129	8.2			49.9	48.4	42.2	40.2	31	70.6
เฉลี่ย	**192.16**	**129.88**	**8.38**	**11.04**	**11.72**	**50.72**	**45.7**	**42.42**	**37.32**	**31.2**	**71.76**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข3 ข้อมูลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 600 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	193	132	8.4			50.2	46.5	44.8	36.6	30	72.2
13:05	194	129		10.8	10.8	51.4	45.8	43.8	36.6	30	74.5
13:10	193	128	8.4			52.4	46.6	45.6	38.4	30	68.9
13:15	194	126		12.5	12.2	51.2	43.8	47.8	41.2	30	71.2
13:20	193	135	8.6			51.1	47.8	43.3	38.6	30	70.2
13:25	193	134		12.2	11.6	52.2	46.8	40.2	38.8	31	70.8
13:30	194	135	8.4			49.4	46.6	43.5	41.2	31	72.2
13:35	192	134		14.2	12.8	49.9	48.6	42.2	38.4	31	71.2
13:40	190	131	8.3			51.2	46.8	45.6	41.5	31	75.9
13:45	192	125		14.2	11.2	52.2	47.8	42.4	42.5	31	77.3
13:50	192	129	8.4			51.2	49.7	43.6	39.4	30	74.5
13:55	192	128		10.2	12.5	52.4	45.8	43.6	38.9	30	76.4
14:00	190	131	8.2			51.1	48.6	42.2	41.2	30	71.2
14:05	191	131		12.8	10.3	50.2	46.5	44.4	42.4	31	71.2
14:10	192	132	8.2			52.2	45.8	44.4	36.6	30	70.2
14:15	193	132		12.8	10.2	51.8	44.5	41.2	42.4	30	72.2
14:20	194	132	8.6			52.1	44.6	43.4	36.6	31	71.2
14:25	192	132		12.4	10.2	52.2	44.1	46.5	38.7	30	72.3
14:30	192	132	8.4			52.2	46.6	45.6	37.4	31	76.6
14:35	190	132		11.5	11.2	51.2	47.8	44.4	38.5	30	73.3
14:40	190	131	8.4			51.9	42.4	44.4	35.5	31	73.4
14:45	189	133		15.2	12.4	50.4	44.8	41.6	41.6	30	72.2
14:50	189	133	8.4			52.2	45.4	45.6	39.6	31	70.4
14:55	190	133		12.1	10.5	51.2	42.4	48.6	39.1	30	72.2
15:00	192	133	8.4			51.9	45.2	49.8	35.5	31	73.4
เฉลี่ย	**191.84**	**131.32**	**8.39**	**12.58**	**11.33**	**51.41**	**46.05**	**44.34**	**39.09**	**30.44**	**72.60**

ตารางที่ ข4 ข้อมูลการอบแห้งทะลายปาล์ม ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 300 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	195	133	8.4			60.2	45.3	35.4	31.2	29	70.2
13:05	194	132		11.2	10.8	59.4	46.4	37.4	29.4	30	70.2
13:10	192	134	8.4			58.4	45.7	38.5	32.4	30	69.4
13:15	193	130		10.2	11.6	60.2	42.3	36.2	31.2	28	65.2
13:20	195	129	8.3			61.2	50.2	35.3	32.3	29	68.4
13:25	194	133		10.2	11.1	60.3	42.6	33.2	26.8	29	70.2
13:30	192	129	8.3			55.6	47.3	31.2	32.2	29	65.4
13:35	193	134		11.8	14.4	53.1	42.5	32.6	30.5	29	70.5
13:40	192	132	8.8			55.6	41.5	34.1	29.6	29	72.9
13:45	194	132		12.1	13.2	53.4	42.3	39.5	31.2	30	68.9
13:50	193	131	8.2			59.4	43.6	39.4	25.4	30	67.9
13:55	192	130		11.9	11.8	52.4	40.3	33.4	28.4	30	69.7
14:00	192	133	8.6			54.6	41.4	34.1	32.2	30	70.2
14:05	198	130		11.3	13.5	56.8	41.4	31.1	31.1	30	70.5
14:10	196	134	8.8			58.3	43.3	32.2	28.3	30	71.2
14:15	195	132		12.2	10.9	57.5	42.1	32.1	25.5	30	72.5
14:20	194	130	8.4			54.8	41.2	33.1	32.1	30	71.4
14:25	198	129		13.1	11.2	58.6	41.4	30.1	30.4	30	69.4
14:30	196	127	8.2			56.9	42.1	39.4	31.2	30	68.4
14:35	196	129		11.2	12.4	57.8	48.4	33.1	27.8	30	65.4
14:40	194	129	8.4			58.4	48.6	39.4	29.3	30	67.8
14:45	195	132		10.8	11.2	54.7	44.4	39.8	31.2	30	68.9
14:50	195	128	8.4			56.7	44.8	32.5	31.2	30	71.5
14:55	196	131		10.8	12.4	54.6	42.4	39.6	29.5	30	72.4
15:00	193	130	8.4			59.8	46.8	40.2	29.4	30	68.4
เฉลี่ย	**194.28**	**130.92**	**8.43**	**11.40**	**12.04**	**57.15**	**43.93**	**35.32**	**29.99**	**29.68**	**69.48**

ตารางที่ ข5 ข้อมูลการอบแห้งทะลายปาล์ม ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 480 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	193	132	8.5			62.2	50.4	45.6	42.6	30	70.5
13:05	194	131		11.5	11.5	55.3	52.3	46.3	46.7	30	71.2
13:10	194	133	8.4			56.6	54.3	44.4	44.4	30	72.3
13:15	195	131		12.4	12.5	59.9	50.2	46.8	38.7	30	69.4
13:20	193	133	8.4			61.2	51.1	47.8	44.3	30	68.2
13:25	192	131		11.1	12.1	60.3	52.4	49.6	38.7	30	67.7
13:30	192	131	8.4			66.6	50.2	46.6	45.6	31	70.2
13:35	191	130		12.6	14.5	51.2	50.2	43.2	42.2	31	70.5
13:40	190	131	8.2			49.5	49.8	42.6	44.4	31	72.9
13:45	193	131		12.4	13.5	51.2	48.7	47.6	43.3	31	71.2
13:50	194	131	8.1			55.4	49.6	46.8	44.5	31	72.2
13:55	195	131		12.2	12.1	54.5	51.6	47.6	45.6	31	69.7
14:00	193	133	8.4			56.7	49.8	48.5	41.3	32	70.2
14:05	193	131		11.6	12.4	51.2	46.8	43.3	43.4	31	70.9
14:10	190	130	8.8			52.4	51.8	44.6	44.4	31	72.2
14:15	191	131		12.2	10.9	54.4	52.4	44.4	45.4	31	72.5
14:20	192	130	8.4			54.8	50.4	45.6	44.5	31	72.2
14:25	193	129		12.8	11.2	56.5	51.4	47.5	43.2	31	71.1
14:30	191	129	8.2			56.9	53.5	47.6	42.2	31	71.1
14:35	192	129		11.2	11.8	53.7	49.6	44.6	44.4	31	75.5
14:40	191	129	8.4			66.6	47.7	46.7	42.2	31	74.5
14:45	193	129		11.6	11.2	67.8	48.9	45.3	45.5	31	72.2
14:50	193	129	8.2			56.7	51.6	42.4	40.2	31	72.2
14:55	194	131		10.8	14.2	52.6	50.6	46.6	39.6	31	72.4
15:00	190	130	8.5			59.8	49.6	45.8	42.5	31	71.2
เฉลี่ย	**192.48**	**130.64**	**8.38**	**11.87**	**12.33**	**56.96**	**50.60**	**45.91**	**43.19**	**30.8**	**71.37**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข6 ข้อมูลการอบแห้งทะลายปาล์ม ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 600 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	193	131	8.2			60.5	50.2	42.3	47.6	31	70.2
13:05	194	131		11.2	12.2	58.8	49.8	44.4	46.8	30	72.5
13:10	190	132	8.4			56.6	52.4	48.8	46.6	30	71.8
13:15	191	133		12.6	12.5	59.9	51.2	49.2	46.8	30	70.2
13:20	192	131	8.2			59.8	51.1	42.2	49.7	30	72.6
13:25	192	132		11.6	13.4	58.7	48.6	48.9	45.5	30	70.4
13:30	193	132	8.6			66.6	49.4	42.1	45.6	31	71.6
13:35	194	131		12.8	12.2	55.5	49.9	49.2	49.9	30	71.6
13:40	190	132	8.2			56.7	46.6	48.6	46.6	30	72.8
13:45	191	131		12.6	11.8	52.2	52.2	49.3	43.3	30	70.2
13:50	192	131	8.4			54.8	51.2	46.6	44.5	31	72.2
13:55	193	131		13.2	12.6	54.5	49.8	48.9	45.6	31	70.2
14:00	194	131	8.2			56.4	51.1	49.2	45.6	31	71.2
14:05	192	131		14.8	11.1	55.5	49.8	48.9	44.4	30	71.2
14:10	194	132	8.4			56.5	52.2	45.5	44.4	30	72.8
14:15	195	131		12.6	12.3	54.4	49.8	44.4	45.4	30	72.5
14:20	193	130	8.4			54.8	52.1	48.8	44.5	31	72.2
14:25	194	129		12.8	14.2	56.5	49.8	45.5	43.2	31	69.9
14:30	194	129	8.4			55.5	52.2	46.5	48.7	31	72.2
14:35	192	131		12.2	11.8	54.4	51.2	46.7	46.6	31	72.8
14:40	190	129	8.4			59.8	49.8	48.8	42.4	31	74.5
14:45	190	129		12.4	10.9	59.8	50.4	49.2	45.5	30	72.2
14:50	190	129	8.8			56.7	52.2	46.6	40.2	30	75.5
14:55	190	131		12.6	10.9	55.5	48.7	48.8	48.9	30	76.6
15:00	190	129	8.6			52.2	47.6	48.6	49.6	30	72.8
เฉลี่ย	**192.12**	**130.76**	**8.4**	**12.62**	**12.16**	**56.9**	**50.37**	**47.12**	**45.92**	**30.4**	**72.11**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข7 ข้อมูลการอบแห้งขุยมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 300 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	195	129	8.2			45.6	42.2	31.2	22.4	29	70.1
13:05	195	129		11.2	11.2	48.4	44.3	29.4	25.4	28	69.9
13:10	194	129	8.4			47.8	43.4	32.4	24.6	28	69.8
13:15	196	130		12.5	12.1	50.2	41.2	31.2	24.8	29	68.7
13:20	195	131	8.3			55	42.2	32.3	24.5	29	68.1
13:25	196	129		10.4	11.3	48.9	43.3	26.8	22.4	29	69.8
13:30	193	128	8.3			49.4	41.2	32.2	23.2	29	68.9
13:35	194	128		11.5	12.2	47.9	42.1	30.5	26.2	29	69.8
13:40	195	131	8.3			51	41.5	29.6	22.4	29	69.2
13:45	195	131		11.4	12.3	51.5	42.5	31.2	22.4	30	62.9
13:50	196	131	8.3			48.3	39.4	25.4	22.4	29	68.9
13:55	196	131		11.9	11.6	49.6	38.9	28.4	22.4	29	69.2
14:00	198	130	8.2			47.8	41.2	32.2	25.6	29	68.8
14:05	194	129		11.6	13.5	48.6	42.4	31.1	26.6	28	69.8
14:10	195	129	8.6			48.3	43.3	28.3	28.3	28	68.9
14:15	192	131		12.9	11.2	43.5	42.4	25.5	27.4	28	72.1
14:20	192	132	8.4			45.6	42.2	32.1	25.5	28	74.4
14:25	193	129		11.2	12.2	49.6	38.7	30.4	25.4	29	69.8
14:30	194	129	8.4			47.8	37.4	31.2	24.6	29	68.4
14:35	193	129		11.2	12.2	51.2	38.5	27.8	24.8	28	68.9
14:40	194	129	8.4			52.2	35.5	29.3	24.5	28	69.8
14:45	195	129		10.8	13.1	48.9	41.6	31.2	26.4	28	68.9
14:50	192	129	8.5			49.4	39.6	31.2	23.2	28	68.9
14:55	191	129		10.8	12.5	49.8	39.1	29.5	22.4	28	68.9
15:00	190	128	8.4			51.2	35.5	29.4	22.4	28	67.8
เฉลี่ย	**194.12**	**129.56**	**8.36**	**11.45**	**12.12**	**49.10**	**40.78**	**29.99**	**24.41**	**28.56**	**69.23**

ตารางที่ ข8 ข้อมูลการอบแห้งขุยมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 130°C ที่อัตราการป้อน 480 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	194	131	8.3			50.2	43.5	37.4	33.4	30	72.2
13:05	193	132		11.8	12.2	52.2	43.3	36.6	34.3	30	73.3
13:10	192	131	8.3			51.3	43.6	37.8	31.2	30	71.2
13:15	193	130		11.2	13.2	50.2	44.4	32.4	34.2	30	65.5
13:20	193	131	8.6			51.1	43.3	38.6	31.2	30	65.4
13:25	194	132		11.4	11.5	48.9	42.2	38.6	40.2	30	69.8
13:30	192	131	8.4			49.4	41.2	37.6	31.2	30	71.2
13:35	191	131		11.3	12.4	47.9	45.5	36.6	34.2	30	71.2
13:40	190	131	8.3			48.8	44.4	36.8	37.4	31	72.1
13:45	190	131		11.4	14.4	52.2	42.2	34.6	31.2	31	73.3
13:50	189	131	8.2			51.2	39.9	35.6	32.1	30	70.2
13:55	188	131		11.1	13.3	52.3	39.2	36.8	31.2	30	69.2
14:00	192	130	8.2			48.8	42.2	37.6	31.2	30	68.8
14:05	194	131		11.6	11.2	48.8	44.4	39.8	38.5	30	69.8
14:10	191	132	8.4			47.8	43.3	34.6	31.2	30	70.2
14:15	189	132		11.8	12.9	43.5	41.2	36.8	31.2	30	72.1
14:20	190	132	8.4			47.8	39.8	38.6	34.4	31	71.2
14:25	190	132		11.2	11.1	49.6	37.8	38.9	31	30	69.9
14:30	190	132	8.4			48.9	37.4	39.6	32.4	31	69.9
14:35	191	132		11.2	12.6	51.2	38.8	37.5	32.1	30	68.9
14:40	190	131	8.4			52.2	39.8	35.7	31.6	31	69.8
14:45	192	131		11.2	11.1	50.4	41.6	36.7	33.1	30	70.2
14:50	189	131	8.3			50.5	43.3	36.8	32.5	31	70.4
14:55	191	133		10.8	11.6	52.2	43.4	36.4	40.2	30	72.2
15:00	191	132	8.4			55.3	44.4	34.6	31.2	30	73.4
เฉลี่ย	**190.75**	**131.60**	**8.36**	**11.24**	**11.72**	**50.41**	**41.68**	**36.88**	**33.29**	**30.33**	**70.70**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข9 ข้อมูลการอบแห้งขุยมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 130°Cที่อัตราการป้อน 600 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	193	132	8.4			50.2	46.5	44.8	36.6	30	72.2
13:05	194	129		10.8	10.8	51.4	45.8	43.8	36.6	30	74.5
13:10	193	128	8.4			52.4	46.6	45.6	38.4	30	68.9
13:15	194	126		12.5	12.2	51.2	43.8	47.8	41.2	30	71.2
13:20	193	135	8.6			51.1	47.8	43.3	38.6	30	70.2
13:25	193	134		12.2	11.6	52.2	46.8	40.2	38.8	31	70.8
13:30	194	135	8.4			49.4	46.6	43.5	41.2	31	72.2
13:35	192	134		14.2	12.8	49.9	48.6	42.2	38.4	31	71.2
13:40	190	131	8.3			51.2	46.8	45.6	41.5	31	75.9
13:45	192	125		14.2	11.2	52.2	47.8	42.4	42.5	31	77.3
13:50	192	129	8.4			51.2	49.7	43.6	39.4	30	74.5
13:55	192	128		10.2	12.5	52.4	45.8	43.6	38.9	30	76.4
14:00	190	131	8.2			51.1	48.6	42.2	41.2	30	71.2
14:05	191	131		12.8	10.3	50.2	46.5	44.4	42.4	31	71.2
14:10	192	132	8.2			52.2	45.8	44.4	36.6	30	70.2
14:15	193	132		12.8	10.2	51.8	44.5	41.2	42.4	30	72.2
14:20	194	132	8.6			52.1	44.6	43.4	36.6	31	71.2
14:25	192	132		12.4	10.2	52.2	44.1	46.5	38.7	30	72.3
14:30	192	132	8.4			52.2	46.6	45.6	37.4	31	76.6
14:35	190	132		11.5	11.2	51.2	47.8	44.4	38.5	30	73.3
14:40	190	131	8.4			51.9	42.4	44.4	35.5	31	73.4
14:45	189	133		15.2	12.4	50.4	44.8	41.6	41.6	30	72.2
14:50	189	133	8.4			52.2	45.4	45.6	39.6	31	70.4
14:55	190	133		12.1	10.5	51.2	42.4	48.6	39.1	30	72.2
15:00	192	133	8.4			51.9	45.2	49.8	35.5	31	73.4
เฉลี่ย	**191.84**	**131.32**	**8.39**	**12.58**	**11.33**	**51.42**	**46.05**	**44.34**	**39.09**	**30.44**	**72.60**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข10 ข้อมูลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 300 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	235	163	8.2			55.4	43.4	29.9	24.6	31	70.5
13:05	235	162		11.2	10.8	51.2	34.6	29.6	24.8	31	72.5
13:10	234	162	8.2			52.3	35.5	31.2	24.2	31	69.7
13:15	236	161		12.5	11.6	50.4	35.5	30.5	23.8	31	69.8
13:20	253	162	8.2			49.9	33.4	29.4	24.5	31	72.8
13:25	253	163		10.4	11.1	54.2	34.5	30.6	25.7	31	69.6
13:30	236	162	8.5			49.8	38.9	30.5	26.4	30	71.2
13:35	237	162		11.5	14.4	51.2	32.3	27.2	24.6	31	70.3
13:40	234	161	8.2			51.2	35.6	28.4	24.6	31	71.6
13:45	248	162		11.4	13.2	52.3	36.5	29.5	25.6	32	72.9
13:50	231	165	8.4			53.2	36.7	28.5	23.4	31	74.2
13:55	240	161		11.9	11.8	55.6	37.5	29.4	27.2	32	71.6
14:00	242	162	8.3			51.2	36.6	31.2	27.8	31	74.3
14:05	242	161		11.6	13.5	51.4	38.5	29.6	25.8	31	72.5
14:10	245	160	8.5			59.5	37.8	31.2	24.3	32	69.7
14:15	231	159		12.9	10.9	52.3	39.9	28.9	25.8	32	71.1
14:20	232	163	8.3			49.9	38.9	24.3	25.2	32	72.8
14:25	231	162		11.2	11.2	48.9	39.7	29.6	25.5	31	73.1
14:30	231	161	8.2			48.7	38.6	29.8	25.4	32	74.7
14:35	231	161		11.2	12.4	51.1	37.8	27.5	25.4	32	62.5
14:40	232	159	8.4			49.7	38.8	34.2	25.2	31	74.1
14:45	233	158		10.8	11.2	48.2	38.9	39.7	26.4	32	72.9
14:50	234	159	8.4			45.5	39.8	31.2	23.4	32	67.3
14:55	235	162		10.8	12.4	49.9	41.2	21.2	23.6	32	67.9
15:00	232	164	8.8			49.8	40.4	31.2	25.5	31	69.6
เฉลี่ย	**236.92**	**161.48**	**8.35**	**11.45**	**12.04**	**51.31**	**37.65**	**29.77**	**25.15**	**31.36**	**71.17**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข11 ข้อมูลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 480 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสฟ้ารวม (A)
13:00	235	162	8.6			52.2	42.3		30.6	31	70.4
13:05	236	163		11.4	12.4	54.2	43.2		32.2	31	71.2
13:10	248	163	8.4			52.4	42.4		31.4	31	70.5
13:15	243	162		12.6	12.8	51.2	42.4		30.5	31	71.1
13:20	243	163	8.8			52.6	43.7		32.4	31	70.4
13:25	245	163		11.5	13.2	50.5	43.5		33.2	31	70.4
13:30	254	162	8.4			56.7	42.8		31.2	31	69.8
13:35	238	163		11.6	14.2	55.2	43.3		33.2	31	68.9
13:40	233	161	8.2			54.3	42.4		35.8	31	70.2
13:45	235	163		11.4	11.9	54.8	42.4		31.2	31	70.2
13:50	231	165	8.4			53.2	42.3		32.1	31	74.4
13:55	225	159		11.8	12.4	58.4	42.4		30.5	32	72.2
14:00	234	158	8.4			55.6	42.4		36.4	31	70.2
14:05	243	157		10.4	13.2	56.6	42.3		30.1	31	70.2
14:10	245	161	8.4			54.3	39.8		36.3	32	70.2
14:15	254	159		10.4	12.1	56.4	38.7		31.2	32	72.5
14:20	232	163	8.8			56.8	40.8		35.4	32	65.8
14:25	244	162		10.6	10.2	58.2	39.8		35.8	31	71.5
14:30	231	161	8.2			56.8	39.6		35.4	31	72.5
14:35	235	160		10.8	10.2	56.8	37.8		35.6	31	70.2
14:40	231	166	8.4			54.6	40.1		31.6	31	71.1
14:45	222	162		10.8	10.2	52.4	40.2		36.8	31	69.9
14:50	256	161	8.2			54.2	40.5		36.6	31	69.8
14:55	254	159		10.8	10.6	54.2	40.2		36.8	31	70.2
15:00	255	157	8.6			52.4	39.5		35.4	31	69.8
เฉลี่ย	**241.79**	**160.65**	**8.42**	**10.73**	**11.03**	**54.83**	**40.19**		**34.95**	**31.17**	**70.28**

ตารางที่ ข12 ข้อมูลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 600 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	234	163	8.8			51.2	47.4	45.5	44.3	31	71.2
13:05	235	163		10.4	12.4	52.3	51.2	45.6	46.4	31	72.3
13:10	232	162	8.6			52.2	50.6	46.6	45.6	31	70.4
13:15	233	161		10.4	12.6	51.4	49.8	48.8	46.4	31	70.3
13:20	236	161	8.4			50.2	42.5	46.6	42.4	31	70.2
13:25	243	160		11.4	11.2	55.5	50.2	41.6	45.6	31	70.2
13:30	244	161	8.6			54.5	49.8	44.4	46.6	30	71.2
13:35	243	162		12.4	11.8	54.4	48.7	43.5	46.8	30	70.2
13:40	242	162	8.2			52.3	44.6	42.3	46.2	31	69.8
13:45	235	163		10.2	11.5	54.3	44.4	42.6	44.3	31	69.8
13:50	234	162	8.4			52.2	50.2	41.6	46.6	31	72.2
13:55	235	162		10.2	11.8	52.2	49.8	44.4	42.2	30	72.3
14:00	233	162	8.6			52.4	51.8	46.5	40.1	31	71.5
14:05	235	161		10.2	12.2	55.6	43.4	40.2	40.1	31	70.5
14:10	243	162	8.4			52.3	42.6	42.2	41.3	31	71.2
14:15	242	161		10.4	12.4	56.1	49.8	40.4	41.8	30	70.8
14:20	232	160	8.2			58.9	44.6	45.6	43.3	30	70.6
14:25	233	160		10.4	12.6	56.7	50.4	46.6	45.5	30	72.5
14:30	234	161	8.2			52.6	49.8	48.8	41.4	31	71.9
14:35	233	159		11.6	12.4	58.4	43.6	46.6	41.8	31	72.4
14:40	232	158	8.4			56.8	49.8	46.6	42.3	31	72.5
14:45	232	162		11.8	12.8	55.4	43.6	46.2	43.5	31	72.6
14:50	234	160	8.4			58.3	50.4	48.4	40.5	31	72.6
14:55	233	160		13.2	12.4	59.2	43.3	46.2	40.8	30	74.6
15:00	232	155	8.4			58.4	49.9	48.6	40.6	30	76.8
เฉลี่ย	**234.04**	**159.84**	**8.38**	**11.52**	**12.46**	**56.51**	**47.25**	**46.00**	**41.80**	**30.61**	**72.70**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข13 ข้อมูลการอบแห้งทะลายปาล์ม ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 300 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	243	160	8.2			60.3	47.4	37.4	26.4	30	72.4
13:05	234	162		11.4	12.2	62.2	45.6	38.5	32.5	30	71.2
13:10	232	164	8.6			64.4	44.4	36.6	31.2	30	72.6
13:15	233	162		11.6	11.8	59.5	48.6	39.4	26.4	30	69.6
13:20	231	161	8.2			62.2	44.4	35.5	30.5	30	71
13:25	232	159		10.8	12.8	60.3	46.6	37.8	30.2	29	68.4
13:30	231	160	8.2			55.6	46.2	40.2	31.2	29	62.5
13:35	231	159		11.4	13.9	55.6	42.3	36.6	34.4	29	70.5
13:40	234	160	8.6			56.6	43.6	36.8	30.1	29	72.9
13:45	235	158		11.8	13.2	54.3	44.6	38.6	30.6	30	68.9
13:50	248	159	8.8			60.3	43.6	36.6	31.2	30	67.9
13:55	232	160		12.4	11.8	52.4	40.4	35.4	30.6	30	69.7
14:00	235	162	8.4			54.6	41.2	36.8	31.6	30	62.4
14:05	246	162		11.8	11.4	55.4	41.4	36.4	31.1	30	70.5
14:10	243	161	8.4			56.5	40.1	37.4	25.6	29	69.9
14:15	233	162		11.8	12.8	54.3	40.2	35.4	30.2	29	71.2
14:20	231	162	8.2			54.2	40.5	33.4	30.5	30	71.4
14:25	234	162		12.6	12.6	58.6	40.2	34.6	30.4	29	71.2
14:30	231	164	8.6			55.4	40.2	36.6	26.4	30	72.2
14:35	235	162		12.4	12.4	54.8	41.2	38.5	30.5	30	71.2
14:40	253	161	8.2			58.4	40.5	36.6	30.5	29	70.8
14:45	231	162		11.8	11.9	52.4	41.2	35.4	31.6	29	70.8
14:50	253	163	8.4			58.6	41.8	36.5	30.6	29	71.5
14:55	235	160		11.2	12.6	54.6	42.3	38.6	31.2	30	72.4
15:00	248	159	8.2			52.4	40.4	38.4	2.55	30	71.4
เฉลี่ย	**236.96**	**161.04**	**8.38**	**11.75**	**12.45**	**56.96**	**42.76**	**36.96**	**29.12**	**29.60**	**70.18**

ตารางที่ ข14 ข้อมูลการอบแห้งทะลายปาล์ม ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 480 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	235	162	8.4			59.6	50.4	45.5	42.8	30	69.8
13:05	243	162		10.5	11.4	55.6	52.5	46.6	43.6	30	68.4
13:10	244	164	8.2			55.8	53.4	45.2	43.3	30	71.4
13:15	245	166		10.2	11.6	54.4	56.6	44.6	35.5	30	69.8
13:20	246	163	8.2			58.4	52.4	46.4	42.6	30	68.2
13:25	232	162		11.4	12.5	59.6	55.5	46.8	41.4	30	70.4
13:30	236	163	8.4			56.7	52.3	45.6	42.4	30	72.6
13:35	230	162		12.5	13.2	51.2	50.4	47.4	41.5	30	70.5
13:40	231	162	8.2			55.6	49.9	44.4	44.4	30	69.8
13:45	232	159		12.4	13.5	51.2	52.2	45.3	43.3	30	71.2
13:50	234	162	8.2			55.4	51.4	44.2	44.5	30	69.4
13:55	232	159		11.8	12.6	56.4	52.6	46.6	42.3	30	69.7
14:00	230	162	8.4			57.6	52.4	44.4	42.3	31	71.2
14:05	254	160		12.4	12.4	56.3	50.4	43.4	43.4	31	64.6
14:10	255	162	8.6			52.4	50.6	42.2	44.4	31	65.4
14:15	253	161		12.2	11.4	54.4	49.6	46.6	38.9	31	62.6
14:20	251	160	8.6			56.8	52.2	48.4	44.5	30	78.4
14:25	245	159		12.6	11.8	58.7	47.4	46.7	43.2	31	71.1
14:30	243	159	8.4			56.9	48.6	44.6	40.4	30	72.6
14:35	244	162		11.4	11.2	54.2	50.3	46.6	44.4	31	70.5
14:40	232	161	8.2			58.9	52.2	45.5	40.2	30	70.5
14:45	231	160		11.4	11.8	59.6	50.8	43.5	40.2	31	72.4
14:50	232	162	8.2			57.4	51.2	45.5	40.2	30	72.2
14:55	241	161		11.8	13.6	68.6	52.2	46.8	39.6	30	72.5
15:00	241	160	8.2			62.4	50.4	44.4	37.2	31	70.2
เฉลี่ย	**240.93**	**160.74**	**8.33**	**11.86**	**12.21**	**58.84**	**50.80**	**45.24**	**41.00**	**30.57**	**70.65**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข15 ข้อมูลการอบแห้งทะลายปาล์ม ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 600 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	232	162	8.4			50.3	47.8	44.3	40.2	30	71.4
13:05	233	161		10.8	13.2	50.6	43.2	46.4	42.2	30	70.4
13:10	234	160	8.2			56.6	46.8	45.6	40.4	30	72.4
13:15	232	162		11.6	11.6	58.6	48.2	46.4	39.9	30	71.4
13:20	233	162	8.2			50.6	52.3	42.4	39.4	30	72.6
13:25	234	163		12.4	12.6	57.8	50.2	45.6	40.4	30	70.4
13:30	235	161	8.4			50.2	50.6	46.6	41.4	30	71.6
13:35	243	162		12.6	12.6	50.2	50.4	46.8	42.4	30	68.9
13:40	244	160	8.2			50.4	48.8	46.2	45.6	30	69.4
13:45	243	162		12.8	10.9	58.6	50.4	44.3	40.2	30	70.2
13:50	242	162	8.6			50.4	48.9	46.6	40.5	31	72.2
13:55	245	161		12.6	11.9	56.8	45.6	42.2	41.4	31	68.9
14:00	233	162	8.6			58.4	48.9	46.6	45.2	31	71.2
14:05	232	161		13.6	12.8	50.2	46.6	45.5	42.4	30	71.2
14:10	233	162	8.2			59.4	47.8	46.8	40.8	30	72.8
14:15	233	162		13.2	12.8	58.6	46.6	46.6	41.4	30	72.5
14:20	234	160	8.4			56.8	46.8	43.3	42.2	31	65.3
14:25	234	159		13.4	15.2	50.2	48.6	45.5	44.6	31	69.9
14:30	232	158	8.4			58.6	48.7	47.8	42.2	31	65.4
14:35	233	158		13.8	12.5	58.6	46.8	41.8	42.6	31	65.4
14:40	233	159	8.6			58.6	47.8	42.3	42.4	31	69.6
14:45	232	159		12.8	12.6	50.2	48.8	43.5	44.4	30	69.6
14:50	233	158	8.2			50.4	48.5	46.8	38.9	30	69.6
14:55	232	161		11.6	11.4	55.5	48.6	46.6	40.4	30	69.6
15:00	234	160	8.2			52.4	48.6	47.4	42.4	30	69.6
เฉลี่ย	**235.12**	**160.68**	**8.35**	**12.6**	**12.51**	**54.36**	**48.25**	**45.35**	**41.76**	**30.32**	**70.06**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข16 ข้อมูลการอบแห้งขุยมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 300 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
18:00	235	160	8.2			49.8	40.2	31.2	21.5	29	71.2
18:05	237	161		11.4	10.6	50.2	40.4	32.3	22.4	29	72.4
18:10	235	159	8.6			49.8	40.2	30.3	21.6	29	72.4
18:15	238	160		12.4	11.6	50.2	41.5	29.4	21.6	30	68.7
18:20	243	162	8.2			50.4	40.8	28.4	22.6	30	69.5
18:25	235	163		11.8	12.6	50.2	38.8	28.8	22.6	29	69.8
18:30	238	161	8.2			49.9	38.4	29.4	23.2	29	68.9
18:35	235	163		10.6	11.4	48.8	39.4	29.4	25.4	29	69.8
18:40	234	162	8.2			50.5	39.4	29.6	22.4	29	69.2
18:45	248	163		11.4	11.6	52.4	40.2	29.4	24.6	30	72.6
18:50	235	163	8.2			48.3	40.2	28.4	21.5	29	68.9
18:55	248	163		11.4	11.8	49.6	40.2	28.4	23.5	29	71.4
19:00	237	162	8.4			50.2	39.8	28.4	21.5	29	68.8
19:05	232	164		11.8	12.6	50.4	38.8	28.4	25.3	29	69.8
19:10	240	160	8.4			52.3	40.2	28.3	24.6	29	71.4
19:15	232	162		11.9	13.4	50.4	40.2	25.5	23.2	29	72.1
19:20	235	161	8.4			50.4	40.2	28.3	25.3	29	74.4
19:25	237	162		11.2	13.3	49.6	40.2	30.4	21.4	30	71.4
19:30	237	162	8.6			46.8	40.2	29.6	22.1	30	68.4
19:35	237	162		11.2	11.8	48.6	42.4	27.8	19.4	30	69.8
19:40	234	163	8.6			48.9	42.2	29.3	25.4	29	71.4
19:45	235	164		11.4	11.4	48.9	41.6	29.6	20.1	29	65.5
19:50	240	162	8.4			44.8	40.8	28.4	25.4	29	57.4
19:55	231	159		11.6	11.8	49.8	40.8	27.2	24.6	29	57.8
20:00	241	159	8.4			45.6	40.4	27.2	24.6	29	58.9
เฉลี่ย	**237.16**	**161.68**	**8.37**	**11.51**	**11.99**	**49.47**	**40.30**	**28.94**	**23.03**	**29.24**	**68.88**

ตารางที่ ข17 ข้อมูลการอบแห้งขุยมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 480 kg/hr

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	234	162	8.6			51.2	43.5	35.6	30.4	30	71.3
13:05	235	161		11.6	11.8	50.4	42.2	36.4	33.5	30	70.6
13:10	243	162	8.4			49.8	42.4	34.4	31.3	31	72.4
13:15	245	160		11.8	11.2	50.2	42.3	37.5	30.9	30	66.8
13:20	244	159	8.8			52.4	42.4	35.6	31.2	31	66.8
13:25	247	159		11.1	11.4	51.2	41.4	36.6	33.4	30	69.8
13:30	253	160	8.4			54.2	40.3	37.8	30.3	30	71.3
13:35	222	161		12.6	11.3	49.8	42.2	38.5	30.5	31	68.9
13:40	224	159	8.2			48.8	41.2	36.5	38.4	31	69.4
13:45	225	158		11.1	11.4	51.9	40.4	34.4	32.3	31	72.3
13:50	242	161	8.4			52.3	40.1	33.4	36.8	30	70.5
13:55	234	163		11.6	11.1	54.2	40.2	37.5	36.9	31	71.2
14:00	255	163	8.4			50.2	40.2	36.5	30.4	30	68.8
14:05	242	162		11.6	11.6	50.4	41.2	34.4	30.8	31	69.8
14:10	232	161	8.4			49.8	42.4	33.5	35.6	31	73.4
14:15	233	159		11.8	11.8	47.4	41.2	33.3	30.2	30	72.1
14:20	234	161	8.8			47.8	39.8	34.8	30.4	31	73.4
14:25	235	160		11.2	11.1	49.6	38.3	38.6	30.4	30	69.2
14:30	236	159	8.2			48.9	38.3	32.3	31.2	31	71.3
14:35	236	159		11.2	12.6	49.8	36.7	34.5	30.5	31	73.4
14:40	235	152	8.4			52.2	39.2	34.2	38.4	30	69.8
14:45	234	159		11.2	11.1	49.8	39.3	33.4	30.4	31	70.4
14:50	235	159	8.2			49.8	38.4	32.3	38.6	31	71.2
14:55	243	160		10.8	11.6	52.4	37.9	33.1	35.6	31	73.4
15:00	243	162	8.6			51.2	42.4	30.6	35.6	30	71.2
เฉลี่ย	**237.64**	**160.04**	**8.45**	**11.47**	**11.5**	**50.63**	**40.56**	**35.03**	**32.96**	**30.56**	**70.75**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข18 **ข้อมูลการอบแห้งขุยมะพร้าว ที่อุณหภูมิ 160°C ที่อัตราการป้อน 600 kg/hr**

เวลา	อุณหภูมิไอเสีย (°C)	อุณหภูมิเข้าเครื่องอบแห้ง (°C)	ความเร็วในท่อลมร้อน (m/s)	ความเร็วในท่อลมร้อน 2	ความเร็วในท่อลมร้อน 3	ความชื้นจุดที่ 1	ความชื้นจุดที่ 2	ความชื้นจุดที่ 3	ความชื้นจุดที่ 4	อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	กระแสไฟรวม (A)
13:00	233	162	8.4			50.2	44.3	40.3	38.2	30	70.2
13:05	234	163		10.8	10.8	50.4	46.4	46.4	41.6	30	71.5
13:10	235	162	8.2			52.4	45.6	45.6	41.8	30	70.4
13:15	243	162		11.6	12.5	50.6	46.4	46.4	42.6	30	70.2
13:20	244	162	8.6			52.6	42.4	42.4	38.4	30	69.8
13:25	242	162		12.4	12.2	51.4	45.6	45.6	41.6	30	65.6
13:30	243	160	8.6			52.2	46.6	46.6	35.5	30	71.5
13:35	245	159		12.6	14.2	51.2	46.8	46.8	42.2	30	70.8
13:40	243	160	8.2			52.6	46.2	46.2	40.6	31	71.2
13:45	243	162		12.8	14.2	52.2	44.3	44.3	35.5	31	72.5
13:50	243	161	8.2			50.2	46.6	46.6	41.6	30	74.5
13:55	245	161		12.6	10.2	50.2	42.2	42.2	40.4	30	71.6
14:00	244	160	8.2			51.1	46.6	40.1	35.5	31	71.2
14:05	243	159		13.6	12.8	50.2	45.5	41.3	35.8	31	71.2
14:10	242	161	8.2			59.2	46.8	41.3	38.4	30	70.2
14:15	232	162		13.2	12.8	49.2	46.6	41.8	40.2	31	72.2
14:20	231	162	8.6			52.1	43.3	43.3	36.4	31	71.2
14:25	233	162		12.4	12.4	54.2	45.5	45.5	41.6	30	68.8
14:30	234	161	8.4			52.4	47.8	41.4	36.2	31	65.4
14:35	232	159		11.8	11.5	56.3	41.8	41.8	36.4	31	65.5
14:40	231	160	8.6			51.9	42.3	42.3	41.6	31	73.4
14:45	243	159		13.2	15.2	52.3	43.5	43.5	42.3	30	72.2
14:50	232	161	9.1			50.2	46.8	44.4	35.6	31	70.4
14:55	233	161		12.6	12.1	48.5	46.6	40.8	36.6	31	71.2
15:00	238	160	8.2			47.9	47.4	40.6	39.5	31	70.2
เฉลี่ย	**238.44**	**160.92**	**8.42**	**12.47**	**12.58**	**51.67**	**45.36**	**43.50**	**39.04**	**30.48**	**70.52**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ธนธัช มุขขันธ์, กฤษกร รับสมบัติ, สุภัทร หนูแย้ม และวีรชัย อาจหาญ. 2555. **การประเมินประสิทธิภาพ ของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งชีวมวล.** การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. 4-5 เมษายน 2555 ณ โรงแรมอิมพิเรียลแม่ปิง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ โดยภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งชีวมวล

Performance Evaluation of Flash dryer for Biomass drying process

ธนรัช มุขขันธ์[1], กฤษกร รับสมบัติ[1] สุภัทร หนูแย้ม[1] และ วีรชัย อาจหาญ[2]*

[1]นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000
[2]อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000
* ติดต่อ: Email: arjharh@g.sut.ac.th, โทรศัพท์: 044 225 007, โทรสาร: 044 225 046

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเปลือกยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการการอบแห้งแบบพาหะลม การศึกษาจะทำโดยการทดลองอบแห้งเปลือกยูคาลิปตัสที่อัตราการป้อนที่ 300 ,480 และ 600 kg/hr ด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไอน้ำ ที่อัตราการไหลอากาศร้อน 0.43 m^3/s อุณหภูมิอากาศร้อน 130 °C และ 160 °C ประเมินประสิทธิภาพจาก ความชื้นสุดท้ายของเปลือกยูคาลิปตัส และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีผลต่ออัตราการอบแห้งโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส คือ 130 °C ที่อัตราการป้อนที่ 300 kg/hr เนื่องจากสามารถทำให้ความชื้นสุดท้ายเหมาะสมสำหรับกระบวนการอัดเม็ด และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) = 4.35 MJ/kg_{water} และมีอัตราการระเหยน้ำเฉลี่ย 79.33 kg/hr

คำหลัก: วัสดุชีวมวล, เครื่องอบแห้ง, เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

Abstract

The objective of this research was to determine the optimum conditions of Eucalyptus bark drying with flash dryer. The experiment was performed by Eucalyptus bark drying at feed rate of 300, 400 and 600 kg/hr in a prototype dryer using waste heat from boiler. The 0.43 m^3/s of hot air flow rate and different drying air temperatures of 130°C and 160°C were set as drying conditions. Physical appearances, drying characteristics, final moisture content and specific energy consumption (SEC) were determined to evaluate the Eucalyptus bark drying. The results showed that the most suitable temperature and Eucalyptus bark feed rate was 130°C and 300 kg/hr, respectively. Which, at this condition can make final moisture content of Eucalyptus bark is appropriate the pelletizing and it gave the drying rate and specific energy consumption of 79.33 kg/hr and 4.35 MJ/kg_{water} , respectively.

Keywords: Biomass, dryer, flash dryer

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2565 จังหวัดเชียงใหม่

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือชีวมวล มาใช้เป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย เช่น แกลบ กะลาปาล์ม ชานอ้อย ฯลฯ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการผลิต ในภาคอุตสาหกรรม [1] อย่างไรก็ตามยังมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ ที่ยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ เช่น เปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือจากโรงงานสับไม้ ทลายปาล์มที่เหลือจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม และขุยมะพร้าวที่เหลือจากอุตสาหกรรมแปรรูปมะพร้าว ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุเหลือใช้ดังกล่าวยังมีสมบัติไม่พร้อมใช้ คือ ความชื้นสูง ขนาดไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ความหนาแน่นต่ำจำเป็นต้องมีกระบวนการแปรรูปให้มีสมบัติที่เหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่พร้อมใช้งานได้ [2]

การอบแห้งหรือการลดความชื้นเป็นกระบวนการหนึ่งในการแปรรูปเชื้อเพลิงที่สำคัญ ที่จะทำให้วัสดุชีวมวลมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องอบแห้งวัสดุชีวมวล มีหลายประเภท การเลือกใช้เครื่องอบแห้งจำเป็นต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของวัสดุชีวมวล ตัวอย่าง เช่น ขนาด น้ำหนัก ที่มีลักษณะเป็น ผง เส้นใย ท่อน เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกเครื่องอบแห้งและวิธีการอบแห้งให้เหมาะสม

การอบแห้งแบบพาหะลมเป็นวิธีการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบโดยวิธีอื่น และเหมาะสมกับ วัสดุที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา หรือความหนาแน่นต่ำ สามารถลอยตัวในอากาศได้ ดังนั้น เมื่อพิจารณาเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทะลายปาล์ม (ผ่านการสับย่อยแล้ว) และขุยมะพร้าว ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใย จะเหมาะสมกับการอบแห้งแบบพาหะลมมากที่สุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม โดยใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 0.5 ตัน$_{ไอน้ำ}$/ชั่วโมง โดยทำการสับเปลือกไม้ยูคาลิปตัสด้วยเครื่องสับย่อยพร้อมกับลำเลียงวัสดุด้วยลมร้อนและทำการอบแห้งแบบพาหะลมหลังจากนั้นทำการบดย่อยละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องย่อยละเอียด เพื่อนำมาวิเคราะห์หาสมรรถนะในการอบแห้งการใช้พลังงานรวมถึงต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วิธีการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม ซึ่งใช้แหล่งความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องกำเนิดไอน้ำขนาด 0.5 ตัน$_{ไอน้ำ}$ / ชั่วโมง โดยทำการกำหนดสภาวะการทดสอบอบแห้งเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ดังนี้ คือ อัตราการไหลอากาศ 0.43 m^3/s อุณหภูมิในการอบแห้ง 130 และ 160 °C อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 300 480 และ 600 kg/hr โดยจะทำการเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้นที่จุดต่างๆในระหว่างการอบแห้ง วัดค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งทั้งพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้ผังกระบวนการอบแห้ง แสดงไว้ใน**รูปที่ 1** จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อประเมินสมรรถนะการอบแห้ง โดยพิจารณาจากค่าอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) โดยคิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง มีหน่วยเป็น kg/hr ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$DR = \frac{m_{pi} - m_{pf}}{t} \qquad (1)$$

เมื่อ m_{pi} คือ น้ำหนักวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)

m_{pf} คือ น้ำหนักวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

t คือ เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

จุดที่ 1,2,3และ4 คือตำแหน่งเก็บตัวอย่างเพื่อหาความชื้นของวัสดุชีวมวลที่ผ่านการอบแห้ง

รูปที่ 1 กระบวนการอบแห้งเปลือกยูคาลิปตัสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลม

ก่อน (M_w=50%)

หลัง(M_w=30%)

รูปที่ 2 ลักษณะเปลือกไม้ยูคาลิปตัสก่อนและหลังกระบวนการอบแห้งแบบพาหะลม

การประเมินค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งประเมินได้จากวัดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption;SEC) คือค่าพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำระเหย มีหน่วยเป็น MJ/kg_{water} ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) [3]

SEC = พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง / ปริมาณน้ำระเหย

= (พลังงานจากระบบไฟฟ้า + พลังงานความร้อนปล่องไอเสีย) / ปริมาณน้ำระเหย

$$= (3.6Pe)+ (m_{ex}Cp_{ex}T)/\text{ปริมาณน้ำระเหย} \quad (2)$$

เมื่อ Pe คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)

Cp_{ex} คือ ความจุความร้อนของไอเสีย(kJ/kg °C) เท่ากับ 1.12 kJ/kg°C

2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีวมวล(Biomass Chipper)

เครื่องสับ/ย่อยเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบจะใช้เครื่องสับย่อยแบบทรงกระบอกมีใบมีดสับ 6 ใบ ดังแสดงไว้ใน **รูปที่ 3** พิกัดข้อกำหนดของเครื่องจักรแสดงไว้ใน**ตารางที่ 1**

ตารางที่ 1 พิกัดข้อกำหนดของเครื่องสับ/ย่อยวัสดุชีวมวล (Biomass Chipper)

พารามิเตอร์	ข้อมูล/ข้อกำหนด
ขนาดเครื่อง	660 mm. x 640 mm. x 1800 mm.
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 30 แรงม้า
ความเร็วรอบ	900 rpm
กำลังการผลิต	1.4 ton/hr

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่

รูปที่ 3เครื่องสับ/ย่อยวัสดุชีวมวล (Biomass chipper)

รูปที่ 4 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Flash Dryer)

เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Flash Dryer)

เครื่องอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบพาหะลม (Flash Dryer) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นเครื่องอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาโดย ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีถังอบแห้ง 2 ถังลำเลียงวัสดุไปพร้อมกันกับลมร้อนโดยใช้โบลว์เวอร์ ดังแสดงไว้ใน **รูปที่ 4** ทั้งนี้พิกัดและข้อกำหนดของเครื่องอบแห้งต้นแบบแสดงไว้ใน **ตารางที่ 2**

ตารางที่ 2 พิกัดข้อกำหนดของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมต้นแบบ

พารามิเตอร์	**พิกัดข้อกำหนด**
ห้องอบ	ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m. สูง 4.6 m.
อัตราไหลของอากาศ	0.43 m^3/s
แหล่งความร้อน	ไอเสียจากเครื่องผลิตไอน้ำ

เครื่องบดละเอียด (Hammer mill)

เครื่องบดละเอียดที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องบดละเอียดแบบแฮมเมอร์มิล(Hammer mill) ดังแสดงไว้ใน **รูปที่ 5** มีพิกัดข้อกำหนดของเครื่องแสดงใน**ตารางที่ 3**

อุณหภูมิ 130 °C มีค่าน้อยกว่าคาพลังงานจำเพาะใน

ตารางที่ 3 พิกัดข้อกำหนดของเครื่องบดละเอียด (Hammer mill)

พารามิเตอร์	**พิกัดข้อกำหนด**
ขนาดเครื่อง	660 mm. x 640mm. x 800 mm.
ต้นกำลัง	มอเตอร์ไฟฟ้า 40 hp
ความเร็วรอบ	2000 - 2400 rpm
ลักษณะชุดใบมีด	ชุดใบมีด 4 แถว เส้นผ่านศูนย์กลาง 500 mm.

รูปที่ 5 เครื่องบดละเอียด (Hammer mill)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

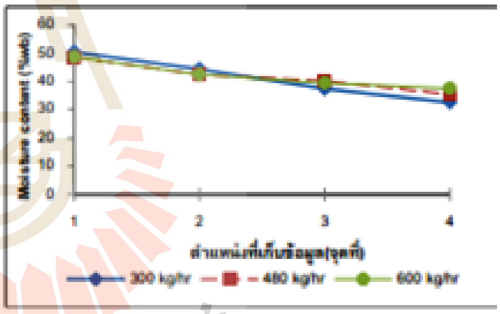
ผลจากการทดสอบอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ค่าค่าอุณหภูมิที่ 130 °C และ 160 °C ที่อัตราการป้อนที่ 300 480 600 kg/hr พบว่าพฤติกรรมการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีลักษณะดังแสดงใน **รูปที่ 6** และ **รูปที่ 7** จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าอัตราการป้อนเปลือกไม้ยูคาลิปตัสมีผลต่อความชื้นคงเหลือของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยที่อัตราการป้อนที่ต่ำกว่าจะสามารถระเหยน้ำออกจากเปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้มากกว่า หรือสัดส่วนของปริมาณความร้อนต่อปริมาณเชื้อเพลิงสูงๆ สามารถระเหยน้ำได้ดีกว่า อย่างไรก็ดีการป้อนเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ในอัตราที่ต่ำๆ ทำให้ capacity ของระบบการอบแห้งต่ำลงไปด้วย จำเป็นต้องทำการพิจารณาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น อัตราการอบแห้ง แสดงไว้ใน **ตารางที่ 4 และตารางที่ 5**

3.2 อัตราการอบแห้ง

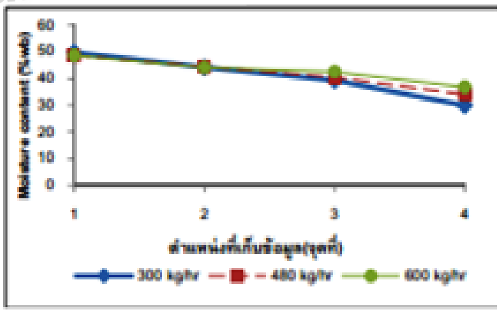
จาก**ตารางที่ 4** และ**ตารางที่ 5** จะเห็นว่าอัตราการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิบตัสที่อัตราการป้อนที่สูงกว่าจะมีอัตราการอบแห้งที่ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากลมร้อนที่ใช้ยังมีความสามารถในการดูดซับความชื้น (Air moisture holding capacity)ของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสได้อีก หรือยังไม่ถึงจุดอิ่มตัวด้วยความชื้น อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาความชื้นสุดท้ายของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่า ยังมีค่าค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการอบแห้งสั้นเกินไป อาจต้องพิจารณาทำการสร้างถังอบเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิการอบแห้งที่สูงกว่า มีอัตราการอบแห้งที่ดีกว่าทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของลมร้อนในการดูดซับความชื้น (Air moisture holding capacity) ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

3.3 พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

จาก**ตารางที่ 4** และ**ตารางที่ 5** จะเห็นว่าค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130 °C มีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งมีแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับการประเมินอัตราการอบแห้งดังนั้นแสดงให้เห็นว่า แม้ว่าจะทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าแต่เมื่อพิจารณา พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งพบว่ามีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบที่อัตราการป้อนเท่ากัน จึงสรุปได้ว่า การอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม สามารถใช้ลมร้อนจากปล่องไอเสียของหม้อต้มไอน้ำได้ทุกช่วงของภาระของต้มไอน้ำ (เฉลี่ย ลมร้อนของปล่องไอเสียอยู่ระหว่าง 150 – 180 °C) ทั้งนี้เมื่อพิจารณา อัตราการป้อนเปลือกไม้ยูคาลิปตัส เป็นองค์ประกอบพบว่า สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนสัมพันธ์กับสมบัติของลมร้อนในด้านการดูดซับความชื้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับตำแหน่งที่เก็บข้อมูล (จุดที่) ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 °C



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับตำแหน่งที่เก็บข้อมูล (จุดที่) ของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 160 °C

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13
4-5 เมษายน 2565 จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 4 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 130 °C

รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)		
	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (%wb)	50.40	48.50	48.64
ความชื้นหลังอบ (%wb)	32.57	35.44	37.54
DR(kg/hr)	79.33	97.11	106.63
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	165.45	157.10	157.49
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(kWh)	49.81	49.97	50.27
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	179.32	179.89	180.96
SEC (MJ/kg$_{water}$)	4.35	3.47	3.17

ตารางที่ 5 ผลการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่อุณหภูมิ 160 °C

รายการ	อัตราการป้อน(kg/hr)		
	300	480	600
ความชื้นก่อนอบ (%wb)	49.78	48.68	48.69
ความชื้นหลังอบ (%wb)	29.98	34.04	36.80
DR (kg/hr)	84.83	106.54	112.88
พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	210.73	203.76	207.94
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(kWh)	48.41	48.70	51.17
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง(MJ)	174.28	175.33	184.21
SEC (MJ/kg$_{water}$)	4.53	3.56	3.37

3.4 การวิเคราะห์ต้นทุนเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้ง

จากตารางวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่าเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งมีต้นทุนตันละ 701.88 บาทที่ค่าความร้อน 3,009.68 Kcal/kg สามารถวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเทียบกับหน่วยพลังงานคือ 0.23 บาท/Mcal

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสด

ลำดับที่	รายการ	ราคาต่อตัน
1	วัตถุดิบ	200.00
2	พลังงานในการอบแห้ง	
	- ไฟฟ้า	251.34
	- ความร้อน	0.00
3	ค่าแรงงาน	50.00
	รวมต้นทุน	501.34

จากตารางวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปเปลือกไม้ยูคาลิปตัสพบว่ามีต้นทุนในการแปรรูป 501.34 บาท/ตันสด ซึ่งผลจากการแปรรูปจะได้เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ความชื้น 30%wb จำนวน 714.28 กิโลกรัม ดังนั้น ต้นทุนการผลิตเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งที่ความชื้น 30%wb คือ 701.88บาทต่อตัน เมื่อพิจารณาค่าความร้อนของเปลือกไม้ยูคาลิปตัสอบแห้งดังกล่าวมีค่าความร้อน 3009.68 kcal/kg(12.34 MJ/kg)เมื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนการแปรรูปพร้อมใช้(ASFINE) มีค่า 0.23บาท/Mcal ต่ำกว่าการใช้ถ่านหิน ซึ่งมีค่า ASFINE อยู่ที่ 0.55บาท/Mcal

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

1) อัตราการป้อนเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งสัมพันธ์กันกับสัดส่วนปริมาณลมร้อนและปริมาณของเปลือกไม้ยูคาลิปตัส ทั้งนี้สัดส่วนปริมาณลมร้อน และปริมาณเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสมบัติของอากาศร้อนในการดูดซับความชื้น (Air moisture holding capacity)

2) จากการวิเคราะห์ต้นทุนการอบแห้งเปลือกไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม โดยใช้แหล่งความร้อนจากปล่องไอเสียของหม้อต้มไอน้ำสามารถผลิตเชื้อเพลิงที่มีราคาไม่สูงมากสามารถนำมาใช้ทดแทนถ่านหินหรือเชื้อเพลิงชีวมวลเชิงพาณิชย์ได้ โดยมีค่าต้นทุนการแปรรูปอยู่ที่ 0.23 บาท/Mcal ต่ำกว่าต้นทุนการใช้ถ่านหิน ซึ่งมีค่า 0.55 บาท/Mcal

5. เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล.(2549). ชีวมวล. บริษัท ดิว พริ้นท์ แมเนจเม้นท์ จำกัด.กรุงเทพฯ.

[2] วีรชัย อาจหาญ และคณะ. (2554). การเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับใช้ เป็นพลังงานทดแทนในโรงงานอุตสาหกรรม. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สนับสนุนงบประมาณวิจัยโดยสำนักนโยบายแผนและพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

[3] สุภัทร หนูแย้ม (2551). การศึกษาการใช้ประโยชน์จากความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในการอบแห้งเชื้อเพลิงชีวมวล.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นายธนธัช มุขขันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2525 ที่อำเภอกันทรารมย์ จังหวัดศรีสะเกษ เป็นบุตรของนายคำมี มุขขันธ์ และนางบุญทัน มุขขันธ์ จบการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียนกันทรารมย์ อำเภอกันทรารมย์ จังหวัดศรีสะเกษ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2551

ในปี พ.ศ. 2553 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับทุนจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาและทำงานในตำแหน่งวิศวกรประจำศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยในระหว่างที่ทำการศึกษาได้เสนอบทความเข้าร่วมประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ประจำปี พ.ศ. 2555 เรื่อง “การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมในกระบวนการอบแห้งชีวมวล”

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี