



การพัฒนาเครื่องอบหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล
Development of a Solar and Biomass Hybrid Dryer for Betel Nuts

มนตรี เรืองประดับ
Montri Ruangpradap

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาเครื่องอบหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล
ผู้เขียน นายมนตรี เรืองประดับ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์)

.....ประธานกรรมการ
(ดร.ฐานันท์ศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์)

.....
(รองศาสตราจารย์ปัญญาธิกร งามศรีตระกูล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปัญญาธิกร งามศรีตระกูล)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทกานต์ ทวีกุล)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ จิระรัตนานนท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องอบหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล
ผู้เขียน	นายมนตรี เรืองประดับ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งผลหมากที่ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เพื่อลดการใช้พลังงาน และระยะเวลาในการอบ โดยทั่วไปกระบวนการอบหมากจะแบ่งเป็นสองขั้นตอน คือ การอบแห้งผลหมาก และการอบแห้งเมล็ดหมาก การอบแห้งผลหมากมีความจำเป็นเพื่อความสะดวกในการแยกเมล็ดหมากออกจากเปลือกหมาก ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองเบื้องต้นและพบว่า อุณหภูมิและความเร็วอากาศที่ดีที่สุดคือ 70°C และ 1 m/s ตามลำดับ หลังจากนั้น ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งสำหรับอบหมากขนาดความจุ 40 กก. และได้ทดลองอบหมาก 3 แบบ คือ ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลเท่ากับ 54, 29 และ 40 ชั่วโมงตามลำดับ พลังงานจำเพาะสำหรับการอบแห้งมีค่า 46.5, 111.6 และ 100 MJ/kg ตามลำดับ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบหมากมีค่า 12%, 5% และ 6.8% ตามลำดับ นอกจากนี้ คุณภาพของหมากอบแห้งด้วยวิธีการทั้ง 3 แบบผ่านมาตรฐานตาม มผช. 1060/2548

Thesis Title Development of a Solar and Biomass Hybrid Dryer for
Betel Nuts

Author Mr. Montri Ruangpradap

Major Program Mechanical Engineering

Academic Year 2010

ABSTRACT

The objective of this research is to develop a solar-biomass hybrid dryer for betel nuts. The dryer is intended for energy saving and shortening the drying time. The drying of betel nuts is generally divided into 2 phases, i.e. whole fruit drying and kernel drying. The former is necessary for separating the kernel from the fruit shell. A preliminary testing was carried out and the optimum drying temperature and air velocity were determined to be 70°C and 1 m/s respectively. A pilot testing dryer with 40 kg capacity were designed and fabricated. Three drying modes; solar only, biomass only, and solar-biomass hybrid, were investigated for the drying performance. The results showed that the drying time for solar only, biomass only, and solar-biomass hybrid modes are 54, 29 and 40 hours respectively. The specific energy consumptions are 46.5, 111.6, and 100 MJ/kg dried betel nuts respectively. The thermal efficiencies of the dryer at each drying mode are 12%, 5%, and 6.8% respectively. The quality of the dried betel nuts were also investigated and found to meet the standard of SPC 1060/2548.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชูเกียรติ คุปตานนท์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ปัญญาธิกร งามศรีตระกูล และ ผศ.ดร.จันทกานต์ ทวีกุล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และช่วยแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคอยติดตามความก้าวหน้าของงาน ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ดร.ฐานันต์ศักดิ์ เทพญา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ จิระรัตนานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากสาขาวิชาพลังงานประจำบัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม (JGSEE) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิจัย และได้ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบ ประเมินผลงานวิจัย พร้อมทั้งให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ รวมทั้งทุนเพื่อวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้โอกาสและสนับสนุนเงินทุนการวิจัยในโครงการนี้ ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณต่อ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆที่มีส่วนช่วยในการทำวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

มนตรี เรืองประดับ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(15)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำตั้งเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 การตรวจเอกสาร	5
1.6 สรุป	9
2 ทฤษฎี	11
2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง	11
2.2 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	16
2.3 ทฤษฎีแผ่รังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ	19
2.4 ทฤษฎีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	20
2.5 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	22
2.6 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหมาก	23
2.7 สรุป	25
3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	26
3.1 การศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก	26
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง	33
3.3 การทดลองเครื่องอบแห้ง	34
3.4 การทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง	47
	(6)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 เครื่องมือการวิจัย	48
3.6 สรุป	48
4 การออกแบบระบบอบแห้ง	49
4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของหมาก	49
4.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง	54
4.3 การออกแบบและสร้างแหล่งความร้อนเสริม	61
4.4 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง	67
4.5 สรุป	68
5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	69
5.1 ผลการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	69
5.2 ผลการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	76
5.3 ผลการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	82
5.4 ผลการทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง	97
5.5 สรุป	101
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	102
6.1 บทสรุป	102
6.2 ข้อเสนอแนะ	103
บรรณานุกรม	104
ภาคผนวก	107
ประวัติผู้เขียน	184

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกหมากสด/หมากแห้ง	1
1.2 แหล่งเพาะปลูกหมาก 10 อันดับแรกของไทย	2
3.1 การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งหมาก	31
5.1 ข้อมูลการทดลองอบแห้งหมากด้วยเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ และเครื่องอบแห้งพลังร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	91
5.2 ค่า Water activity ความชื้นสุดท้าย และปริมาณจุลินทรีย์ของเมล็ดหมากแห้ง ที่อบแห้ง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ	97
5.3 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของเมล็ดหมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และที่ผลิตโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ	100
1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน	112
ค 1 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	119
ค 2 ข้อมูลความชื้นของผลหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	120
ค 3 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	121
ค 3 (ต่อ) ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	122
ค 4 ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	123
ค 4 (ต่อ) ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	124
ค 5 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	125

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ค 6 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลอง อบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	126
ค 7 ข้อมูลความชื้นของผลหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆ ของการ ทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	127
ค 8 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลอง อบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	128
ค 9 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลอง อบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	129
ค 10 ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆ ของการ ทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	130
ค 11 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์)	131
ค 12 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)	132
ค 13 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)	132
ค 14 ข้อมูลความชื้นของผลหมากในภาชนะตัวอย่าง ของการทดลองอบแห้ง ผลหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	133
ค 15 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์)	134
ค 16 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)	135
ค 17 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)	136
ค 18 ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลอง อบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	137

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ฟิสิกส์อากาศรอบผลิตภัณฑ์	13
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง	14
2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุ	16
2.4 แสดงการแบ่งประเภทเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์	18
2.5 Temperature profiles สำหรับการไหลแบบสวนทาง ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	21
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	27
3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ	28
3.3 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ	29
3.4 ขั้นตอนการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ	32
3.5 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	36
3.6 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด การทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์อย่างเดียว	37
3.7 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	37
3.8 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานจากชีวมวลอย่างเดียว	40
3.9 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด การทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	41
3.10 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	41
3.11 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	45
3.12 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัด การทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	46
3.13 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	46
4.1 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งผลหมากที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.2 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดหมากที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C	51
4.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของการอบแห้งหมาก (ผลหมากและเมล็ดหมาก) ที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C	52
4.4 เวลารวมของการอบแห้งหมาก (ผลหมากและเมล็ดหมาก) ที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C	53
4.5 ลักษณะห้องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย	59
4.6 ลักษณะแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย	61
4.7 ลักษณะท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell and tube ที่ใช้ในงานวิจัย	62
4.8 ลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย	64
4.9 ลักษณะของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย	67
5.1 ผลของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ของการอบแห้งผลหมาก วันที่ 9 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 518.2 W/m ² และวันที่ 10 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 491.4 W/m ²	70
5.2 ผลของอุณหภูมิอากาศของการทดลองอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552	70
5.3 ผลการลดลงของความชื้นของการอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552	72
5.4 ผลของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของการอบแห้งเมล็ดหมาก วันที่ 11 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 482 W/m ² วันที่ 12 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 548.2 W/m ² วันที่ 13 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 538.9 W/m ² และวันที่ 14 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 540 W/m ²	73
5.5 ผลของอุณหภูมิอากาศ ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 11-14 มิถุนายน 2552	74
5.6 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 11-14 มิถุนายน 2552	76
5.7 ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็น ไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	77

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.8 ผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	78
5.9 ผลการลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	79
5.10 ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อน และอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	80
5.11 ผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	81
5.12 ผลการลดลงของความชื้นในการอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว	82
5.13 ผลของอุณหภูมิอากาศและความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ของการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล วันที่ 2 มีนาคม 2552	83
5.14 ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	84
5.15 ผลของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	85
5.16 ผลการลดลงของความชื้นของการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	86
5.17 ผลของอุณหภูมิอากาศ และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์)	87
5.18 อุณหภูมิของก๊าซร้อน และอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	88
5.19 ผลของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)	89
5.20 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	90

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
5.21 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลเพียงอย่างเดียว ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ	93
5.22 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดหมากในการอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ	95
5.23 เปรียบเทียบสีของหมากแห้งบดละเอียด ที่ผ่านการอบแห้งแบบต่างๆ	101
5.24 เปรียบเทียบสีของเมล็ดหมากแห้ง ที่ผ่านการอบแห้งแบบต่างๆ	101
ข 1 เครื่องวัดสีที่ชื่อ Hunter Lab	117
จ 1 ชุดอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	165
จ 2 ชุดอุปกรณ์ของห้องอบแห้ง	166
จ 3 รายละเอียดของโครงสร้างเครื่องอบแห้ง	167
จ 4 รายละเอียดของ CHIMNEY และ TRAY	168
จ 5 รายละเอียดของสอปเปอร์ด้านอากาศออกจากห้องอบแห้ง	169
จ 6 รายละเอียดของสอปเปอร์ด้านอากาศเข้าห้องอบแห้ง	170
จ 7 ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวล	171
จ 8 รายละเอียดของปล่องระบายควันและท่ออากาศ	172
จ 9 รายละเอียดของ TUBE	173
จ 10 รายละเอียดของ SHEEL และเตาเผาชีวมวล	174
จ 11 ส่วนประกอบของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์	175
จ 12 รายละเอียดของ โครงสร้างรองรับแผงรับรังสีดวงอาทิตย์	176
จ 13 รายละเอียดของท่อรวมอากาศของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์	177
ฉ 1 แสดงภาพถ่ายผลหมากพันธุ์ผลกลมรีอายุ 8-9 เดือนที่ใช้ในงานวิจัย	179
ฉ 2 แสดงภาพถ่ายผลหมากผ่าซีกที่บรรจุในห้องอบแห้งขณะทำการทดลอง	179
ฉ 3 แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว	180
ฉ 4 แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานจากชีวมวลอย่างเดียว	180

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ฉ 5 แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	181
ฉ 6 แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล	181
ฉ 7 แสดงภาพถ่ายผลหมากที่ผ่านการอบแห้ง ความชื้นประมาณ 48-49 %(wb)	182
ฉ 8 แสดงภาพถ่ายขณะแกะเมล็ดหมากออกจากเปลือก เพื่อเตรียมอบแห้งในขั้นต่อไป	182
ฉ 9 แสดงภาพถ่ายขณะอบแห้งเมล็ดหมาก	183
ฉ 10 แสดงภาพถ่ายเมล็ดหมากที่ผ่านการอบแห้ง ความชื้นสุดท้าย 12 %(wb)	183

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ϵ	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (%)
η	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (%)
η_c	ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (%)
η_{solar}	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (%)
$\eta_{biomass}$	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานชีวมวล (%)
η_{all}	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (%)
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ΔT_m	อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยของของไหลทั้งสองเชิงลอค ($^{\circ}\text{C}$)
A	พื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน (m^2)
A_c	พื้นที่แผงรับรังสีดวงแสงอาทิตย์ (m^2)
A_{th}	ค่าการใช้อากาศทางทฤษฎี ($\text{kg-air}/\text{kg-fuel}$)
a^*	ค่าบ่งบอกความเป็นสีเขียวและสีแดง ค่า (+) เป็นสีแดง ค่า (-) เป็นสีเขียว
b^*	ค่าบ่งบอกความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน ค่า (+) สีเหลือง ค่า (-) เป็นสีน้ำเงิน
C_p	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
C_h	ความร้อนจำเพาะของของไหลร้อน ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
$C_{p,fb}$	ความร้อนจำเพาะของเปลือกหุ้มที่ความดันคงที่ ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
$C_{p,sb}$	ความร้อนจำเพาะของเมล็ดที่ความดันคงที่ ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
$C_{p,w}$	ความร้อนจำเพาะของน้ำที่ความดันคงที่ ($\text{kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)
E_c	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)
E_m	การใช้พลังงานจำเพาะ ($\text{MJ}/\text{kg H}_2\text{O evap.}$)
G_t	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (W/m^2)
H	ร้อยละของไฮโดรเจน (%)
HHV	ค่าความร้อนสูง หรือ Higher Heating Value (kJ/kg)
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
L	ความยาวท่อ (m)
L^*	ค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 ค่า 0 เป็นสีมืดที่สุด ค่า 100 สีสว่างมากที่สุด

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

LHV	ค่าความร้อนต่ำ หรือ Lower Heating Value (kJ/kg)
\dot{M}_{gf}	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่เกิดจากเชื้อเพลิง (kg/h)
\dot{M}_{gt}	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อน (kg/h)
M_i	ความชื้นหมากก่อนอบแห้ง (%wb)
M_f	ความชื้นหมากหลังอบแห้ง (%wb)
MC	ร้อยละของความชื้น (%wb)
\dot{m}_a	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
m_f	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
\dot{m}_h	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลร้อน (kg/s)
m_w	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
m_{tw}	ปริมาณรวมของน้ำในหมาก (kg)
m_{fb}	ปริมาณของเปลือกหมาก (kg)
m_{sb}	ปริมาณของเมล็ดหมาก (kg)
n	จำนวนท่อ
Q	ความร้อนที่ถ่ายเท (W)
Q_m	ความร้อนรวมที่ให้แก่วัตถุติดอบแห้ง (kJ)
Q_u	ความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงที่สภาวะสม่ำเสมอ (W)
$Q_{l,w}$	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ)
$Q_{s,w}$	ความร้อนสัมผัสที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำ (kJ)
$Q_{s,fb}$	ความร้อนสัมผัสที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิเปลือกหมาก (kJ)
$Q_{s,sb}$	ความร้อนสัมผัสที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดหมาก (kJ)
q_f	ความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)
T_1	อุณหภูมิที่สภาวะเริ่มต้นของหมาก (°C)
T_2	อุณหภูมิที่สภาวะสุดท้ายของหมาก (°C)
T_o	อุณหภูมิอากาศที่ทางออกของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)
T_i	อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)
T_{hi}	อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

T_{ho}	อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ci}	อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
T_{co}	อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
V	ค่าความเร็วของอากาศร้อน (m/s)
W_f	ปริมาณหมากหลังการอบแห้ง (kg)
W_i	ปริมาณหมากก่อนอบแห้ง (kg)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำคั้นเรื่อง

หมากมีชื่อภาษาอังกฤษว่า Betel nut มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Areca catechu Linn. เป็นพืชที่เกี่ยวข้องกับวัฒนธรรม ประเพณีพื้นบ้านของไทยมาเป็นระยะเวลายาวนาน ในอดีตคนไทยมักนิยมรับประทานหมาก แต่ในปัจจุบันความนิยมได้ลดน้อยลงไป หมากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน ได้แก่ ด้านประเพณีวัฒนธรรม เช่น การใช้ประกอบในพิธีไหว้ครูและบายศรีสู่ขวัญ ด้านอุตสาหกรรม เช่น หมากแห้งใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง ฟอกเส้นใย ใช้ทำสีต่างๆ ใช้ย้อมแหและอวนทำให้มีสีและมีการอ่อนตัว ด้านเภสัชกรรมใช้สกัดทำยารักษาโรคต่างๆ เช่น ยาสมานแผล ยาแก้ท้องเดิน ท้องเสีย ยาขับปัสสาวะ และยาแก้ปากเปื่อย เป็นต้น ประเทศไทยมีการส่งออกหมากทั้งในรูปแบบหมากสดและหมากแห้ง คิดเป็นมูลค่าหลายร้อยล้านบาทต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 1.1 (กรมส่งเสริมการเกษตร 2549) ดังนั้นหมากจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่น่าสนใจ

ตารางที่ 1.1 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกหมากสด/หมากแห้ง

ปี พ.ศ.	2542	2543	2544	2545	2546	2547	2548
ปริมาณ (ตัน)	3,114	23,963	21,390	27,647	25,692	395,396	21,548
มูลค่า (ล้านบาท)	313	709	419	466	569	792	510

(ที่มา: กรมส่งเสริมการเกษตร 2549)

หมากเป็นพืชที่ปลูกง่าย การดูแลรักษาไม่ยุ่งยาก โรคแมลงรบกวนน้อย การลงทุนไม่สูง ทำรายได้สม่ำเสมอ สามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อนชื้นและเขตอบอุ่น ดังนั้นแหล่งเพาะปลูกในประเทศไทยจะอยู่ในภาคใต้และภาคกลาง จังหวัดที่มีการปลูกมาก 10 อันดับแรก คือ ชุมพร นครศรีธรรมราช ระนอง ฉะเชิงเทรา พัทลุง ตรัง พังงา ระยอง นครปฐม และสุราษฎร์ธานี ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1.2 (กรมส่งเสริมการเกษตร 2549) การเก็บเกี่ยวหมากมีสองระยะคือหมากปี (หมากที่ออกผลผลิตตรงฤดูกาล) ผลผลิตเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนพฤษภาคม-ตุลาคม โดยจะมีผลผลิตมากในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม ซึ่งทำให้ช่วงนี้หมากมีราคาตกต่ำ หมากทะวาย (หมากที่ออกผลผลิตไม่ตรงฤดูกาล) เริ่มเก็บผลผลิตช่วงเดือน กุมภาพันธ์-พฤษภาคม ซึ่งได้ราคาสูงกว่าหมากปี เพราะจำนวนผลผลิตน้อย (ผู้ส่งออก ธนาคารกสิกรไทย 2532)

ตารางที่ 1.2 แหล่งเพาะปลูกหมาก 10 อันดับแรกของไทย

ลำดับที่	จังหวัด	พื้นที่ปลูก (ไร่)	ผลผลิตเฉลี่ย (กิโลกรัม/ไร่)	ผลผลิตรวม (กิโลกรัม)
1	ชุมพร	24,516	6,700	107,849.9
2	นครศรีธรรมราช	18,408	6,091.84	99,461.5
3	ระนอง	13,556	3,430.74	31,230.04
4	ฉะเชิงเทรา	9,583	1,958.4	17,641.3
5	พัทลุง	6,451	6,700	34,786.4
6	ตรัง	4,649	6,700	28,387.9
7	พังงา	4,282	5,362.81	14,683.36
8	ระยอง	4,048	2,089.88	7,026.19
9	สุราษฎร์ธานี	3,427	4,705.38	11,509.36
10	นครปฐม	3,409	3,172.3	10,697.01

(ที่มา: กรมส่งเสริมการเกษตร 2549)

การแปรรูปหมากสุก*เป็นหมากแห้งเป็นมาตรการหนึ่ง ที่มุ่งเน้นให้เกษตรกรผู้ปลูกหมากปรับเปลี่ยนกลไกทางการตลาด ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณหมากสด**ที่จะเข้าสู่ตลาดลดลง ไม่เกินความต้องการของตลาด และสามารถทำให้ราคาหมากสดอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ส่วนหมากที่ผ่านการอบแห้งจะมีมูลค่าสูงกว่าหมากสด และสามารถชะลอการจำหน่ายออกไปจนกว่าจะได้ราคาเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากขณะนี้ตลาดหมากแห้งยังเปิดกว้าง ปริมาณหมากแห้งยังไม่เพียงพอต่อความต้องการทั้งตลาดภายใน และภายนอกประเทศ ซึ่งกระบวนการอบแห้งนั้นมีความสำคัญยิ่งต่อคุณภาพของหมาก ส่วนใหญ่เกษตรกรนิยม 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 การผึ่งแดดมีขั้นตอน คือ ใช้หมากสุกผ่าตามยาว 2 ซีก นำไปผึ่งแดดเป็นเวลา 2-3 วัน หลังจากนั้นแกะเมล็ดออกจากเปลือก และผึ่งแดดต่อประมาณ 4-5 วันจนแห้ง โดยวิธีดังกล่าวนิยมทำบนผ้าตันท ผ่าตังกะสี หรือบนลานซีเมนต์ ข้อเสียของการอบแห้งวิธีนี้ คือ ใช้เวลานานโดยเฉพาะช่วงที่มีแดดน้อย หรือช่วงที่ฝนตกไม่สามารถอบแห้งได้ ใช้พื้นที่ในการผึ่งแดดมาก มีการปนเปื้อนฝุ่นละออง และมีแมลงวันไต่ตอม ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำ

วิธีที่ 2 การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบก๊าซ LPG นิยมในกลุ่มพ่อค้าคนกลางที่รับซื้อหมากแห้งจากเกษตรกร มีขั้นตอน คือ นำหมากแห้งที่ยังมีความชื้นไม่ถึงเกณฑ์กำหนด อบที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส ปริมาณการอบครั้งละ 1-2 ตัน ใช้เวลา 12-24 ชั่วโมง

* ผลแก่ผิวเปลือกเป็นสีเหลืองอมส้มทั้งผลเรียกหมากสุกหรือหมากสง อายุ 7-9 เดือน

** ผลยังไม่แก่ผิวเปลือกเป็นสีเขียว อายุ 3-6 เดือน

การอบแห้งจึงเป็นกระบวนการหนึ่งในงานด้านเทคโนโลยีหลังเก็บเกี่ยว และการแปรสภาพที่มีความสำคัญยิ่งต่อการเพิ่มคุณภาพ ลดการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ และเพิ่มระยะเวลาการเก็บรักษา เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นสิ่งที่ไม่สลับซับซ้อน แต่การวางแผนการอบแห้งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษาภายใต้สภาวะการอบแห้งต่างๆ ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีการวางแผนดำเนินงานที่เหมาะสมที่สุด (โสจร คิริเลิศ 2538)

นอกจากการศึกษาด้านการวางแผนดำเนินการอบแห้งแล้ว ในการพิจารณาชนิดของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน ซึ่งถือได้ว่ากระบวนการอบแห้งจะใช้พลังงานค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ ในเทคโนโลยีหลังเก็บเกี่ยว พลังงานที่ใช้แบ่งได้เป็นสองชนิดคือ ความร้อนที่ใช้ทำให้อากาศร้อน และพลังงานกลที่ใช้ในการขับเคลื่อน ซึ่งส่วนมากจะเป็นไฟฟ้า ความร้อนที่ใช้อาจได้จากไฟฟ้า น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ก๊าซจากของเหลือใช้ทางการเกษตร และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานเป็นจำนวนมาก การศึกษาการเผาไหม้ของเหลือใช้ทางการเกษตร และการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในรูปของความร้อน จะสามารถช่วยลดการนำเข้าพลังงานได้ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลภาวะ ในอุตสาหกรรมการอบแห้งมีการสร้างเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งนี้สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เพื่อทำให้อากาศร้อน และส่วนที่เป็นห้องอบแห้ง ซึ่งใช้ใส่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธฤทธิ์ 2532) เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีข้อจำกัดทางด้านสภาวะอากาศ เวลา และฤดูกาล ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนในบริเวณเส้นศูนย์สูตรทำให้มีแสงแดดตลอดปี ปริมาณความเข้มของแสงเฉลี่ยทั้งปีอยู่ในช่วง 18–19 MJ/m².day เป็นพลังงานที่มากพอสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้ง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร 2547)

กระบวนการทางการเกษตรจะเกิดของเหลือทิ้ง ซึ่งเป็นอินทรีย์สารหรือชีวมวล ใยหมากหรือเปลือกหมากสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในกระบวนการอบแห้งได้จากผลการทดสอบหาค่าพลังงานความร้อนของใยหมากในห้องปฏิบัติการทดสอบทางเคมีโดยใช้เครื่องทดสอบ Bomb Calorimeter มีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 17 MJ/kg ที่ความชื้น 11% (w.b) และโดยเฉลี่ยหมากสุก 1 kg จะมีใยหมากแห้งประมาณ 0.15 kg ที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง นอกจากนี้พืชมังคังเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งสามารถหาได้ในชุมชนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้งได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิด พัฒนาเครื่องอบแห้งหมากโดยใช้ใช้พลังงานร่วมระหว่างแสงอาทิตย์และชีวมวล

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนร่วมระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์กับพลังงานชีวมวล

1.2.2 ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการอบแห้งหมากและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเพื่อให้ได้หมากแห้งที่มีคุณภาพ

1.2.3 เครื่องอบหมากพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่พัฒนาขึ้น สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งหมาก และได้ผลิตภัณฑ์หมากแห้งที่มีคุณภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผึ่งแดดของเกษตรกร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลจากไม้ฟืนขางพาราเป็นพลังงานความร้อนในการอบแห้ง

1.3.2 ใช้หมากสุกผ่าซีกเป็นวัตถุดิบในการอบแห้ง โดยมีการอบแห้ง 2 ขั้นตอน

(1) อบผลหมาก

(2) อบเมล็ดหมาก (ความชื้นสุดท้าย 12 %wb)

1.3.3 ใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานความร้อนเสริมในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เพื่อให้การอบแห้งเป็นแบบต่อเนื่อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การอบหมากด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ ประหยัดพลังงานและได้หมากแห้งที่มีคุณภาพ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมากแห้ง (มผช.1060/2548) เป็นที่ต้องการของตลาด ผลดีของการอบแห้งวิธีนี้อาจใช้เป็นแนวทางที่จะขยายไปสู่อุตสาหกรรมผลิตหมากแห้งเพื่อการส่งออกต่อไป

1.5 การตรวจเอกสาร

สุขฤดี สุขใจ (2535) ได้ศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง เมื่อใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ และ LPG รวมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ และประเมินความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ จากการทดสอบรังสีรวมแสงอาทิตย์ระหว่างเวลา 9.00–16.00 น. มีค่าเฉลี่ย 706.3 W/m^2 ($337\text{--}840 \text{ W/m}^2$) อัตราการไหลของอากาศมีค่า 0.27 kg/s อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเฉลี่ย 37.6°C ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 24.7% ซึ่งต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี เมื่อทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของระบบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ และ LPG แปรตามความชื้นของกล้วย และอัตราการไหลจำเพาะของอากาศในลักษณะเชิงเส้น โดยมีวิธีการอบ 2 วิธี คืออบแบบหมุนเวียนใช้เวลาเฉลี่ยแต่ละครั้ง 6 วัน และอบแบบต่อเนื่องใช้เวลาเฉลี่ยแต่ละครั้ง 49 ชั่วโมง การอบแห้งแบบต่อเนื่องจะสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่าแบบหมุนเวียน จากการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าการอบแห้งแบบต่อเนื่องสามารถให้ผลผลิตกล้วยอบแห้งได้ประมาณปีละ $57,120 \text{ kg}$ การอบแห้งแบบหมุนเวียนให้ผลผลิตปีละ $28,240 \text{ kg}$ ซึ่งแบบต่อเนื่องและแบบหมุนเวียนจะคุ้มทุนภายใน 2 และ 3 ปี ตามลำดับ

วรวิทย์ รุ่งจิรวารักษ์ (2538) ได้ศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อประเมินสมรรถนะของแผงรับรังสีแบบต่าง ๆ โดยกำหนดพื้นที่รับรังสี 23.1 m^2 เท่ากันทุกแบบ และประเมินสมรรถนะของเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และ LPG ขนาดอุตสาหกรรม ตลอดจนความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการทดลองระหว่างเวลา 9.00–6.00 น. พบว่าแบบแผ่นเรียบที่มีฉนวนเป็นโพลียูเรเทนโฟม รังสีอาทิตย์รวมมีค่าเฉลี่ย 836.8 W/m^2 อัตราการไหลของอากาศมีค่า 0.26 kg/s มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 32.1% แบบแผ่นเรียบที่มีฉนวนเป็นเทอร์แม็กซ์ รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ย 735.7 W/m^2 อัตราการไหลของอากาศมีค่า 0.26 kg/s ประสิทธิภาพเฉลี่ย 31.6% แบบแผ่นเรียบมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบลอน (ลูกฟูก) ที่มีฉนวนเป็นเทอร์แม็กซ์ รังสีอาทิตย์รวมมีค่าเฉลี่ย 767.1 W/m^2 อัตราการไหลของอากาศมีค่า 0.28 kg/s ประสิทธิภาพเฉลี่ย 38.0% แบบมีครีบที่มีฉนวนเป็นเทอร์แม็กซ์ รังสีอาทิตย์รวมมีค่าเฉลี่ย 834.9 W/m^2 อัตราการไหลของอากาศมีค่า 0.26 kg/s จะมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 37.4% เมื่อทดสอบอบกล้วยน้ำว้า พบว่าการอบหมุนเวียนใช้เวลาเฉลี่ยชุดละ 5 วัน ใช้พลังงานจำเพาะ $14.93 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap.}$ ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์และ LPG เฉลี่ยเท่ากับ 15.79% จากการประเมินความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าการอบแห้งแบบหมุนเวียนสามารถให้ผลผลิตกล้วยอบแห้งได้ประมาณปีละ $56,012 \text{ kg}$ และระยะเวลาการคืนทุน 3.2 ปี

บัญญัติ นิยมวาส (2544) ได้ศึกษาพฤติกรรมการแห้งของผลปาล์มโดยทำการทดลองอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องอบแบบถังมีอากาศร้อนไหลตั้งฉากกับชั้นวางผลิตภัณฑ์ทดลองโดยกำหนดตัวแปร ได้แก่ความสูงของชั้นผลปาล์ม 25 40 และ 55 cm ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศร้อน 80 100 และ 120°C ตามลำดับ ความเร็วอากาศเท่ากับ 0.8–1.0 m/s จากการทดลองพบว่าที่ความสูงชั้นผลปาล์ม 40 cm และอุณหภูมิอากาศร้อน 120°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมมากที่สุดสำหรับการอบผลปาล์ม โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน และอัตราการผลิตสูงสุดเท่ากับ 18.75% และ 0.586 กิโลกรัมปาล์ม/ชั่วโมง ตามลำดับ

รัฐิบัติย์ ปางวัชรากร (2545) ได้ศึกษาการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ที่พัฒนาขึ้น เครื่องอบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พื้นที่รับแสงและพื้นที่อบแห้งซึ่งวางต่อกันเป็นแนวยาว โดยทั้งสองส่วนคลุมด้วยแผ่นพลาสติกใสและใช้พัดลมช่วยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ จากการทดลองอบพริกชี้ฟ้าสดครั้งละ 20 kg ในช่วงเวลา 9.00–17.00 น. ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 638.44 W/m² อัตราการไหลของอากาศ 0.59-1.18 m³/s มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในห้องอบเท่ากับ 65°C สามารถลดความชื้นของพริกจาก 72-73 % (wb) เป็น 7-8 % (wb) ภายใน 2 วัน เครื่องอบมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 34.69% จากการทดสอบคุณภาพพริกแห้งที่ผ่านการอบ มีค่าสี L* = 40.59, a* = 12.36, b* = 7.53 และค่าวอเตอร์แอกทิวิตีอยู่ในช่วง 0.31-0.39 ซึ่งดีกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมพริกแห้ง (มอก.456–2526) และพริกแห้งที่มีขายโดยทั่วไป ผลวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีระยะเวลาคืนทุนภายใน 2 ปี

สุขฤดี นาถกรณกุล และคณะ (2547) ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแก๊สชีวภาพ มีส่วนประกอบของเครื่องอบแห้ง 3 ส่วน คือ แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ อุโมงค์อบแห้ง และแหล่งพลังงานความร้อนเสริม ผลิตภัณฑ์ที่วางในอุโมงค์อบแห้งสามารถรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ 2 ทาง คือ ความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง และจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ใช้พัดลมในการกำหนดอัตราการไหลของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์หรือแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ หรือมีฝนตกทั้งวันจะใช้แหล่งความร้อนเสริมจากแก๊สชีวภาพ ส่งความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการทดสอบเครื่องอบแห้งโดยไม่มีผลิตภัณฑ์ในตู้อบแห้ง อุณหภูมิเฉลี่ยที่ออกจากแผงรับแสงอาทิตย์ 47.1°C อุณหภูมิเฉลี่ยในอุโมงค์อบแห้ง 54.7°C ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 489.8 W/m² ประสิทธิภาพแผงรับแสงอาทิตย์เฉลี่ย 54.9% ทดลองอบกล้วยน้ำว้า 150 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 70 % (wb) ความชื้นสุดท้าย 30 % (wb) พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในอุโมงค์อบแห้ง 47.2°C ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง 42.8% ใช้เวลาในการอบ 4-5 วัน

ซีเรคเซ ใหญ่บัก และคณะ (2550) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบส้มแขกแบบ ถาดโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และไฟฟ้า แบบระบบหมุนเวียนอากาศ เครื่องอบแห้ง ประกอบด้วยแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นลอนสามเหลี่ยมมีกระจกปิดชั้นเดียว ห้องอบแห้งมี ถาดวางซ้อนกัน จำนวนถาด 8 ถาด ขดลวดความร้อนไฟฟ้าขนาด 600 วัตต์ 3 ชุด ติดตั้งในห้อง อบแห้ง พัดลม วาล์วปีกผีเสื้อ และท่อหมุนเวียนอากาศ ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C ทดลองอบแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงาน ไฟฟ้า ศึกษาอิทธิพลของการหมุนเวียนอากาศ จากการทดลอง พบว่าการอบแห้งแบบใช้พลังงานร่วม แสงอาทิตย์และไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันที่อุณหภูมิ 50°C เครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงสุด โดย สามารถทำอากาศร้อนได้สูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 32.9°C ภายใต้อุณหภูมิรังสีดวงอาทิตย์ เฉลี่ย 500 W/m² ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง 25% การใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้ง 8.53 MJ/kg H₂O evap. ใช้เวลาอบแห้ง 17 ชั่วโมง เมื่อการผึ่งแดดของชาวบ้านใช้ระยะเวลา 5-7 วัน

Mastekbayeva et al. (1999) ได้ทำการประดิษฐ์เครื่องอบแบบอุโมงค์ โดยใช้ พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ใช้กลายเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา และใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อน ทำการอบแห้งพริกสดและเห็ด พบว่าพริกสดที่มีน้ำหนัก 19.5 กิโลกรัม มีค่าความชื้นเริ่มต้น 76%(w.b) ความชื้นหลังอบแห้ง 6.6%(w.b) และสำหรับเห็ดที่นำมาอบแห้งมีน้ำหนัก 21 กิโลกรัม เมื่อผ่านการอบแห้งสามารถลดความชื้นจาก 91.4% เป็น 9.8% ซึ่งทั้งพริกสดและเห็ดใช้เวลาอบแห้ง เพียง 12 ชั่วโมง แต่เมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ผ่านแสงความร้อน พบว่าต้องใช้เวลาในการอบแห้ง 3-4 วัน ส่วนการอบโดยผึ่งแดดใช้เวลา 3-5 วัน

Thanaraj et al. (2004) ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งเนื้อมะพร้าวโดยใช้ พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เครื่องอบเป็นแบบ rotary ระบบอบแห้งประกอบด้วย แผงเก็บ ความร้อน เตาเผา และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยออกแบบห้องอบทำหน้าที่เหมือนแผงรับ ความร้อน สามารถเปลี่ยนรังสีดวงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน ใช้อบแห้งเนื้อมะพร้าว จากการ ทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดในห้องอบแห้งเท่ากับ 50°C โดยใช้กลายเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา และมี การทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิ พบว่าการป้อนเชื้อเพลิง ที่ 3 5 และ 10 kg/h จะได้อุณหภูมิเท่ากับ 43 53 และ 62°C ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาเท่ากับ 43 48 และ 70% ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราการป้อน เชื้อเพลิงมีผลต่ออุณหภูมิในห้องอบแห้ง จากการทดลองอบเนื้อมะพร้าว พบว่าได้เนื้อมะพร้าวสีขาว 73% เนื้อมะพร้าวสีน้ำตาล 21% และเนื้อมะพร้าวที่มีความสกปรก 6% โดยอบต่อเนื่อง 70 ชั่วโมง

Meeso et al. (2004) ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกโดยการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับกระบวนการฟลูอิดไดเซชัน และกระบวนการเทมเปอร์ในการลดความชื้นและคุณภาพหลังผ่านกระบวนการ โดยทำการทดลองที่ความเข้มของแสง $0.312-0.707 \text{ W/m}^2$ เวลาในการฟลูอิดไดเซชันที่ 1 1.5 และ 2 นาที จากการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกหลังผ่านการอบโดยกระบวนการฟลูอิดไดเซชันจะไม่ต่ำกว่า 23 %(db) แต่เมื่อใช้ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ปริมาณความชื้นลดลงเหลือ 21 %(db) โดยที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ข้าวเปลือก

Prasad et al. (2005) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลจากการทดลอง พบว่าเมื่ออบแห้งขิง (ginger)หนัก 18 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 319.74 %(db) หลังจากการอบแห้งเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 11.8 %(db) ใช้ระยะเวลา 33 ชั่วโมง และทำการอบแห้งขมิ้น (turmeric) โดยความชื้นลดลงจาก 358.96 เป็น 8.8 และจาก 257.45 เป็น 9.67 %(db) ซึ่งใช้ระยะเวลา 36-48 ชั่วโมง ดังนั้นเวลาที่ใช้ออบแห้งจะอยู่ในช่วง 33-48 ชั่วโมง และเมื่อทดลองอบแห้งตัวอย่างดังกล่าวโดยใช้ความร้อนจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว จะใช้ระยะเวลา 72-120 ชั่วโมง โดยที่การอบแห้งด้วยวิธีผึ่งแดดจะใช้ระยะเวลา 192-288 ชั่วโมง

Fadhel et al. (2005) ได้ทำการศึกษาอบแห้งองุ่นพันธุ์ Sultanine โดยเปรียบเทียบ 3 วิธี คือ การผึ่งแดด การอบด้วยเครื่องอบชนิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และการอบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ จากการทดลอง พบว่าการอบด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ มีผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจมากที่สุด คือ ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 วิธี โดยใช้เวลาอบแห้ง 5 วัน โดยที่การผึ่งแดดและอบด้วยเครื่องอบชนิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ใช้เวลา 11 วัน และ 9 วัน ตามลำดับ

Kaleemullah and Kailappan (2006) ได้ศึกษาการอบแห้งพริกแดงแบบชั้นบาง ที่อุณหภูมิ 50 55 60 และ 65°C ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 325 %(db) ความชื้นสุดท้ายประมาณ 10.5% (db) จากผลการทดลอง พบว่าการอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 50 55 60 และ 65°C ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 26 20 16 และ 13 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยที่คุณภาพของพริกแห้งที่อุณหภูมิ 55°C เป็นที่น่าพอใจมากที่สุด

Turhan et al (2007) ได้ศึกษาพฤติกรรมการแห้งของผล Azarole ทำการศึกษา 2 สายพันธุ์เปรียบเทียบกัน คือพันธุ์ผลสีแดง และพันธุ์ผลสีเหลือง โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กแบบการพาความร้อนแบบบังคับ ทดลองที่อุณหภูมิ 60°C และ 70°C ความเร็วอากาศ 0.25 m/s ความชื้นเริ่มต้นของพันธุ์สีแดง และสีเหลืองเท่ากับ 211 %(db) และ 273 %(db) ตามลำดับ เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 8-9 %(db) จากการทดลอง พบว่าอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C พันธุ์สีเหลืองจะใช้พลังงาน และเวลาน้อยที่สุดเท่ากับ 27.68 kW/kg และ 59.60 ชั่วโมง การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C

พันธุ์สีแดงจะใช้พลังงาน และเวลาในการอบแห้งมากที่สุดเท่ากับ 62.12 kW/kg และ 141.5 ชั่วโมง โดยที่อุณหภูมิของอากาศอบแห้งมีอิทธิพลต่อระยะเวลาการแห้งเป็นอย่างมาก

Shrikant et al. (2007) ได้ศึกษาลักษณะการแห้งและคุณภาพของ bori nuggets เมื่อทำการอบแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งแบบชั้นชนิดลาดอยู่กับที่ การไหลของลมร้อนเป็นแบบบังคับ โดยพิจารณาถึงคุณภาพของ bori nuggets ได้แก่ สี ความแข็ง และระยะเวลาการอบแห้ง ทำการทดลอง ในช่วงอุณหภูมิ 30 50 และ 70°C ที่ความเร็วลม 0.6 1 และ 1.4 m/s ใช้สมการ Arrhenius หาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อัตราการแห้งเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิมิผลต่อการเกิดสีเหลืองของ bori nuggets แต่ความเร็วลมไม่มีผล อุณหภูมิและความเร็วลมมีผลต่อความแข็ง ดังนั้นอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมสำหรับอบแห้ง bori nuggets คือ 59-63°C และ 0.9-1.05 m/s. ตามลำดับ

Madhlopa and Ngwalo (2007) ได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ชีวมวลเป็นพลังงานความร้อนเสริม เครื่องอบแห้งมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เตาเผาชีวมวล แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ห้องอบแห้ง โดยมีพื้นที่อบแห้ง 4.1 m² และปล่องระบายควัน ใช้คอนกรีตเป็นตัวดูดกลืนและสะสมพลังงานความร้อน การทำงานของเครื่องอบแห้งหลักการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ทำการทดลองอบแห้งสับประคั้งละ 20 kg ความชื้นเริ่มต้น 699 %(db) ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 11 %(db) โดยทดลอง 3 กรณี คือ อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว อบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเมื่ออบด้วยพลังแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล และพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เท่ากับ 15 11 และ 13% ตามลำดับ

1.6 สรุป

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งวัสดุและอาหาร เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะสามารถลดความชื้นให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันมีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรกันอย่างแพร่หลาย เช่น ก๋วยเพร็ก ลำไย ข้าวโพด สมุนไพรต่างๆ เป็นต้น แต่การอบแห้งผลหมากรังยังมีให้เห็นน้อยมาก จึงนับว่าเป็นงานที่น่าสนใจ และการพัฒนาด้านเทคโนโลยีอบแห้งจะขึ้นกับแหล่งพลังงานที่เลือกใช้ด้วย รวมถึงการประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียนร่วมกับพลังงานอื่นๆ ได้หลายแบบ เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล ซึ่งจะทำให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น

และเป็นการลดการใช้พลังงาน ดังนั้นในงานวิจัยในครั้งนี้ จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องอบแห้ง ผลหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

ในส่วนของรายละเอียดของเนื้อหาบทต่างๆ ที่จะกล่าวเป็นลำดับต่อไป โดยมีรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

บทที่ 2 หลักทฤษฎีที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยแบ่งเนื้อหาเป็น 6 ส่วนด้วยกัน คือ ได้แก่ ทฤษฎีการอบแห้ง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ทฤษฎีแผ่รังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ทฤษฎีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหมาก

บทที่ 3 ขั้นตอนและการดำเนินการวิจัย โดยแบ่งเนื้อหาเป็น 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง การทดลองเครื่องอบแห้ง การทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

บทที่ 4 การออกแบบระบบอบแห้ง โดยแบ่งเนื้อหาเป็น 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ผลการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของผลหมาก การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง การออกแบบและสร้างแหล่งความร้อนเสริม และหลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง

บทที่ 5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล โดยแบ่งเนื้อหาเป็น 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และผลการทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ โดยสรุปผลออกเป็น 2 ส่วน คือ สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพของหมากแห้ง

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักทฤษฎีที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ ทฤษฎีการอบแห้ง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ทฤษฎีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ทฤษฎีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และนอกจากนี้ยังกล่าวถึงลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหมาก

2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้ง คือกระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย มักจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการอบแห้ง (สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์ 2540)

กระบวนการอบแห้ง สามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท ตามวิธีการให้ความร้อนหรือลักษณะของก๊าซร้อน โดยรอบ ได้แก่ การอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนไหลสวนทาง เป็นการใช้ลมร้อนเป่าสวนทางกับการเคลื่อนที่ของวัสดุ การอบแห้งแบบนำความร้อน เป็นการอบแห้งโดยใช้ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการสัมผัสวัสดุโดยตรงกับภาชนะร้อน การอบแห้งแบบแผ่รังสี เป็นการอบแห้งโดยการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ การอบแห้งแบบกำเนิดความร้อนสม่ำเสมอ เป็นการทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อผลิตภัณฑ์เอง โดยอาศัยคลื่นไมโครเวฟ การอบแห้งแบบสุญญากาศ เป็นการอบแห้งในสุญญากาศโดยให้ความร้อนด้วยการนำความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน การอบแห้งโดยไอน้ำยิ่งยวด เป็นการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำยิ่งยวด (Superheated steam) เป็นตัวกลางในการส่งผ่านความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ การอบแห้งแบบแช่แข็ง โดยการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับ -30°C หลังจากนั้นนำมาอบแห้งแบบสุญญากาศ น้ำแข็งจะระเหิดเป็นไอออกไปจากผลิตภัณฑ์ (ยุทธนา กุลอินทรประเสริฐ 2548)

ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการอบแห้ง เกิดจากการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน การนำความร้อน หรือการแผ่รังสีความร้อน หรือเป็นการผสมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องอบแห้ง

การถ่ายเทมวลในกระบวนการอบแห้ง ขึ้นอยู่กับกลไกสองอย่าง คือการเคลื่อนย้ายของน้ำภายในผลิตภัณฑ์เนื่องจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ และความชื้นในผลิตภัณฑ์ กลไกที่สอง คือการเคลื่อนย้ายของไอน้ำจากผิวของผลิตภัณฑ์เนื่องจากปัจจัย

ภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ในกระบวนการอบแห้ง (พุทธิพงษ์ แสนสบาย 2539)

การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องพร้อมกัน และเป็นตัวกำหนดอัตราการอบแห้ง

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง

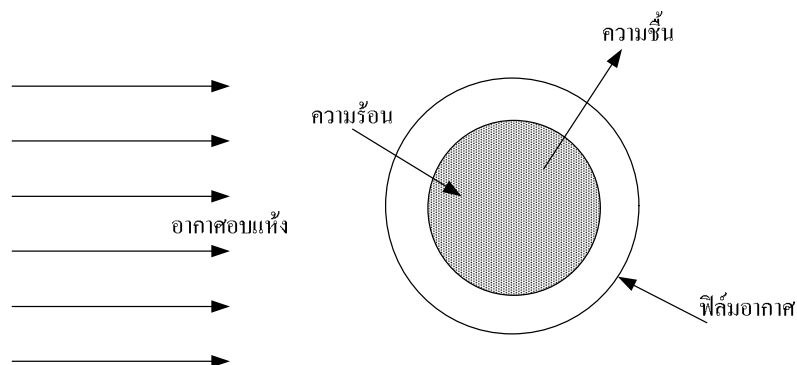
(1) กลไกการอบแห้งภายใน

ผลจากการถ่ายโอนความร้อน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างภายในกับที่ผิวผลิตภัณฑ์ น้ำกลายเป็นไอเมื่อเคลื่อนย้ายมาที่ผิวผลิตภัณฑ์ โดยการแพร่แต่กรณีที่มีวัสดุมีรูพรุนมาก น้ำอาจเคลื่อนย้ายมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์โดยการแพร่ของไอน้ำ หรือการไหลที่หนืดอย่างอิสระ (free viscous flow) ก็ได้ กลไกเหล่านี้อาจเกิดขึ้นพร้อมกัน เมื่อเวลาผ่านไป การเคลื่อนย้ายน้ำภายในผลิตภัณฑ์จะค่อยๆ ช้าลง และการแพร่ของน้ำจะลดลง การเคลื่อนย้ายของน้ำภายในเนื้อผลิตภัณฑ์มีความสำคัญมากต่อการอบแห้ง การอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศสูงๆ มีผลให้เกิดความแตกต่างของความชื้นระหว่างภายในกับที่ผิวผลิตภัณฑ์มาก เป็นสาเหตุให้เกิดการหดตัวที่ผิวกับภายในไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดการแตกร้าว ในกรณีนี้จำเป็นต้องไม่ให้เกิดความแตกต่างของความชื้นมากเกินไป โดยการเพิ่มความชื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์โดยการอบแห้งด้วยอากาศที่มีความชื้นสูง แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงด้วย เพื่อให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ได้มีอัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในผลิตภัณฑ์มาที่ผิวสูงด้วย ในกรณีนี้อัตราการไหลของอากาศ มีผลต่ออัตราการระเหยน้ำออกจากผิวผลิตภัณฑ์น้อยลง เพราะผิวผลิตภัณฑ์ค่อนข้างแห้ง

(2) กลไกการอบแห้งภายนอก

กลไกการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ มีความสำคัญต่อการอบแห้ง ชนิดของเครื่องอบแห้ง และสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง ปัจจัยภายนอกที่สำคัญคือ อุณหภูมิ ความชื้น อัตราการไหล และทิศทางการไหลของอากาศ รูปร่างของผลิตภัณฑ์ และวิธีการป้อนผลิตภัณฑ์เข้าเครื่องอบแห้งระหว่างทำการอบแห้ง ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์จะมีความชื้นสูง และอัตราการระเหยน้ำที่ผิวจะสูง การระเหยน้ำที่ผิวจำเป็นต้องมีการแพร่ของไอน้ำ จากผิวผลิตภัณฑ์สู่อากาศรอบๆ แผ่นฟิล์มอากาศที่สัมผัสอยู่กับผิวของผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แผ่นฟิล์มนี้จะเป็นฉนวนของการถ่ายเทความร้อน และเป็นตัวต้านการแพร่ของไอน้ำจากผิว ความหนาของแผ่นฟิล์มอากาศจะบางลง เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ชั้นภายในของฟิล์มอากาศที่สัมผัสกับผิวผลิตภัณฑ์ จะอึดตัวไปด้วยไอน้ำ และทำให้ผิวผลิตภัณฑ์มีไอน้ำห่อหุ้มอยู่ ความแตกต่างของความ

ดันไอน้ำระหว่างผิวผลิตภัณฑ์ กับชั้นนอกของฟิล์มอากาศ และอัตราการแพร่ของไอน้ำผ่านฟิล์มอากาศ จะมีผลต่ออัตราการระเหยของไอน้ำจากผิวผลิตภัณฑ์ อัตราการแพร่ของไอน้ำผ่านฟิล์มอากาศก็คืออัตราการระเหยความชื้นจากผิวผลิตภัณฑ์ จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ มีความสัมพันธ์อย่างผกผันกับความหนาของฟิล์มอากาศ และสัมพันธ์โดยตรงกับความแตกต่างระหว่างความดันของไอน้ำอิมิตัว ที่อุณหภูมิของฟิล์มด้านใน กับความดันของไอน้ำในอากาศโดยรอบ นั่นคือ อัตราการระเหยของไอน้ำออกจากผิวของผลิตภัณฑ์จะสูง เมื่อผลิตภัณฑ์มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก หรือความเร็วของอากาศสัมผัสกับผิวผลิตภัณฑ์สูง (ฟิล์มอากาศบาง) หรือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรอบแห่งต่ำ หรือความดันอากาศโดยรอบผลิตภัณฑ์ลดลง ในทางปฏิบัติสถานะเหล่านี้สามารถทำได้ โดยเตรียมผลิตภัณฑ์ที่จะอบแห้งให้มีขนาดเล็ก หรือการใช้พัดลมเพื่อทำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับ และควบคุมปริมาณอากาศใหม่ที่ป้อนเข้าระบบอบแห้ง ให้อยู่ในปริมาณพอดี ทำให้เกิดความชื้นที่เหมาะสม รวมทั้งการลดความดันภายในห้องอบลงด้วย

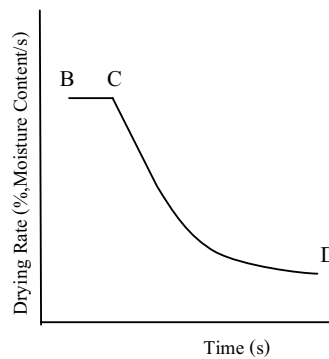


รูปที่ 2.1 ฟิล์มอากาศรอบผลิตภัณฑ์

(ดัดแปลงจาก พุทธิพงษ์ แสนสบาย 2539)

2.1.2 ช่วงการอบแห้ง

การทดสอบการอบแห้ง โดยปรกติก็ต้องการหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้ง โดยให้ใช้เวลาน้อยที่สุด การหาสภาวะที่เหมาะสม จะได้จากการเขียนกราฟระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์ กับเวลา ซึ่งจะได้อัตราการอบแห้งกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้ง
(ดัดแปลงจาก Ekechukwu , 1999)

จากรูปที่ 2.2 ช่วง BC เป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Drying Period, CRDP) ในช่วง CD เป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Drying Period, FRDP)

(1) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ มีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ ที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์จะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก เมื่อผ่านกระแสอากาศไปบนตัวผลิตภัณฑ์ ความร้อนสัมผัสจากอากาศจะถ่ายเทไปยังผลิตภัณฑ์ และน้ำจะระเหยจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ การถ่ายเทความร้อน และมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้ง บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ จะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การถ่ายเทมวล และความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์เท่านั้น เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ จะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อน และมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างที่ผิวผลิตภัณฑ์ และของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อน และมวลดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิ่มตัว

ที่ผิวผลิตภัณฑ์ และอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น

ผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป จะไม่ปรากฏการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ นอกจากจะมีความชื้นอยู่ที่ผิวของผลิตภัณฑ์มาก จนมีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำเคลือบอยู่ที่ผิว ผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งส่วนใหญ่ จะเป็นการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของอัตราอบแห้งอย่างเด่นชัดเหมือนในรูปที่ 2.2

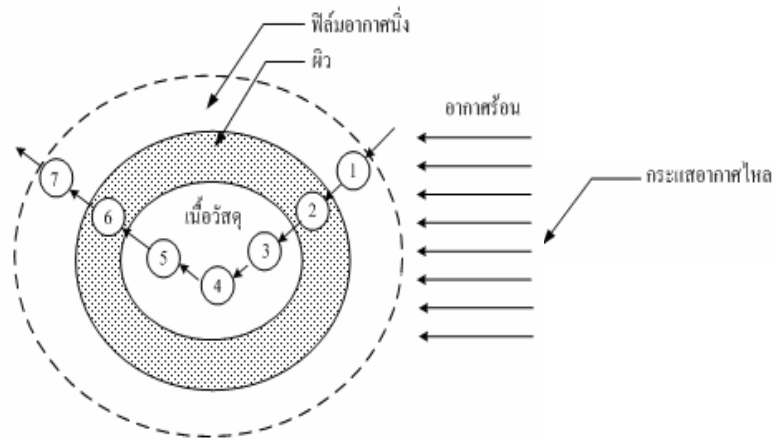
ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ไปเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เรียกว่า ความชื้นวิกฤติ (critical moisture content) ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นอยู่กับรูปร่าง และขนาดของผลิตภัณฑ์ และรวมถึงสภาวะของการอบแห้ง

(2) ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เป็นปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในตัวผลิตภัณฑ์ มาที่ผิวในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำ และน้ำที่ผิวจะระเหยไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ในระหว่างนี้ ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ จะไม่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มของน้ำเหมือนกับในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เพราะว้อตราการแพร่ของน้ำจากภายในออกสู่ผิวนอก มีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวนอก

จากที่กล่าวมาทั้งหมด อาจสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอาจจะมีอิทธิพลของความเร็วอากาศด้วย โดยเฉพาะอัตราการอบแห้งคงที่ หรือช่วงต่อกับช่วงอัตราการอบแห้งลดลง รูปที่ 2.3 แสดงการไหลของความร้อน และความชื้นผ่านความต้านทานหลายตัว ซึ่งต่อแบบอนุกรมกันอยู่ ความต้านทานดังกล่าว ได้แก่ ความต้านทานในเนื้อผลิตภัณฑ์ ความต้านทานที่ผิวผลิตภัณฑ์ อย่างเช่นในกรณีของเปลือกผลไม้ เป็นต้น และความต้านทานของฟิล์มอากาศนิ่งที่อยู่รอบๆผิวผลิตภัณฑ์

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายเทความร้อน และมวลจะไม่จำกัดอยู่ เฉพาะที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิว และเนื้อผลิตภัณฑ์ด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมียิ่งมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ หรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อน และมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศพบว่า ความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลง เนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน และมวลมากนัก (ยุทธนา กุลอินทรประเสริฐ 2548)



1. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ฟิล์มอากาศนิ่ง
2. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิววัสดุ
3. ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในเนื้อวัสดุ
4. น้ำที่ระเหย
5. ความต้านทานการถ่ายเทมวลในเนื้อวัสดุ
6. ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ
7. ความต้านทานการถ่ายเทมวลที่ฟิล์มอากาศนิ่ง

รูปที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนและมวลในวัสดุ

(ดัดแปลงจาก Tanthapanichakool and Loychirakul, 1986)

2.2 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2.2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซร้อน รูปทรงกลม มีความหนาแน่นสูง ประมาณ 100 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ ดวงอาทิตย์เปรียบได้กับเตาปฏิกรณ์ ที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชั่นอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ proton-proton reaction เกิดจากการหลอมรวมของธาตุไฮโดรเจน ไปเป็นธาตุฮีเลียม และคายพลังงานความร้อนออกมา ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดภายในดวงอาทิตย์ ซึ่งมีอุณหภูมิหลายล้านเคลวิน จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนมาที่ผิวของดวงอาทิตย์ และแผ่ออกสู่อวกาศจนถึงโลก

การแผ่ความร้อนของดวงอาทิตย์ อยู่ในรูปของการแผ่รังสี โดยจะแผ่รังสีผ่านชั้นบรรยากาศของโลก และแผ่รังสีลงสู่พื้นโลกอีกครั้งหนึ่ง การแผ่รังสีนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

(1) การแผ่รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) คือรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์ โดยตรง และตกกระทบพื้นผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง ซึ่งทิศทางของรังสีตรง อยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์

(2) รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือรังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลก และวัตถุต่างๆที่อยู่ในแนวทางเดินของแสง ก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทิศทางของท้องฟ้า

(3) รังสีรวม (Total or Global Radiation) คือผลรวมของรังสีตรง และรังสีกระจายที่ตกกระทบผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง รังสีรวมจะประกอบด้วย รังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้า และผิวโลกเรียกรังสีรวมนี้ว่า Total Radiation

ค่าความเข้มของแสงที่แผ่ลงมายังโลกนั้น ยังขึ้นกับระยะห่างจากโลกกับดวงอาทิตย์ และขึ้นอยู่กัมุมเอียงของโลก ดังนั้นค่าความเข้มของรังสี จะแตกต่างกันตามฤดูกาล และตำแหน่งของรังสีที่ตกกระทบผิวโลก (ตามภูมิภาคของโลก) ในแต่ละภูมิภาคมีปริมาณความเข้มของแสงไม่เท่ากัน เนื่องจากในแต่ละภูมิภาค ตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน ประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร ก็จะมีโอกาสที่จะได้รับปริมาณแสงจากดวงอาทิตย์สูงกว่าประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตเหนือเส้นศูนย์สูตร (จงจิตร หิรัญลาภ 2520) ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร จึงทำให้ปริมาณความเข้มของแสงสูง จากข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยปี พ.ศ.2546 ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน และคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร พบว่าร้อยละ 50.2 ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18-19 MJ/m².day จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานการอบแห้งได้

2.2.2 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ในปัจจุบันเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้หลายประเภท แต่จากการสำรวจ สามารถสรุปการแบ่งประเภทของเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ ได้ดังนี้ แบ่งตามการไหลของกระแสอากาศภายในเครื่องอบแห้งได้ 2 แบบ คือ

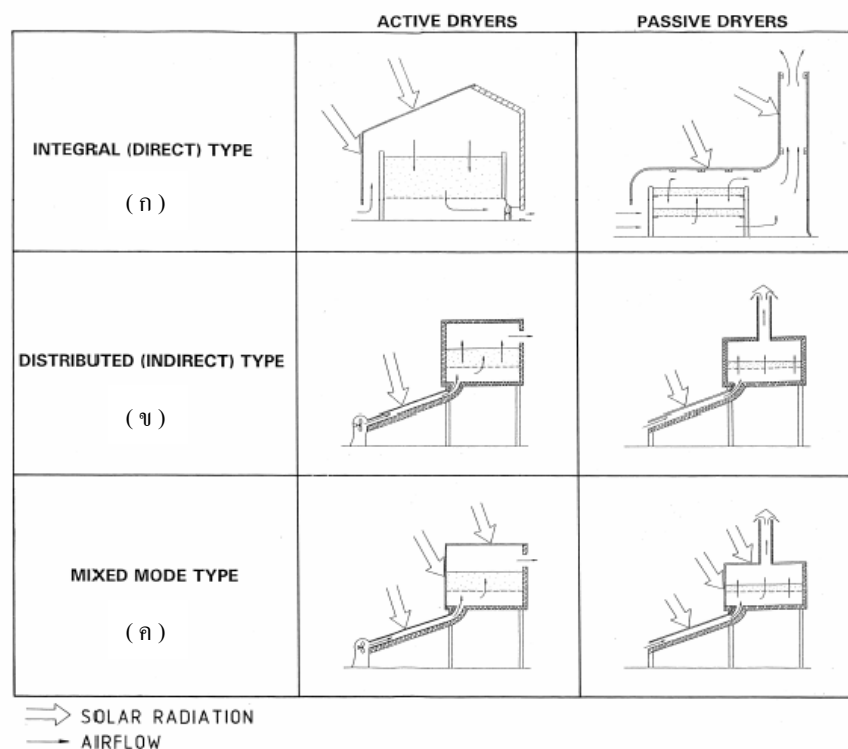
(1) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับ (Forced convection solar dryer) เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะใช้พัดลมเป็นตัวขับอากาศให้ไหลภายในเครื่องอบแห้ง

(2) เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบธรรมชาติ (Free convection solar dryer)

เครื่องอบแห้งชนิดนี้อาศัยหลักการขยายตัวของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ทำให้เกิดการหมุนเวียนเพื่อช่วยถ่ายเทความชื้น ซึ่งเหมาะกับการอบแห้งขนาดเล็ก การลงทุนต่ำ

เมื่อพิจารณาตามลักษณะการรับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง ประกอบกับลักษณะการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีการแบ่งเป็นประเภทดังนี้

(1) แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (Direct mode solar dryer) เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะใช้วัสดุใสทำเป็นหลังคา รังสีแสงอาทิตย์จะทะลุผ่านหลังคาไปยังวัสดุโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ก



รูปที่ 2.4 แสดงการแบ่งประเภทเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์
(ที่มา: Ekechukwu and Norton, 1999)

(2) แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Indirect mode solar dryer) เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบไปด้วย แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (Solar collector) พัดลมเป่าอากาศ (Blower) และห้องอบแห้ง (Drying chamber) รังสีดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน โดยแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แล้วจึงส่งไปยังวัสดุ มีอากาศเป็นตัวกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ข

(3) แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม (Mixed mode solar dryer) เครื่องอบแห้งประเภทนี้เกิดจากการพัฒนาสองแบบแรกมารวมกัน วัสดุจะได้รับความร้อนสองส่วนคือความร้อนจากการรับแสงอาทิตย์โดยตรง และจากอากาศร้อนที่มาจากตัวทำอากาศร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ค

2.3 ทฤษฎีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

2.3.1 แผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

แผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รับรังสีดวงอาทิตย์ เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับของไหลเพื่อนำไปใช้งาน ของไหลที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำหรืออากาศ แผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบ จะประกอบด้วย ตัวดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งทาสีดำ เพื่อให้มีค่าการดูดกลืนสูง และใช้แผ่นใสปิดด้านบน เพื่อลดการสูญเสียความร้อน เนื่องจากแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบ เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้นสมรรถนะของแผงรับรังสีแบบแผ่นเรียบ จึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานรังสีดวงอาทิตย์ เป็นพลังงานความร้อน เพื่อนำไปใช้งาน

2.3.2 สมรรถนะของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

สำหรับวิธีทดสอบสมรรถนะแผงรับรังสีแผ่นเรียบ มีวิธีทดสอบซึ่งเป็นที่ยอมรับและค่อนข้างนิยมกันมาก ได้แก่วิธีของ ASHRAE Standard 93-77 (1977) โดยการนำแผงรับรังสีไปรับแสงอาทิตย์ และทำการวัดอัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิของอากาศตรงทางเข้า และทางออกของแผงรับรังสี (ทงเงียรติ เกียรติศิริ โรจน์ 2531) สามารถคำนวณหาความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

$$Q_u = \dot{m}_a C_p (T_o - T_i) \quad (2.1)$$

โดยที่	Q_u	คือ	ความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงที่สภาวะสม่ำเสมอ (W)
	\dot{m}_a	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
	C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (kJ/kg °C)
	T_o	คือ	อุณหภูมิอากาศที่ทางออกของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)
	T_i	คือ	อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)

ถ้าทำการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ที่ตกกระทบบนระนาบของแผงรับรังสี อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนขณะใดขณะหนึ่งของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ได้ดังนี้ (Ekechukwu and Norton, 1999)

$$\eta_c = \frac{m_a C_p (T_o - T_i)}{A_c G_t} \quad (2.2)$$

โดยที่ η_c	คือ	ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ขณะใดขณะหนึ่ง (%)
m_a	คือ	อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
G_t	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (W/m^2)
A_c	คือ	พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m^2)

2.4 ทฤษฎีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

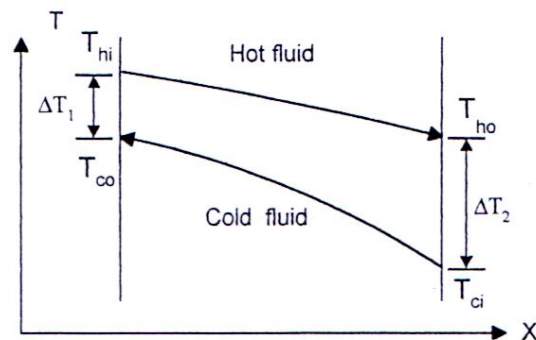
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม คือ Shell-and-tube ชนิดนี้จะมีของไหลส่วนหนึ่งไหลอยู่ในท่อเล็กด้านใน และอีกส่วนหนึ่งจะไหลอยู่รอบท่อเล็กด้านนอก

2.4.1 ค่าผลต่างของอุณหภูมิแบบลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference)

สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน Double-Pipe ที่การไหลของของไหลร้อนและเย็นเป็นแบบสวนทางกัน (Counter Flow) การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Holman, 1981)

$$Q = UA\Delta T_m \quad (2.3)$$

โดยที่ Q	คือ	ความร้อนที่ถ่ายเท (W)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m^2K)
A	คือ	พื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน (m^2)
ΔT_m	คือ	อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยของของไหลทั้งสองเชิงลอม ($^{\circ}C$)



รูปที่ 2.5 Temperature profiles สำหรับการไหลแบบสวนทางของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
(ดัดแปลงจาก Holman, 1981)

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (2.4)$$

$$\Delta T_m = \frac{(T_{ho} - T_{ci}) - (T_{hi} - T_{co})}{\ln[(T_{ho} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{co})]} \quad (2.5)$$

- โดยที่ ΔT_2 คือ ผลต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนขาออกและของไหลเย็นขาเข้า ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT_1 คือ ผลต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนขาเข้าและของไหลเย็นขาออก ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ho} คือ อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ci} คือ อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{hi} คือ อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{co} คือ อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

2.4.2 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness)

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทจริง ต่อความร้อนที่เป็นไปได้สูงสุดในการถ่ายเท สามารถคำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทจริงได้จากพลังงานที่สูญหายไปของของไหลร้อน หรือพลังงานที่ได้รับของของไหลเย็น โดยที่ Temperature profiles สำหรับการไหลแบบสวนทางของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.5 และค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta T(\text{Minimum fluid})}{\text{Maximum temperature difference in heat exchanger}} \times 100 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_h C_h (T_{hi} - T_{ho})}{\dot{m}_h C_h (T_{hi} - T_{ci})} \times 100 = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \times 100 \quad (2.7)$$

โดยที่	ε	คือ	ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (%)
	\dot{m}_h	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อน (kg/s)
	C_h	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซร้อน (kJ/kg °C)
	$T_{hi}-T_{ho}$	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของก๊าซร้อน (°C)
	$T_{hi}-T_{ci}$	คือ	ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)

2.5 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล โดยทั่วไปสามารถบอกได้ด้วยประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำ ต่อพลังงานที่ให้กับเครื่องอบแห้ง (สุขฤดี สุขใจ 2535)

2.5.1 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{m_w h_{fg}}{G A_c + E_e} \times 100 \quad (2.8)$$

2.5.2 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานจากชีวมวล และพลังงานไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{biomass}} = \frac{m_w h_{fg}}{q_f m_f + E_c} \times 100 \quad (2.9)$$

2.5.3 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานจากชีวมวล พลังงานจากแสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{all}} = \frac{m_w h_{fg}}{G A_c + q_f m_f + E_c} \times 100 \quad (2.10)$$

โดยที่ η_{solar}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (%)
η_{biomass}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง โดยใช้พลังงานชีวมวล (%)
η_{all}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (%)
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
m_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
q_f	คือ	พลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)
E_c	คือ	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

2.5.4 ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption: SEC)

ค่าการใช้พลังงานจำเพาะต่อหน่วยผลผลิต เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพพลังงานในระดับผลผลิต โดยวัดปริมาณพลังงานที่ใช้ เทียบกับหน่วยนับของผลผลิตทางกายภาพ สามารถคำนวณให้อยู่ในหน่วยของกิโลจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย ได้ดังนี้

$$\text{ค่าการใช้พลังงานจำเพาะ (kJ/kg)} = \frac{\text{ผลรวมของพลังงานที่ให้กับเครื่องอบแห้ง (kJ)}}{\text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)}} \quad (2.11)$$

2.6 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของหมาก

หมากเป็นพืชยืนต้นตระกูลเดียวกับปาล์ม ขึ้นได้ทั่วไปทั้งในเขตอบอุ่น และเขตร้อน มีชื่อภาษาอังกฤษว่า Betel nut, Arecanut หรือ Arecanut palm และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Areca catey* Linn. ถิ่นกำเนิดของหมากปรากฏหลักฐานไม่เด่นชัด แต่มีการแพร่กระจายอยู่บริเวณแหลมมลายู และหมู่เกาะฟิลิปปินส์ ปัจจุบันพบขึ้นกระจายอยู่ทั่วไปตั้งแต่ประเทศอินเดียถึงประเทศญี่ปุ่น และบางส่วนของทวีปออสเตรเลีย (ส่วนวิจัยเกษตรกรรม ธนาคารกสิกรไทย 2532)

ลักษณะโดยทั่วไปของหมากเป็นไม้ยืนต้น มีลำต้นเดี่ยวไม่แตกกอ ไม้แตกแขนง และเนื้อไม้ไม่มีแก่น มีการเจริญเติบโตทางเรือนยอดเท่านั้น เมื่อโตเต็มที่ลำต้นมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 นิ้ว สูงประมาณ 30-100 ฟุต แต่ลำต้นหมากจะมีการเจริญเติบโตประมาณ 5 ปีหลังระยะแรกจะมีการเจริญเติบโตด้านกว้าง และด้านสูง หลังจากหยุดเจริญเติบโตจะเจริญเติบโตด้านความสูง ต้นหมากมีเนื้อเป็นเส้นยาวๆ จับตัวกันแน่นบริเวณเปลือกนอกลึกเข้าไปประมาณ 2 เซนติเมตร ส่วนกลางลำต้นเป็นเส้นไม่อัดแน่นเหมือนด้านนอก และมีเนื้อไม้อ่อนนุ่มคล้ายฟองน้ำ ทำให้ต้นหมากเหนียว และสามารถโยกโอนเอนได้มาก ส่วนใบหมากเกิดจากบริเวณเรือนยอดเช่นเดียวกับพืชตระกูลปาล์มอื่นๆ ลักษณะเป็นใบประกอบคล้ายใบมะพร้าว แต่มีขนาดเล็กและสั้นกว่าใบมะพร้าว คือมีความยาวประมาณ 4 ฟุต และแต่ละใบมีความยาวประมาณ 1-2 ฟุต ในส่วนของผลหมากมีลักษณะกลม หรือกลมรี เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-2.5 นิ้ว โดยเฉลี่ยผลรวมกันเป็นทะลาย ใน 1 ทะลายจะมีผลอยู่ประมาณ 10-150 ผล ผลอ่อนสีเขียวเข้ม เรียกหมากดิบ ผลแก่จะมีผิวเปลือกเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอมส้มทั้งผล เรียกหมากสุกหรือหมากสง ผลประกอบด้วย 4 ส่วน คือเปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นกลาง เปลือกชั้นใน และส่วนของเมล็ดหรือเนื้อหมาก เปลือกชั้นนอกเป็นเยื่อบาง ๆ สีเขียว เนื้อเปลือกมีเส้นใยละเอียด และเหนียว เปลือกชั้นกลางเป็นเส้นใยหนาหมากมองเห็นชัด เมื่อผลอ่อนเส้นใยอ่อน เมื่อผลแก่จะเหนียวแข็ง เปลือกชั้นในเป็นเยื่อบาง ๆ ละเอียดติดอยู่กับเนื้อหมาก ส่วนของเมล็ดหรือเนื้อหมาก ถัดจากเยื่อบาง ๆ เข้าไปเป็นส่วนของเนื้อหมาก เมื่ออ่อนจะนิ่ม เนื้อส่วนผิวจะมีลายเส้นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล เนื้อจะมีสีเหลืองอ่อน ๆ ถึงสีเหลืองเข้มอมแดง เนื้อหมากมีสารแทนนิน (tannin) ซึ่งมีรสฝาด เนื้อหมากที่มีสีน้ำตาลมากจะมีรสฝาดมาก (ส่วนวิจัยเกษตรกรรม ธนาคารกสิกรไทย 2532)

พันธุ์หมากที่ปลูกแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

(1) แบ่งตามลักษณะผล

(1.1) ผลกลมแป้น ผลและเมล็ดมีขนาดใหญ่ รูปทรงกลม หรือกลมแป้น ความหนาของเปลือกค่อนข้างสม่ำเสมอ

(1.2) ผลกลมรี หมากชนิดนี้มีขนาดเล็กกว่าผลกลมแป้น เปลือกหนาไม่ค่อยสม่ำเสมอ ส่วนใหญ่เปลือกทางด้านขั้วผลจะหนากว่าส่วนอื่น อนึ่งเกษตรกรนิยมปลูกพันธุ์ผลกลมแป้นมากกว่า เพราะเมล็ดใหญ่กว่าผลกลมรี

(2) แบ่งตามลักษณะลำต้น

(2.1) พันธุ์ต้นสูง ลักษณะลำต้นสูง ก่อนข้างเล็ก ปลายห่าง ใบยาว จั่นยาว ให้ผลผลิตสูง มีทั้งผลกลมแป้น และผลกลมรี เมื่ออายุมากการเก็บเกี่ยวค่อนข้างลำบาก

(2.2) พันธุ์ต้นเตี้ย ลักษณะลำต้นเตี้ย อวบน้ำใหญ่ ปลายข้อเกือบจะติดกัน ใบสั้น จั่นยาว ออกจั่นน้อยให้ผลผลิตต่ำ เหมาะที่จะใช้เป็นไม้ประดับ หรือใช้ในการปรับปรุงพันธุ์

(2.3) พันธุ์กลาง ลักษณะลำต้นสูงปานกลาง ต้นอวบน้ำใหญ่ ใบสั้นปานกลาง จั่นอวบน้ำใหญ่แต่ข้อข้างสั้น ให้ผลผลิตค่อนข้างสูง ลักษณะผลมีทั้งกลมแป้น และกลมรี

ปัจจุบันแหล่งปลูกหมากที่เป็นเชิงการค้าของโลก ได้แก่ อินเดีย ศรีลังกา พม่า มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ ไต้หวัน อินโดนีเซีย และ ไทย แหล่งปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ ภาคกลาง พื้นที่ปลูกหมากของไทยมีประมาณ 116,756 ไร่ (กรมส่งเสริมการเกษตร 2549)

2.7 สรุป

งานวิจัยในครั้งนี้จะใช้หมากสุกพันธุ์ผลกลมรี ที่มีอายุ 7-9 เดือน โดยผ่าสองซีก เป็นวัตถุดิบอบแห้ง เนื่องจากในท้องถิ่นที่ผู้วิจัยติดตั้งเครื่องอบแห้ง เกษตรกรนิยมปลูกหมากพันธุ์ผลกลมรีเป็นจำนวนมาก จึงทำให้สะดวกในการจัดหาวัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์หมากแห้งที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ต้องมีคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนของหมากแห้ง (มพช.1060/2548) โดยที่มาตรฐานของหมากแห้งมีดังนี้ (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก)

- (1) สี ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของหมากแห้ง
- (2) กลิ่นรส ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของหมากแห้งปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์
- (3) สิ่งแปลกปลอม ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์
- (4) ความชื้นสุดท้าย ต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก
- (5) จุลินทรีย์
 - จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม
 - ยีสต์และรา ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา และพัฒนาเครื่องอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วม แสงอาทิตย์และชีวมวล ซึ่งสามารถผลิตหมากแห้งที่มีคุณภาพ ลดระยะเวลาการทำหมากแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีผึ่งแดดของเกษตรกร และนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเป็น 4 ส่วน คือ การศึกษาพฤติกรรมหมาก การออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้ง การทดลองเครื่องอบแห้ง และการทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง โดยที่ลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1

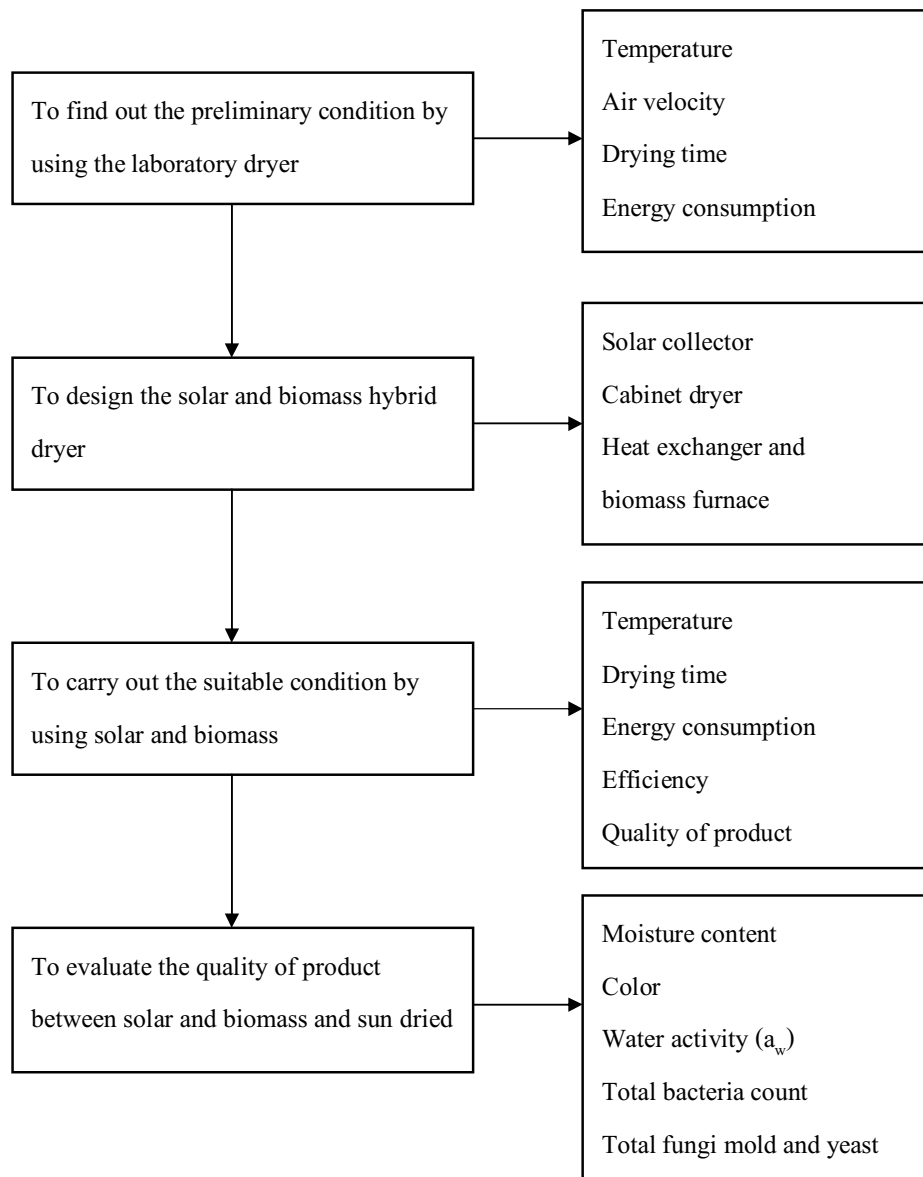
3.1 การศึกษาพฤติกรรมหมาก

การศึกษาพฤติกรรมหมาก มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรที่เหมาะสม ในการอบแห้งหมาก ได้แก่ อุณหภูมิ และความเร็วอากาศอบแห้ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการ ออกแบบ และกำหนดสภาวะการทำงานของเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ที่จะพัฒนาขึ้น โดยทำการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ (Laboratory dryer) เครื่องอบแห้งเป็นแบบตู้ชนิดถาดอยู่กับที่ การไหลของอากาศขนานกับชั้นวางผลิตภัณฑ์

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

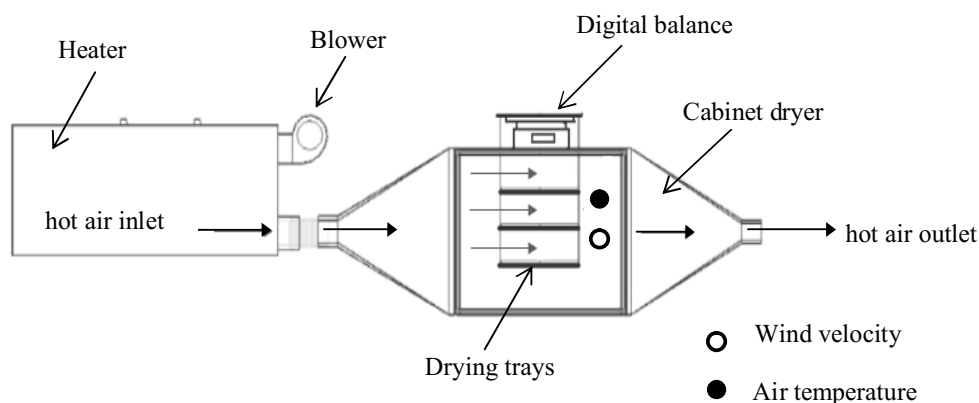
วัสดุและอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย อุปกรณ์ให้ความร้อน ชุดควบคุม อุณหภูมิ ตู้อบแห้ง พัดลมเป่าอากาศ เครื่องชั่งดิจิทัล เครื่องวัดความเร็วของอากาศ มาตรวัดไฟฟ้า เครื่องมือวัดอุณหภูมิ และอุปกรณ์แสดงผล

(1) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) ที่ใช้ในการทดลองเป็นกล่องเหล็กขนาด 22x95x40 cm หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนหนา 1 นิ้ว ด้านบนมีฝาเปิดได้ และใส่ขดลวดความร้อน ไฟฟ้าแบบครีบน้ำมัน 1,500 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (รวม 3,000 วัตต์) ไขว้ด้านใน ขดลวดแต่ละตัวต่อถึง กันแบบขนาน และต่อสายไฟแบบอนุกรมออกมายังชุดควบคุมอุณหภูมิ มีท่อนำอากาศร้อนขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ยาว 60 cm ต่อระหว่างกล่องเหล็กกับตู้อบแห้ง ด้านบนของกล่องเหล็ก ติดตั้งพัดลมเพื่อเป่าอากาศร้อนจากขดลวดความร้อนผ่านท่อ และเข้าตู้อบแห้ง อุปกรณ์ให้ความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

(2) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วน คือ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และแมกเนติกคอนแทกเตอร์ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมียี่ห้อ ANC พิกัด 200°C ความละเอียด 1°C เป็นแบบ on-off ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ชุดควบคุมความร้อนผ่านทางแมกเนติกคอนแทกเตอร์ (ดังรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

(3) ตู้อบแห้ง (Cabinet dryer) ที่ใช้ในการทดลอง มีโครงสร้างทำจากเหล็กขนาด 1 นิ้ว ผนังบุด้วยแผ่นสังกะสี และหุ้มด้วยแผ่นฉนวนกันความร้อนหนา 1 นิ้ว ตู้อบแห้งมีปริมาตร 0.15 m^3 ($0.5 \times 0.6 \times 0.5\text{ m}$) ภายในมีถาดวางวัตถุสำหรับอบแห้งสามถาด แต่ละถาดมีพื้นที่เท่ากับ 0.056 m^2 โดยทำจากแผ่นสังกะสีขึ้นรูป และยกขอบหนา 1.5 cm เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm เพื่อให้โปร่ง โดยทั้งสามถาดจะผูกติดกันด้วยเส้นลวด และแขวนอิสระอยู่บนเครื่องชั่งดิจิตอล โดยที่เครื่องชั่งวางอยู่บนตู้อบแห้ง อบแห้งผลหมากได้ครั้งละ 2.4 กิโลกรัม ด้านข้างของตู้อบแห้งมีท่อให้อากาศร้อนไหล เข้า-ออก ตู้อบแห้ง ลักษณะเป็นกรวยสี่เหลี่ยมเพื่อช่วยในการกระจายอากาศร้อน ลักษณะตู้อบแห้งแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

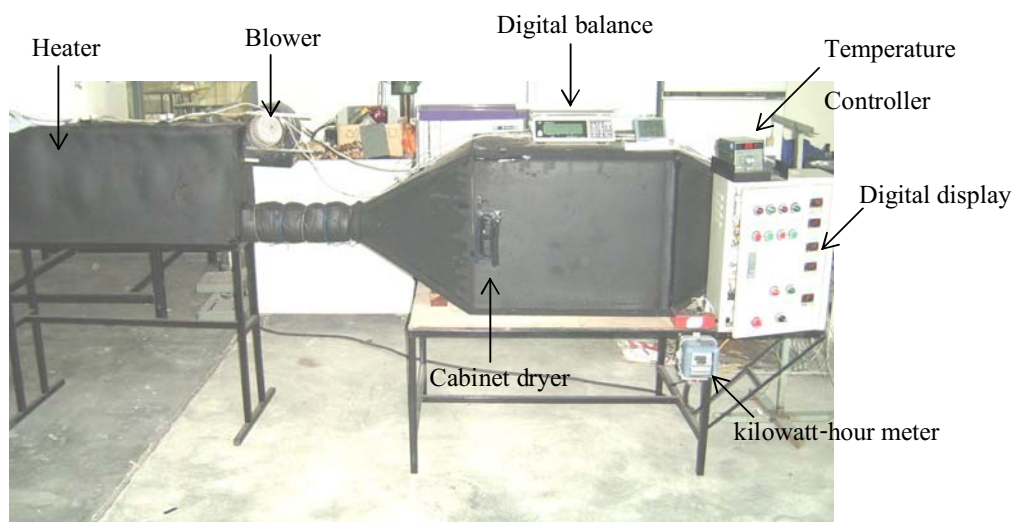
(4) พัดลมเป่าอากาศ (Blower) ที่ใช้ในการทดลองยี่ห้อ Camyork มีขนาดกำลัง 120 W แรงเคลื่อน 220 V ความถี่ 50 Hz ความเร็วรอบ 2,800 RPM ทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกเข้าสู่กล่องฮีตเตอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน และเป่าอากาศร้อนไหลเข้าตู้อบแห้ง สามารถควบคุมความเร็วของอากาศในตู้อบแห้งโดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลมด้วยอุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้า ลักษณะพัดลมเป่าอากาศแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

(5) เครื่องชั่งดิจิตอล (Digital balance) ที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อ Excell พิกัด 6 kg ความละเอียด 0.2 กรัม ใช้ชั่งหมากระหว่างการทดลอง เครื่องชั่งดิจิตอลแสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3

(6) เครื่องวัดความเร็วอากาศแบบใบพัด (Vane Type Anemometer) ที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อ Digicon รุ่น DA-43 ความละเอียด 0.1 m/s ใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งคำนวณจากความเร็วเฉลี่ยของอากาศ คูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่ออากาศที่ใช้วัดความเร็ว

(7) มาตรวัดไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) ที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อ Mitsubishi ชนิด single-phase สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับ Heater และที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ของพัดลม

(8) เครื่องมือวัดอุณหภูมิและอุปกรณ์แสดงผล ที่ใช้ในการทดลอง เทอร์โมคัปเปิลชนิด เค (Thermocouple type K) และอุปกรณ์แสดงผล (Digital display) ยี่ห้อ OMRON รุ่น E5cs-R1KJ ความละเอียด 1°C เพื่อใช้แสดงผลของอุณหภูมิ อุปกรณ์แสดงผลแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

3.1.2 วิธีการทดลอง

แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การอบแห้งผลหมาก และขั้นตอนที่ 2 การอบแห้งเมล็ดหมาก

ขั้นตอนที่ 1 การอบแห้งผลหมาก

ผลหมากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 63 %(wb) อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 49 %(wb) (ที่ค่าความชื้นดังกล่าว ผลหมากแห้งระดับหนึ่ง เปลือกและเมล็ดหมากเกิดการหดตัว เมล็ดหมากจะล่อนออกจากเปลือก สามารถแกะเมล็ดออกจากเปลือกได้ง่าย)

(1) ติดตั้งเครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัดดังรูปที่ 3.3

(2) เตรียมวัสดุคิบบอบแห้ง ผลหมากผ่าออก 2 ซีกเท่าๆกัน แล้วนำเข้าตู้อบแห้ง โดยวางบนถาดอบแห้งทั้งสามถาดแบบชั้นบาง เปิดสวิตช์พัดลมเป่าอากาศ และปรับความเร็วรอบมอเตอร์พัดลมเป่าอากาศให้ได้ความเร็วอากาศในตู้อบแห้งตามค่าที่กำหนด ปิดประตูเครื่องอบแห้ง แล้วจึงเปิดเบรกเกอร์ของชุดควบคุมอุณหภูมิ และตั้งค่าอุณหภูมิตามที่กำหนด เปิดสวิตช์เครื่องชั่งดิจิทัลเพื่อชั่งหมากตลอดการทดลอง

(3) ปรับสภาวะการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆดังนี้ (แสดงดังตารางที่ 3.1)

(3.1) ศึกษาอุณหภูมิอบแห้งโดยแปรค่า 5 ค่า คือ 50, 55, 60, 65 และ 70°C

(3.2) ศึกษาความเร็วอากาศอบแห้งโดยแปรค่า 4 ค่า คือ 1, 2, 3 และ 4 m/s

(4) บันทึกข้อมูลระหว่างทำการทดลอง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลหมาก ในการบันทึกแต่ละครั้งจะต้องปิดเบรกเกอร์ ให้เครื่องอบแห้งหยุดทำงานเพื่อให้เครื่องชั่งไม่สั่นสะเทือน และการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยบันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง

(5) แกะเมล็ดหมากออกจากเปลือก เมื่อน้ำหนักหมากถึงค่าที่กำหนด โดยปิดเบรกเกอร์ควบคุมอุณหภูมิ นำหมากออกจากตู้อบ และแกะเมล็ดออกจากเปลือก เพื่อนำไปอบแห้งในขั้นตอนที่ 2 เป็นลำดับต่อไป ขั้นตอนการทดลองศึกษาการอบแห้งผลหมาก แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก)

ขั้นตอนที่ 2 การอบแห้งเมล็ดหมาก

ในขั้นตอนนี้อบแห้งเมล็ดหมาก จากขั้นตอนที่ 1 ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 32 %(wb) อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้าย 12 %(wb) ตามมาตรฐานของ มพช. 1060/2548

(1) ติดตั้งเครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัด ดังรูปที่ 3.3

(2) เตรียมวัสดุคิบบอบแห้ง นำเมล็ดหมากวางบนถาดอบแห้งทั้งสามถาดแบบชั้นบาง เปิดสวิตช์พัดลมเป่าอากาศ และปรับความเร็วรอบมอเตอร์พัดลมเป่าอากาศให้ได้ค่าความเร็วอากาศในตู้อบแห้งตามค่าที่กำหนด ปิดประตูเครื่องอบแห้ง เปิดเบรกเกอร์ของชุดควบคุมอุณหภูมิ และปรับตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนด เปิดสวิตช์เครื่องชั่งดิจิทัลเพื่อชั่งหมากตลอดการทดลอง

(3) ปรับสภาวะการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆดังนี้ (แสดงดังตารางที่ 3.1)

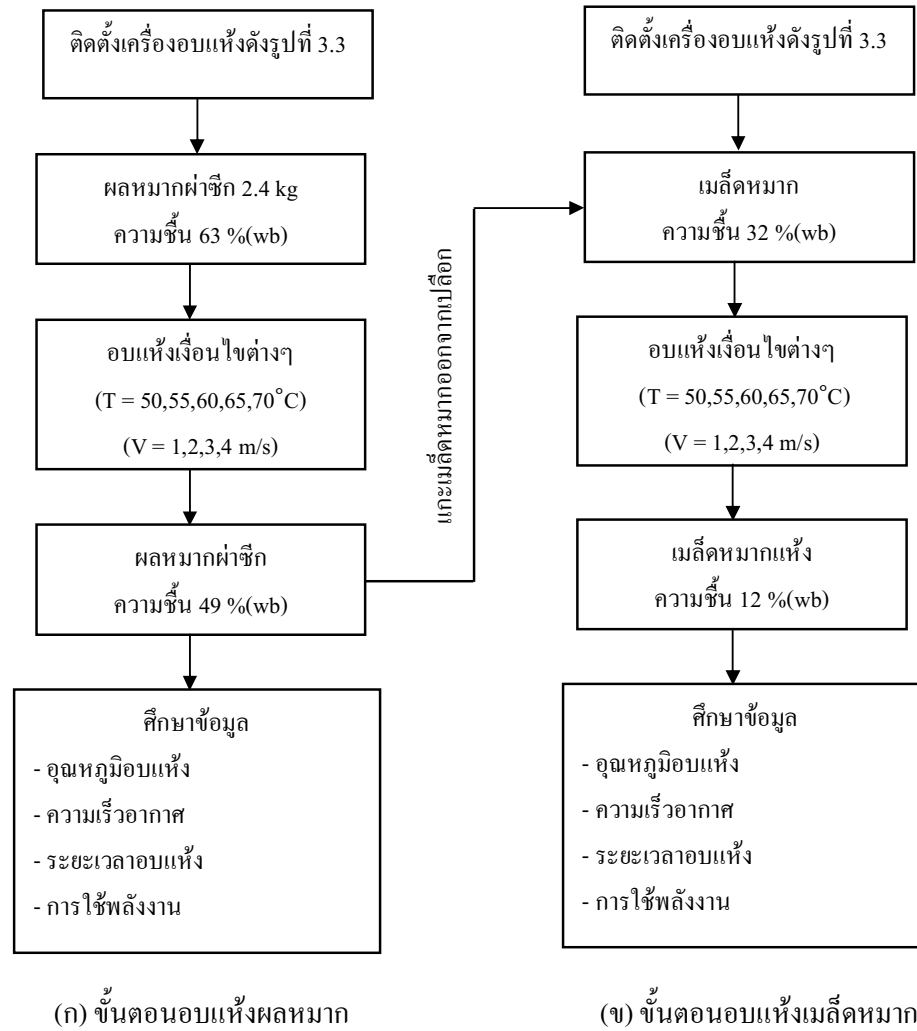
(3.1) ศึกษาอุณหภูมิอบแห้งโดยแปรค่า 5 ค่า คือ 50, 55, 60, 65 และ 70°C

(3.2) ศึกษาความเร็วอากาศอบแห้ง โดยแปรค่า 4 ค่า คือ 1, 2, 3 และ 4 m/s

(4) บันทึกข้อมูลระหว่างทำการทดลอง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเมล็ดหมาก ในการบันทึกแต่ละครั้งจะต้องปิดเบรกเกอร์ ให้เครื่องอบแห้งหยุดทำงานเพื่อให้เครื่องชั่งไม่สั่นสะเทือน และบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยบันทึกค่าทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง ขั้นตอนการทดลองศึกษาการอบแห้งเมล็ดหมาก แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก)

ตารางที่ 3.1 การศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมในการอบแห้งหมาก

การทดลองที่	อุณหภูมิ (°C)	ความเร็ว อากาศ (m/s)	มวลผล หมาก (kg)	ความชื้นผล หมาก (%wb)		ความชื้นเมล็ด หมาก (%wb)	
				เริ่มต้น	สุดท้าย	เริ่มต้น	สุดท้าย
1	50	1	2.4	63	49	32	12
2	50	2	2.4	63	49	32	12
3	50	3	2.4	63	49	32	12
4	50	4	2.4	63	49	32	12
5	55	1	2.4	63	49	32	12
6	55	2	2.4	63	49	32	12
7	55	3	2.4	63	49	32	12
8	55	4	2.4	63	49	32	12
9	60	1	2.4	63	49	32	12
10	60	2	2.4	63	49	32	12
11	60	3	2.4	63	49	32	12
12	60	4	2.4	63	49	32	12
13	65	1	2.4	63	49	32	12
14	65	2	2.4	63	49	32	12
15	65	3	2.4	63	49	32	12
16	65	4	2.4	63	49	32	12
17	70	1	2.4	63	49	32	12
18	70	2	2.4	63	49	32	12
19	70	3	2.4	63	49	32	12
20	70	4	2.4	63	49	32	12



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก
โดยใช้เครื่องอบขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง

การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ห้องอบแห้ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวล โดยออกแบบให้มีน้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก และใช้วัสดุที่หาได้ง่าย (รายละเอียดการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง แสดงในบทที่ 4)

3.2.1 แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (Solar collector)

แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย ออกแบบและสร้างเป็นชนิดแผ่นเรียบ ประกอบด้วย ชั้นอากาศนิ่ง พื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ขนาด 4 m^2 มีกระจกใสปิดหนึ่งชั้นหนา 5 mm แผ่นดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ ทำจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 mm พ่นด้วยสีดำด้าน ระหว่างแผ่นเหล็กกับกระจกมีช่องว่างอากาศนิ่ง 3 cm และช่องว่างอากาศไหลอยู่ส่วนล่างของแผงรับรังสี มีขนาด 4 cm ด้านล่างบุด้วยแผ่นไม้อัดหนา 1 cm วางเป็นพื้นล่างสุด ต่อมาเป็นโฟมหนา 2.5 cm แล้ววางทับด้วยแผ่นยิปซัมอีก 1 ชั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน (ดูรูปที่ 4.6 ประกอบ)

3.2.2 ห้องอบแห้ง (Cabinet dryer)

ห้องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย ออกแบบและสร้างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $1 \times 0.9 \times 0.75 \text{ m}^3$ โดยอากาศร้อนจะไหลขนานกับชั้นวางผลิตภัณฑ์ มีจำนวน 6 ชั้น ผนังห้องอบแห้งทำด้วยสังกะสี และบุด้วยโฟมเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ท่อสำหรับให้อากาศไหล เข้า-ออก ห้องอบแห้งออกแบบให้มีลักษณะเป็นกรวย เพื่อให้เกิดการกระจายอากาศทั่วห้องอบแห้ง (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

3.2.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวล (Heat exchanger and Biomass furnace)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ shell and tube โครงสร้างของ tube ทำจากท่อเหล็กขนาด 1 1/2 นิ้ว shell ทำจากแผ่นเหล็กม้วนเป็นรูปทรงกระบอก โดยที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งอยู่ส่วนบนของเตาเผาชีวมวล และในส่วนของเตาเผาชีวมวลทำด้วยเหล็กแผ่นหนา 3 mm ม้วนเป็นทรงกระบอกกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 m สูง 0.4 m ผนังเตาบุด้วยดินผสมทรายโดยรอบ เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ห้องเผาไหม้สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป เช่น เปลือกหมาก กะลามะพร้าว ไม้พิน เป็นต้น (ดูรูปที่ 4.8 ประกอบ)

3.3 การทดลองเครื่องอบแห้ง

การทดลองเครื่องอบแห้งมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ที่พัฒนาขึ้น จะเลียนแบบการทดลองการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก โดยใช้ผลหมาก 40 kg ผ่า 2 ซีก เป็นวัตถุดิบอบแห้ง กำหนดการทดลองเป็น 3 แบบ ได้แก่ การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล โดยแต่ละแบบแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การทดลองอบแห้งผลหมาก และขั้นตอนที่ 2 การทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

3.3.1 การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว (Solar drying)

การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว เพื่อศึกษา อุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาอบแห้ง การใช้พลังงานจำเพาะ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพของหมากแห้ง ทำการทดลองวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสไม่มีเมฆฝน ในช่วงเวลา 8.00-17.00 น.

ขั้นตอนที่ 1 การทดลองอบแห้งผลหมาก

(1) ติดตั้งเครื่องอบแห้ง และเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิไพรานอมิเตอร์ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.6 เปิด Butterfly valve (V1) และปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(2) เตรียมวัตถุดิบอบแห้ง โดยผ่าผลหมาก และบรรจุใส่ถาดอบแห้งจำนวน 6 ถาด และนำตัวอย่างหมากใส่ในตะแกรงตัวอย่าง จำนวน 6 ตะแกรงๆละประมาณ 600 g เพื่อไว้ชั่งน้ำหนักหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการทดลอง นำตะแกรงตัวอย่างแต่ละตะแกรงวางไว้ตรงกึ่งกลางของถาดอบแห้งแต่ละถาด และนำเข้าห้องอบแห้ง

(3) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง ด้วยการควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(4) บันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้น ที่ทางด้านเข้าห้องอบแห้ง ในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม อากาศทางด้านออกของเครื่องอบแห้ง และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทุกๆ 1 นาที และ

บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลหมากในตะแกรงตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมงตลอดการทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลใช้คำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น

(5) ในระหว่างวันที่ทำการทดลอง ถ้าความชื้นในตะแกรงตัวอย่างยังไม่ถึงค่าที่กำหนดประมาณ 49 %(wb) เมื่อถึงเวลา 17.00 น. ให้หยุดการทดลอง ทำการปิดอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า เช่น พัดลมเป่าอากาศ อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ และใช้ผ้าใบคลุมเครื่องอบแห้งเพื่อป้องกันความชื้นในอากาศซึมเข้าสู่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์และห้องอบแห้ง เมื่อถึงเวลา 8.00 น. ของวันต่อมาจึงทำการทดลองอบผลหมากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จนหมากในถาดตัวอย่างมีความชื้นลดเหลือประมาณ 49 %(wb) จึงหยุดการทดลอง และนำผลหมากออกจากห้องอบแห้ง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหย

(6) แกะเมล็ดหมากออกจากเปลือก และชั่งน้ำหนักเมล็ดหมาก บันทึกผล สุ่มตัวอย่างเมล็ดหมากจำนวน 3 ตัวอย่างๆละประมาณ 50 g เพื่อนำไปอบหาค่าความชื้น ขั้นตอนการทดลองอบผลหมากสุกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 3.5 ก

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

(1) ติดตั้งเครื่องอบแห้ง และเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิไพรานอมิเตอร์ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.6 เปิด Butterfly valve (V1) และปิด Butterfly valve (V2)

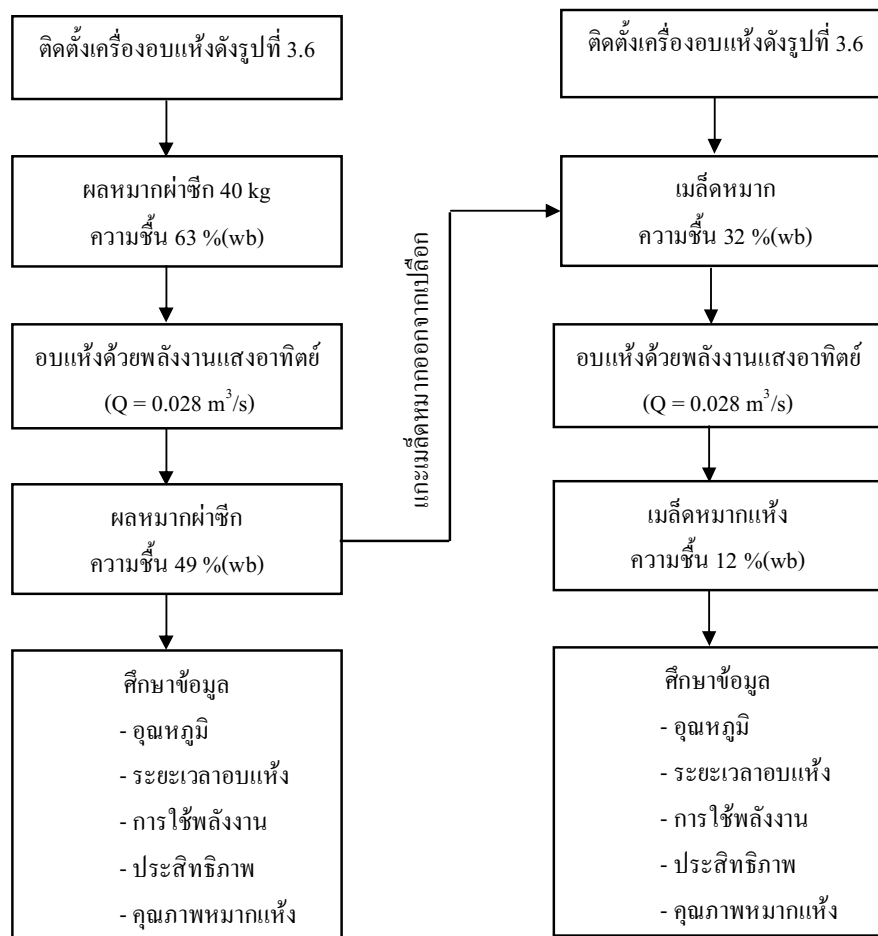
(2) เตรียมวัสดุคูปอบแห้ง เมล็ดหมากจากขั้นตอนที่ 1 บรรจุใส่ถาดอบแห้งจำนวน 6 ถาด และนำตัวอย่างหมากใส่ในตะแกรงตัวอย่าง จำนวน 6 ตะแกรงๆละประมาณ 200 g เพื่อไว้ชั่งน้ำหนักหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการทดลอง นำตะแกรงตัวอย่างแต่ละตะแกรงวางไว้ตรงกึ่งกลางของถาดอบแห้งแต่ละถาด และนำเข้าห้องอบแห้ง

(3) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ (Q) ในห้องอบแห้ง โดยควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(4) บันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้น ที่ทางด้านเข้าห้องอบแห้ง ในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม อากาศทางด้านออกของเครื่องอบแห้ง และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทุกๆ 1 นาที และบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลหมากในตะแกรงตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมงตลอดการทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลใช้คำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น

(5) ในระหว่างวันที่ทำการทดลอง ถ้าความชื้นในตะแกรงตัวอย่างยังไม่ถึงค่าที่กำหนดประมาณ 12 %(wb) เมื่อถึงเวลา 17.00 น. ให้หยุดการทดลอง ทำการปิดอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า

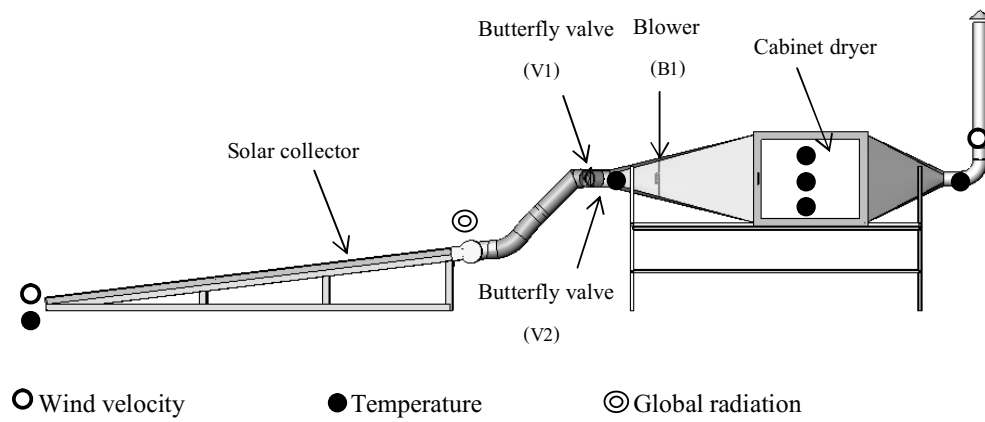
เช่น พัดลม อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ และใช้ผ้าใบคลุมเครื่องอบแห้งเพื่อป้องกันความชื้นในอากาศซึมเข้าสู่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์และห้องอบแห้ง เมื่อถึงเวลา 8.00 น. ของวันต่อมาจึงทดลองอบแห้งเมล็ดหมากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จนหมากในถาดตัวอย่างมีความชื้น 12 % (wb) จึงหยุดการทดลอง และนำเมล็ดหมากออกจากห้องอบแห้ง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหย และสุ่มตัวอย่างจำนวน 300 g เพื่อใช้วิเคราะห์ ความชื้น สี water activity (a_w) และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมดด้วยสเตรอรา ขั้นตอนการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก แสดงดังรูปที่ 3.5 ข



(ก) ขั้นตอนการอบแห้งผลหมาก

(ข) ขั้นตอนการอบแห้งเมล็ดหมาก

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว



รูปที่ 3.6 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว



รูปที่ 3.7 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

3.3.2 การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

(Biomass drying)

การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ทำการทดลองในช่วงเวลากลางคืน หรือช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ใช้พืนจากไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาเพื่อศึกษา อุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาอบแห้ง การใช้พลังงาน ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพของหมากแห้ง

ตอนที่ 1 การทดลองอบแห้งผลหมาก

(1) ติดตั้งเครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 3.9 ปิด Butterfly valve (V1) และเปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(2) เตรียมวัตถุดิบอบแห้ง โดยผ่าผลหมาก 2 ซีก และบรรจุในถาดอบแห้งจำนวน 6 ถาด และนำตัวอย่างหมากใส่ตะแกรงตัวอย่าง จำนวน 6 ตะแกรงๆละประมาณ 600 g เพื่อเอาไว้ชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นระหว่างการทดลอง และนำตะแกรงตัวอย่างแต่ละตะแกรงวางไว้ตรงกึ่งกลางของถาดอบแห้ง

(3) จุดไฟในเตาเผาชีวมวลด้วยพืนจากไม้ยางพารา ก่อนบรรจุวัตถุดิบเข้าห้องอบแห้งประมาณ 30 นาที

(4) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ (Q) ที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) และ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(5) บันทึกข้อมูลระหว่างการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้ง ในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม ทุกๆ 1 นาที และบันทึกอุณหภูมิก๊าซร้อนในห้องเผาไหม้ และที่ปล่องระบายควัน อากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทุกๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง

(6) ชั่งน้ำหนักหมากในตะแกรงตัวอย่าง และปริมาณการใช้พืน ทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง

(7) การทดลองอบผลหมากด้วยพลังงานชีวมวล เมื่อความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 49 % (wb) ให้หยุดการทดลอง ทำการปิดอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า เช่น พัดลม อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ และนำผลหมากออกจากห้องอบแห้ง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหย และกะ

เมล็ดออกจากเปลือก สุ่มตัวอย่างเมล็ดหมากประมาณ 50 g เพื่อหาค่าความชื้น ขั้นตอนการทดลองอบผลหมาก แสดงดังรูปที่ 3.8 ก

ตอนที่ 2 การทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

(1) ติดตั้งเครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 3.9 ปิด Butterfly valve (V1) และเปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(2) เตรียมวัสดุคอบแห้ง เมล็ดหมากจากตอนที่ 1 บรรจุใส่ถาดอบแห้งจำนวน 6 ถาด และนำตัวอย่างเมล็ดหมากใส่ในตะแกรงตัวอย่างจำนวน 6 ตะแกรงๆละประมาณ 200 g เพื่อชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างทดลอง นำตะแกรงตัวอย่างแต่ละตะแกรงวางไว้ตรงกึ่งกลางของถาดอบแห้งแต่ละถาด

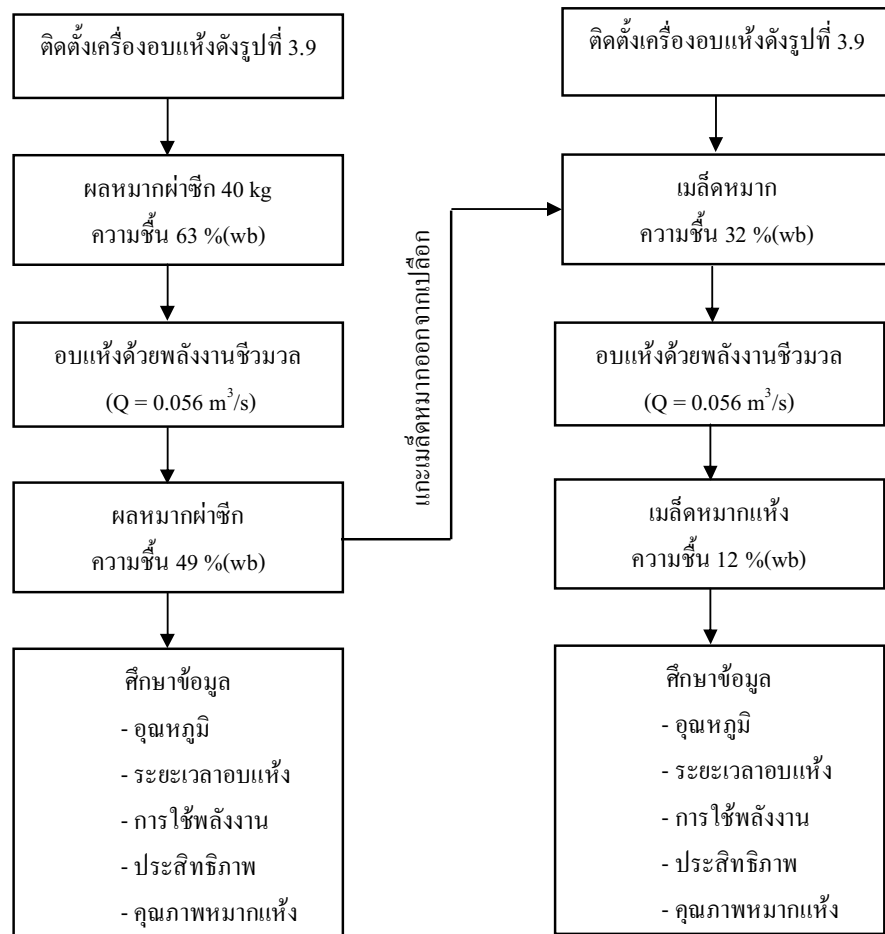
(3) จุดไฟในเตาเผาชีวมวลด้วยฟืนจากไม้ยางพารา ก่อนบรรจุวัสดุคอบแห้งเข้าห้องอบแห้งประมาณ 30 นาที

(4) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ (Q) ที่เข้าสู่ห้องอบแห้ง โดยควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) และ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(5) บันทึกข้อมูลระหว่างการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศทางด้าน เข้า-ออก ห้องอบแห้ง ในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม ทุกๆ 1 นาที และบันทึกอุณหภูมิก๊าซร้อนในห้องเผาไหม้ และที่ปล่องระบายควัน อากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทุกๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง

(6) ชั่งน้ำหนักหมากในตะแกรงตัวอย่าง และปริมาณการใช้ฟืน ทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง

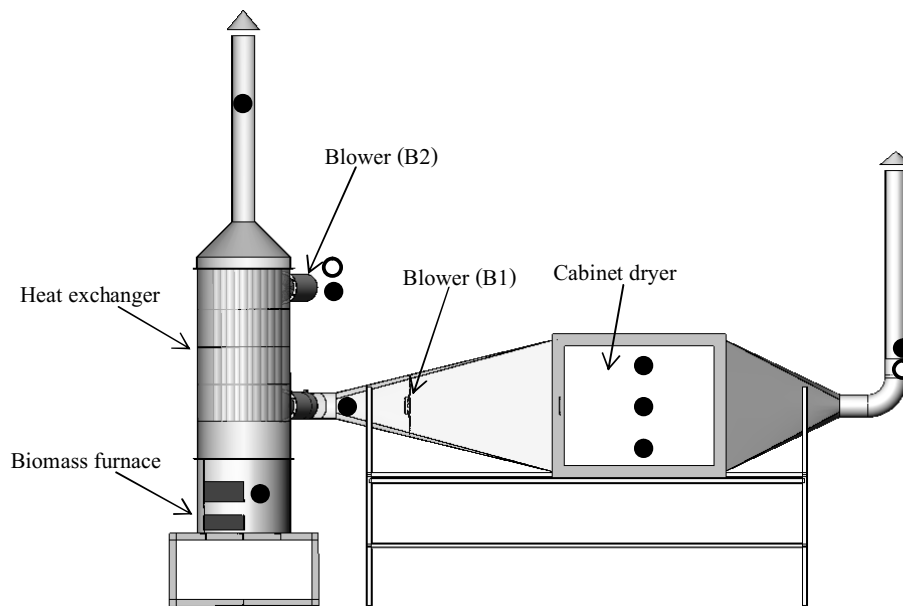
(7) การทดลองอบแห้งเมล็ดหมากด้วยพลังงานชีวมวล เมื่อความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 12 % (wb) จึงหยุดการทดลอง และนำเมล็ดหมากออกจากห้องอบแห้ง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหย และสุ่มตัวอย่างเมล็ดหมากแห้งจากการทดลองจำนวน 300 g เพื่อใช้วิเคราะห์ความชื้น สี water activity (a_w) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมดและยีสต์และรา ขั้นตอนการทดลองอบเมล็ดหมาก แสดงดังรูปที่ 3.8 (ข)



(ก) ขั้นตอนอบแห้งผลหมาง

(ข) ขั้นตอนอบแห้งเมล็ดหมาง

รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งหมางโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดี่ยว



○ Air velocity

● Air Temperature

รูปที่ 3.9 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว



รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

3.3.3 การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

(Solar and Biomass drying)

การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เพื่อศึกษา อุณหภูมิอบแห้ง ระยะเวลาอบแห้ง การใช้พลังงาน ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผา ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ เครื่องอบ และคุณภาพของหมากแห้ง ในช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เลือกว่าวันที่ท้องฟ้า แจ่มใสไม่มีเมฆฝน โดยทำการทดลองในช่วงเวลา 8.00–17.00 น. และช่วงการอบด้วยพลังงาน ชีวมวล ทำการทดลองในเวลากลางวัน หรือช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 1 การทดลองอบแห้งผลหมาก

(1) อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งเครื่องอบแห้ง และเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ ไพรานอมิเตอร์ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.12 เปิด Butterfly valve (V1) และปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(2) เตรียมวัตถุดิบอบแห้ง โดยผ่าผลหมาก และบรรจุใส่ถาดอบแห้งจำนวน 6 ถาด และนำตัวอย่างหมากใส่ในตะแกรงตัวอย่าง จำนวน 6 ตะแกรงๆ ละประมาณ 600 g เพื่อไว้ชั่ง น้ำหนักหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการทดลอง นำตะแกรงตัวอย่างแต่ละตะแกรงวาง ไว้ตรงกึ่งกลางของถาดอบแห้งแต่ละถาด และนำเข้าห้องอบแห้ง

(3) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ (Q) ที่เข้าห้องอบแห้ง ด้วยการควบคุม ความเร็วรอบของ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(4) บันทึกอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้ง อากาศ แวดล้อม และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทุกๆ 1 นาที

(5) ชั่งตัวอย่างหมากในตะแกรงตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง เพื่อใช้ คำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้น ทำการทดลองจนถึงเวลา 17.00 น. และทำการอบ ต่อเนื่องด้วยพลังงานความร้อนจากชีวมวล

(6) อบด้วยพลังงานชีวมวล ติดตั้งเครื่องอบแห้ง และเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์ วัดความชื้นและอุณหภูมิ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 3.12 ปิด Butterfly valve (V1) และเปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(7) จุดไฟในเตาเผาชีวมวลด้วยฟืนจากไม้ยางพารา และควบคุมอัตราการไหลของอากาศในห้องอบแห้ง โดยควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) และ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(8) บันทึกข้อมูลระหว่างการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศทางด้านเข้า-ออกห้องอบแห้ง ในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม ทุกๆ 1 นาที และบันทึกอุณหภูมิอากาศร้อนในห้องเผาไหม้ อากาศเสียที่ปล่อยระบายควัน อากาศเย็นไหล เข้า-ออก จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทุกๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง

(9) ชั่งน้ำหนักหมักในตะแกรงตัวอย่าง และปริมาณการใช้ฟืน ทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง

(10) การทดลองอบแห้งผลหมักด้วยพลังงานชีวมวล เมื่อค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 49 % (wb) จึงหยุดการทดลอง ทำการปิดอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า เช่น พัดลม อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ และนำผลหมักออกจากห้องอบแห้ง ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหย และแกะเมล็ดออกจากเปลือก สุ่มตัวอย่างเมล็ดหมักประมาณ 50 g เพื่ออบหาค่าความชื้น ขั้นตอนการทดลองอบแห้งผลหมัก แสดงผังรูปที่ 3.12 ก

ขั้นตอนที่ 2 การทดลองอบแห้งเมล็ดหมัก

(1) อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ติดตั้งเครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิ ไพรานอมิเตอร์ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.12 เปิด Butterfly valve (V1) และปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(2) เตรียมวัตถุดิบอบแห้ง เมล็ดหมักจากตอนที่ 1 บรรจุในถาดอบแห้งจำนวน 6 ถาด และนำตัวอย่างเมล็ดหมักใส่ในตะแกรงตัวอย่าง จำนวน 6 ตะแกรงๆ ละประมาณ 200 g ใส่วัสดุชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้น และนำตะแกรงตัวอย่างแต่ละตะแกรงวางไว้ตรงกึ่งกลางของถาดอบแห้งแต่ละถาด และนำเข้าห้องอบแห้ง

(3) ควบคุมอัตราการไหลของอากาศ (Q) ที่เข้าห้องอบแห้ง ด้วยการควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

(4) บันทึกอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม และความชื้นรังสีดวงอาทิตย์ทุกๆ 1 นาที

(5) ชั่งตัวอย่างหมักในตะแกรงตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง ทำการทดลองจนถึงเวลา 17.00 น. และอบต่อเนื่องด้วยพลังงานความร้อนจากชีวมวล

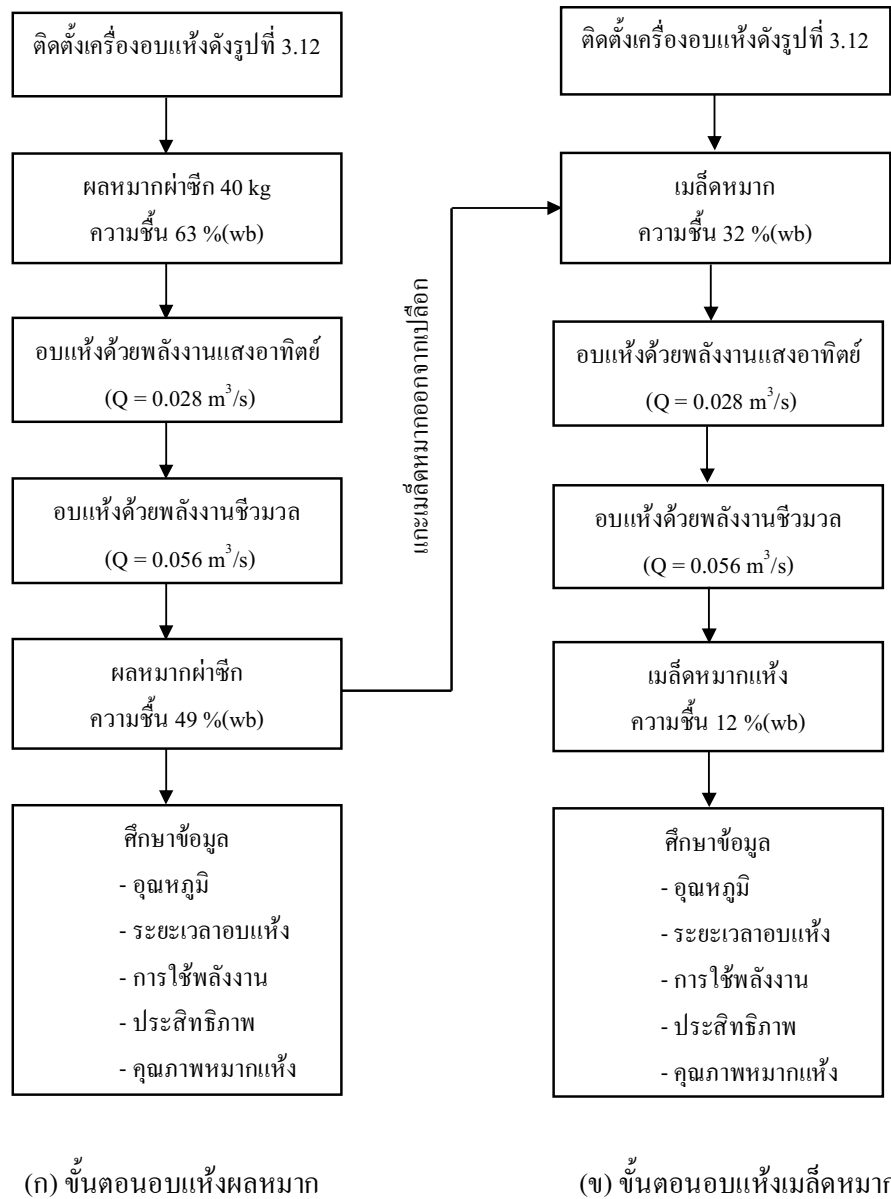
(6) อบรมด้วยพลังงานชีวมวล ติดตั้งเครื่องอบแห้งและเครื่องมือวัด ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ และความชื้น อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ดังรูปที่ 3.12 ปิด Butterfly valve (V1) และ เปิด Butterfly valve (V2) (ดูรูปที่ 4.5 ประกอบ)

(7) จุดไฟในเตาเผาชีวมวล โดยใช้ฟืนจากไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง และควบคุมอัตราการไหลของอากาศในห้องอบแห้ง โดยควบคุมความเร็วรอบของ Blower (B1) และ Blower (B1) ด้วยอุปกรณ์แปลงแรงดันไฟฟ้าให้มีอัตราการไหลเท่ากับ $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$ ตลอดการทดลอง

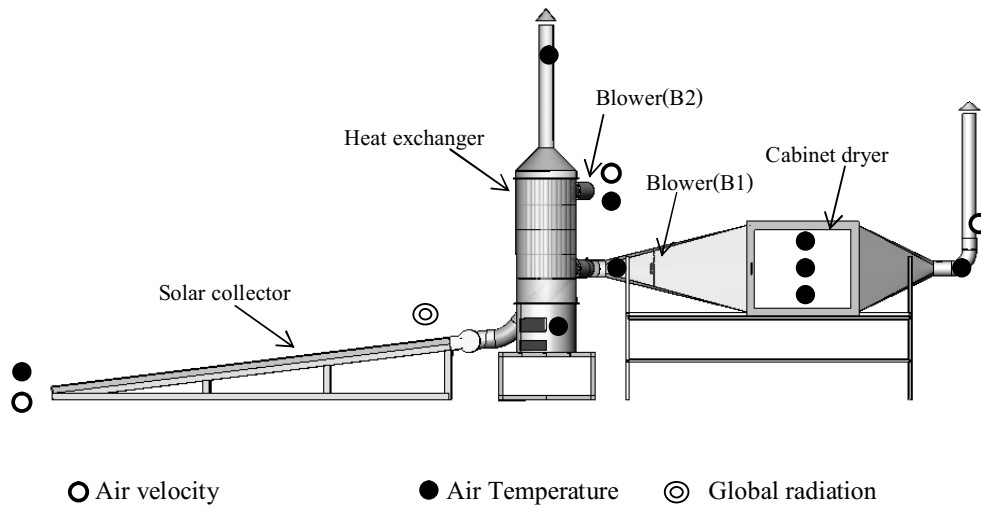
(8) บันทึกข้อมูลระหว่างการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ทางด้านเข้า-ออกห้องอบแห้ง ในห้องอบแห้ง อากาศแวดล้อม ทุกๆ 1 นาที และบันทึกอุณหภูมิก๊าซร้อนในห้องเผาไหม้ และที่ปล่องระบายควัน อากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทุกๆ 5 นาที ตลอดการทดลอง

(9) ชั่งน้ำหนักเมล็ดหมากในตะแกรงตัวอย่าง และปริมาณการใช้ฟืน ทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง

(10) การทดลองอบแห้งเมล็ดหมากด้วยพลังงานชีวมวล เมื่อค่าความชื้นสุดท้าย เท่ากับ 12 % (wb) จึงหยุดการทดลอง ปิดอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า เช่น พัดลมเป่าอากาศ อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ คอมพิวเตอร์ ชั่งเมล็ดหมากเพื่อหาปริมาณน้ำที่ระเหย สุ่มตัวอย่างเมล็ดหมากแห้งจำนวน 300 g เพื่อใช้วิเคราะห์ ความชื้น สี water activity (a_w) ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมดและยีสต์ และรา ขึ้นตอนการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก แสดงดังรูปที่ 3.11 (ข)



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทดลองอบแห้งหามา โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดการทดลองอบแห้งมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล



รูปที่ 3.13 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอบแห้งมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

3.4 การทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง

การทดสอบคุณภาพของหมากแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่พัฒนาขึ้น ด้วยแบบต่างๆ ได้แก่ อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว อบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เปรียบเทียบกับหมากแห้งที่ผลิตโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ พิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมากแห้ง (มพช.1060/2548) โดยมีข้อกำหนดคุณลักษณะต่างๆ แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก

3.4.1 ค่าความชื้น

สุ่มตัวอย่างหมากจำนวน 3 ตัวอย่างในแต่ละการทดลอง ตัวอย่างละ 50 กรัม นำไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995) โดยการอบที่อุณหภูมิ 105°C ด้วยตู้อบไฟฟ้า (Oven) จนน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์และคำนวณหาค่าความชื้น (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

3.4.2 ค่าสี

สุ่มตัวอย่างเมล็ดหมากแห้งจำนวน 3 ตัวอย่าง ในแต่ละการทดลอง ตัวอย่างละ 100 กรัม บดเป็นผงละเอียด นำหมากแห้งผงไปวัดค่าสีด้วยเครื่อง colourimeter ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น ColorFlex 45/0 ใช้ระบบการวัดสีของ CIE Lab ได้ค่า L*, a*, b* โดยทำการวัด 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

3.4.3 ค่า Water activity (a_w)

ตัวอย่างหมากแห้งที่บดละเอียดในแต่ละการทดลอง ทำการวัดค่า water activity ด้วยเครื่องวัดค่า water activity ยี่ห้อ Novasina รุ่น Thermoconstanter โดยทำการวัด 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข)

3.4.4 จำนวนจุลินทรีย์ยีสต์และรา

ตัวอย่างหมากแห้งที่บดละเอียด ทำการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ยีสต์และรา ด้วยเทคนิคการเกลี่ยบนผิวหน้าอาหาร โดยจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ยีสต์และราต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.5 เครื่องมือการวิจัย

(1) เครื่องวัดความเร็วของอากาศแบบใบพัด (Vane Type Anemometer) ยี่ห้อ Digicon รุ่น DA-43 เครื่องมือวัดได้ละเอียด 0.1 m/s ใช้หาอัตราการไหลของอากาศ โดยคำนวณจากความเร็วอากาศเฉลี่ยของอากาศคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อลมบริเวณที่ใช้วัดความเร็ว

(2) เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้น (Humidity Temperature Data Logger) ของบริษัท ThaiExlabs รุ่น DHT-10000M โดยใช้ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิและความชื้น เครื่องมือวัดได้ละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอ่านค่าและบันทึกผลได้ 10 จุด ใช้หาค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ

(3) อุปกรณ์วิเคราะห์ความชื้นประกอบด้วย ตู้อบไฟฟ้า (Oven) ถ้วยหาความชื้น (Moisture can) โถดูดความชื้น (Dessicator) ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995) ของผลหมาก โดยหั่นหมากเป็นชิ้นเล็กๆอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 9-12 ชั่วโมง

(4) เครื่องชั่ง Digital ยี่ห้อ Sartorius ความละเอียด 2 ตำแหน่ง ใช้ชั่งน้ำหนักหมากที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้ง โดยชั่งตัวอย่างหมากทุกๆ 1 ชั่วโมง ตลอดการทดลอง

(5) ไพรานอมิเตอร์ รุ่น CM 3 มีค่า Sensitivity $16.51 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$ ใช้วัดความเข้มรังสีรวม (global radiation) ที่ตกกระทบบน Solar collector

(6) มาตรวัดไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) สำหรับวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ของพัดลมยี่ห้อ Mitsubishi เป็นชนิด single-phase

(7) สายเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K และ Digital Temperature Indicator ยี่ห้อ Primus ความละเอียด 1°C วัดอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน บริเวณทางออกที่ Chimney อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้

3.6 สรุป

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอในส่วนของวัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) ทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแห้งของผลหมาก ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ และความเร็วของอากาศอบแห้ง (2) ทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว (3) ทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว (4) ทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เพื่อศึกษาระยะเวลาการอบแห้ง การใช้พลังงานจำเพาะ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง และคุณภาพของหมากแห้ง

บทที่ 4

การออกแบบระบบอบแห้ง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหา 4 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 ผลการศึกษาพฤติกรรม การแห้งของหมาก ส่วนที่ 2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง ส่วนที่ 3 การออกแบบและสร้าง แหล่งความร้อนเสริม และส่วนที่ 4 กล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง

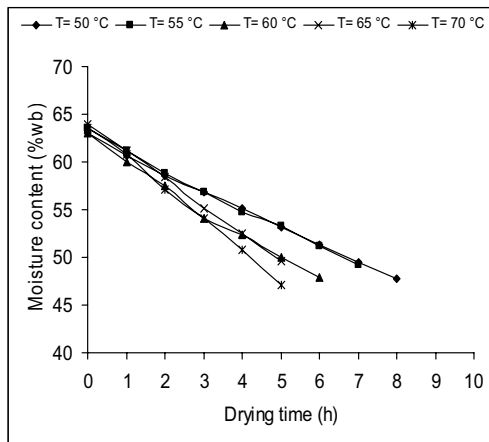
การออกแบบระบบอบแห้ง เริ่มต้นจากการเลือกรูปแบบการอบแห้งที่เหมาะสม สำหรับผลหมาก และออกแบบเครื่องอบแห้งให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง การใช้งานสะดวก เคลื่อนย้ายได้ง่าย และราคาไม่แพง อีกทั้งสามารถใช้วัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรมในท้องถิ่นมาเป็น เชื้อเพลิงชีวมวลในการอบแห้ง เมื่อพิจารณาในส่วนของแหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้อบแห้ง มี แนวคิดที่จะเลือกใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน เพื่อลดการใช้พลังงานจาก ฟอสซิล ทำให้ต้นทุนของเชื้อเพลิงในการอบแห้งลดลง

4.1 ผลการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก

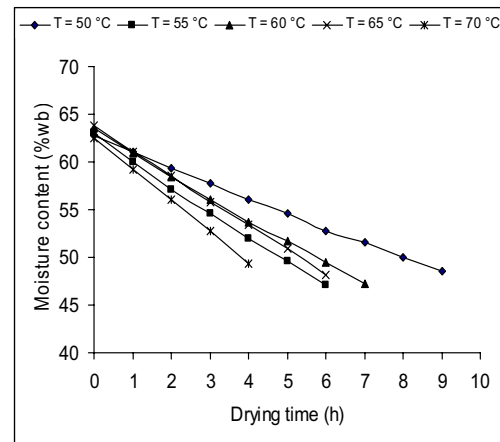
การศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมาก ด้วยเครื่องอบแห้งขนาดเล็ก ใน ห้องปฏิบัติการ โดยรายละเอียดของการทดลองแสดงไว้ในบทที่ 3 มีจุดประสงค์เพื่อหาตัวแปรที่ เหมาะสมในการอบแห้งหมาก เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับกำหนดสภาวะการอบแห้ง และเป็น ข้อมูลในการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ซึ่งผลการทดลองมีดังนี้

4.1.1 ผลการทดลองอบแห้งผลหมาก

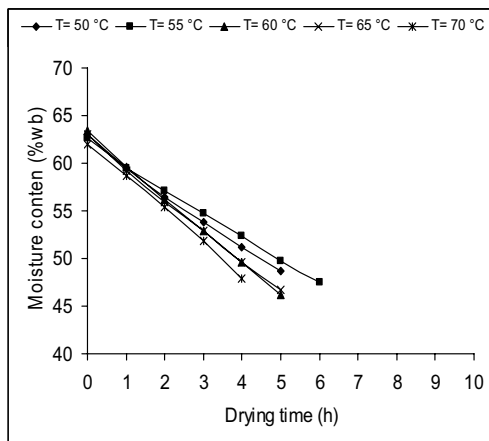
จากการทดลองอบแห้งผลหมากที่ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอบแห้ง 50, 55, 60, 65 และ 70°C เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่าการอบแห้ง ผลหมาก ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูง ประมาณ 63 %(wb) การลดลงของความชื้นค่อนข้าง สม่ำเสมอ ส่งผลให้เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s การลดลงของความชื้นค่อนข้างเร็ว ใช้ระยะเวลาอบแห้งใกล้เคียงกัน คือ 4-5 ชั่วโมง แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C ที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s จะใช้ระยะเวลามากกว่า คือ 6-8 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการลดลงของความชื้นค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับความเร็วอากาศอบแห้ง การลดลงของความชื้นของการอบแห้งผลหมาก แสดงดังรูปที่ 4.1



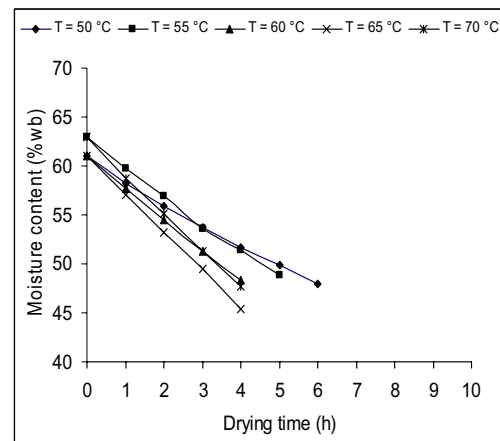
(ก) ความเร็วอากาศ 1 m/s



(ข) ความเร็วอากาศ 2 m/s

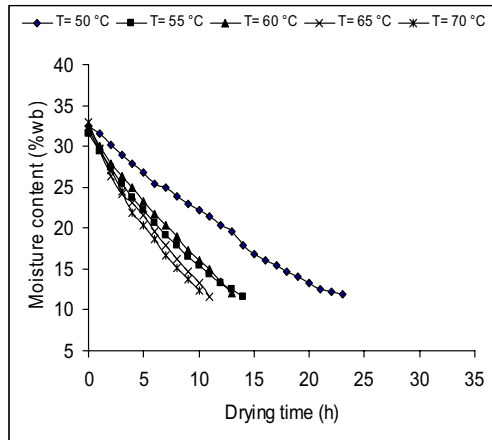


(ค) ความเร็วอากาศ 3 m/s

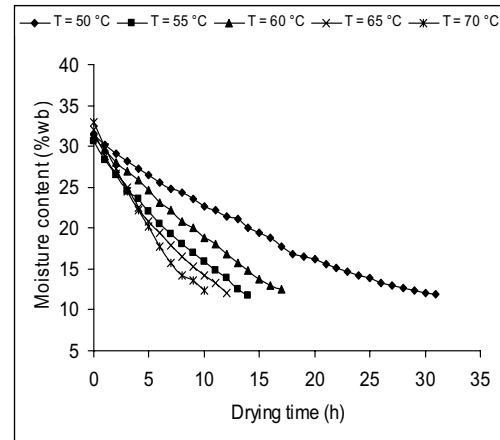


(ง) ความเร็วอากาศ 4 m/s

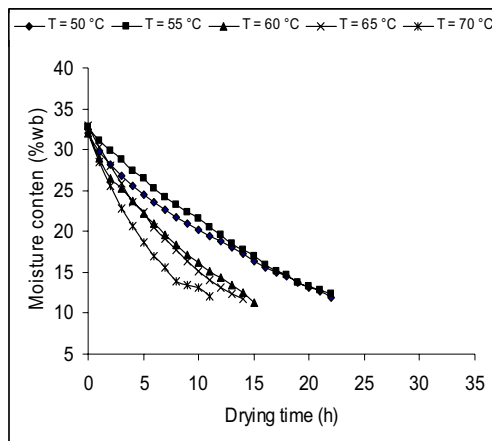
รูปที่ 4.1 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งผลหมากที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C



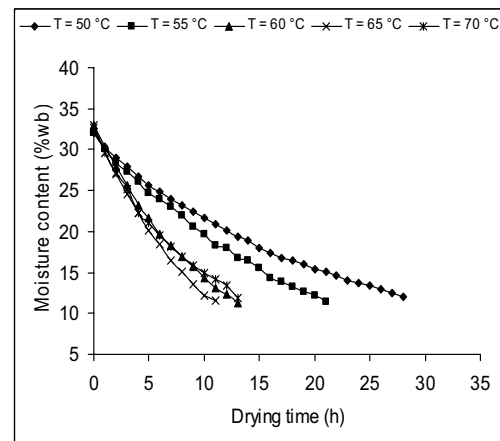
(ก) ความเร็วลม 1 m/s



(ข) ความเร็วลม 2 m/s



(ค) ความเร็วลม 3 m/s



(ง) ความเร็วลม 4 m/s

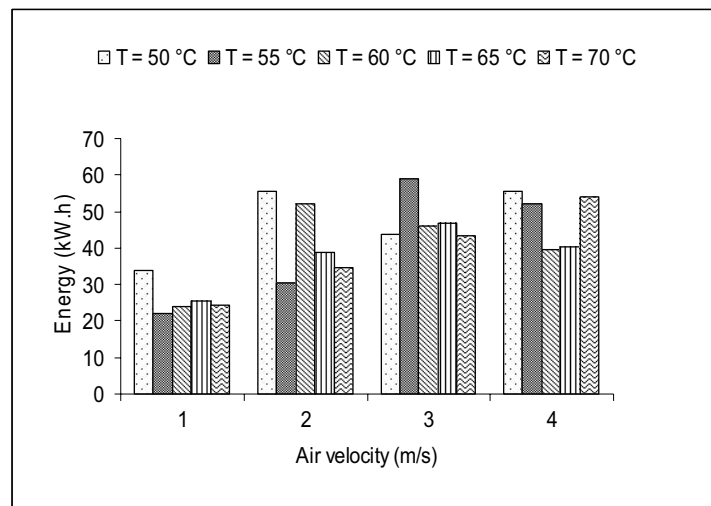
รูปที่ 4.2 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดหมากที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C

4.1.2 ผลการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

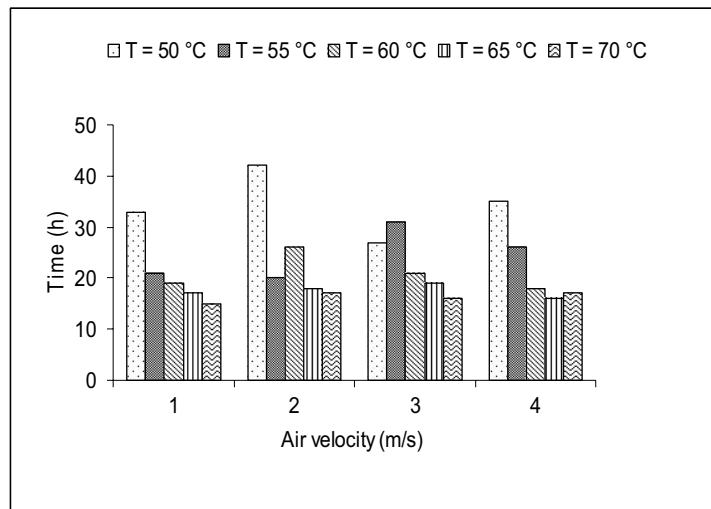
จากผลการศึกษาอบแห้งเมล็ดหมากที่ตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50, 55, 60, 65 และ 70°C จากการทดลองพบว่า เมล็ดหมากมีความชื้นเริ่มต้น ประมาณ 32 %(wb) มีลักษณะเนื้อแน่นและค่อนข้างแข็ง การลดลงของความชื้นจะช้ากว่าการอบผลหมาก การอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C ที่ความเร็วอากาศต่างๆ การลดลงของความชื้นค่อนข้างเร็ว ใช้ระยะเวลาอบแห้งใกล้เคียงกัน 10-11 ชั่วโมง แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 55°C ที่ความเร็วอากาศต่างๆ จะใช้ระยะเวลาอบแห้งค่อนข้างมาก จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อการลดลงของความชื้นค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับความเร็วอากาศอบแห้ง การลดลงของความชื้นของการอบแห้งเมล็ดหมาก แสดงดังรูปที่ 4.2

4.1.3 การใช้พลังงานไฟฟ้า

การใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งผลหมากและเมล็ดหมาก ถ้าพิจารณาจากความเร็วของอากาศอบแห้งที่ค่าต่างๆ ซึ่งจะมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองที่ความเร็วอากาศ 1 m/s มีค่าการใช้พลังงานต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับความเร็วของอากาศค่าอื่นๆ การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในการอบแห้งหมาก แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของการอบแห้งหมาก (ผลหมากและเมล็ดหมาก) ที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70°C



รูปที่ 4.4 เวลารวมของการอบแห้งหมาก (ผลหมากและเมล็ดหมาก) ที่ความเร็วอากาศ 1, 2, 3 และ 4 m/s อุณหภูมิอากาศ 50, 55, 60, 65 และ 70 °C

4.1.4 สรุป

จากผลการทดลองอบแห้งหมากทั้งสองขั้นตอน (ผลหมากและเมล็ดหมาก) ที่ความเร็วและอุณหภูมิอากาศข้างต้น พบว่าเมล็ดหมากแห้งที่ได้มีลักษณะ สี และการแตกร้าวไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์พลังงาน และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 1 m/s มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับที่ความเร็วอากาศค่าอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ในส่วนของระยะเวลาอบแห้ง ในขั้นตอนอบหมาก ที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 2, 3 และ 4 m/s ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 4 ชั่วโมง และที่ความเร็วอากาศ 1 m/s ใช้ระยะเวลาอบแห้ง 5 ชั่วโมง ซึ่งมีระยะเวลาใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ในขั้นตอนอบเมล็ดหมาก ที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 1 และ 2 m/s ใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด คือ 10 ชั่วโมง ดังนั้นที่ความเร็วอากาศ 1 m/s และอุณหภูมิ 70 °C มีการใช้พลังงานต่ำสุด และระยะเวลาอบแห้งน้อย จึงเลือกใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการกำหนดสภาวะการอบแห้ง และใช้ออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานร่วม แสงอาทิตย์และชีวมวล ในลำดับต่อไป

4.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญได้แก่ ห้องอบแห้ง แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวล จากผลการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของหมากในหัวข้อที่ 4.1 อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่เหมาะสมในการอบแห้ง คือ 70°C และ 1 m/s ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยกำหนดให้การอบแห้งเป็นแบบกะ (Batch) เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณวัตถุดิบที่ไม่แน่นอน และสามารถอบหมากได้ครั้งละ 40 kg

4.2.1 การคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระเหย

(1) ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับผลหมาก

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ

ปริมาณผลหมากที่ใช้อบแห้ง	40 kg
ความชื้นเริ่มต้นของผลหมาก	63 %(wb)
ความชื้นสุดท้ายของผลหมาก	49 %(wb)
อุณหภูมิอากาศอบแห้ง	70°C
อุณหภูมิหลังอบแห้ง	55°C
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	33°C
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	5 h

คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับผลหมาก ได้ดังนี้

$$W_f = W_i \times \frac{(100 - M_i)}{(100 - M_f)} \quad (4.1)$$

โดยที่	W_f	คือ	น้ำหนักหมากหลังการอบแห้ง (kg)
	W_i	คือ	น้ำหนักหมากก่อนอบแห้ง (kg)
	M_i	คือ	ความชื้นหมากก่อนอบแห้ง (%wb)
	M_f	คือ	ความชื้นหมากหลังอบแห้ง (%wb)

$$W_f = 40\text{kg} \times \frac{(100 - 63)}{(100 - 49)} = 29 \text{ kg}$$

$$\text{ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับผลหมาก} = 40 \text{ kg} - 29 \text{ kg} = 11 \text{ kg}$$

(2) ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับเมล็ดหมาก

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ

หมากที่ต้องการอบแห้ง	12 kg
ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดหมาก	32 %(wb)
ความชื้นสุดท้ายของเมล็ดหมาก	12 %(wb)
อุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้ง	70 °C
อุณหภูมิอากาศหลังอบแห้ง	60 °C
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	33 °C
เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง	10 h

คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับเมล็ดหมาก ได้ดังนี้

$$W_f = 12\text{kg} \times \frac{(100 - 32)}{(100 - 12)} = 9.27 \text{ kg}$$

$$\text{ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับเมล็ดหมาก} = 12 \text{ kg} - 9.27 \text{ kg} = 2.72 \text{ kg}$$

4.2.2 คำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ออบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ทำการอบแห้งหมาก โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 อบแห้งผลหมาก และขั้นตอนที่ 2 อบแห้งเมล็ดหมาก ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ออบแห้ง จึงแบ่งออกเป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ออบผลหมาก และพลังงานความร้อนที่ใช้ออบเมล็ดหมาก การคำนวณค่าพลังงานความร้อนจะต้องใช้ค่าความความร้อนจำเพาะ (C_p) ของหมากในการคำนวณ จากผลทดสอบค่า C_p ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ค่า C_p ของผลหมากที่ความชื้น 63 %(wb) แบ่งออกเป็นเปลือกหมาก และเมล็ดหมาก เท่ากับ 2.882 และ 0.744 kJ/kg°C ตามลำดับ และค่า C_p ของเมล็ดหมากที่ความชื้น 32 %(wb) เท่ากับ 1.185 kJ/kg°C โดยที่กำหนดให้อุณหภูมิที่สถานะเริ่มต้นและ

สภาวะสุดท้ายของหมากเท่ากับ 25°C และ 70°C ตามลำดับ ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้อบแห้งหมากสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_m = Q_{l,w} + Q_{s,w} + Q_{s,fb} + Q_{s,sb} \quad (4.2)$$

$$Q_{l,w} = m_w h_{fg} \quad (4.3)$$

$$Q_{s,w} = m_w C_{p,w} (T_2 - T_1) \quad (4.4)$$

$$Q_{s,fb} = m_{fb} C_{p,fb} (T_2 - T_1) \quad (4.5)$$

$$Q_{s,sb} = m_{sb} C_{p,sb} (T_2 - T_1) \quad (4.6)$$

โดยที่	Q_m	คือ	ความร้อนรวมที่ให้แก่วัตถุอบแห้ง (kJ)
	$Q_{l,w}$	คือ	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ)
	$Q_{s,w}$	คือ	ความร้อนสัมผัสที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิน้ำ (kJ)
	$Q_{s,fb}$	คือ	ความร้อนสัมผัสที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิเปลือกหมาก (kJ)
	$Q_{s,sb}$	คือ	ความร้อนสัมผัสที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิเมล็ดหมาก (kJ)
	h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (ที่อุณหภูมิ 70°C เท่ากับ 2333.8 kJ/kg)
	m_w	คือ	มวลรวมของน้ำในหมาก (kg)
	m_{fb}	คือ	มวลของเปลือกหมาก (kg)
	m_{sb}	คือ	มวลของเมล็ดหมาก (kg)
	$C_{p,w}$	คือ	ความร้อนจำเพาะของน้ำที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
	$C_{p,fb}$	คือ	ความร้อนจำเพาะของเปลือกหมากที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
	$C_{p,sb}$	คือ	ความร้อนจำเพาะของเมล็ดที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
	T_1	คือ	อุณหภูมิที่สภาวะเริ่มต้นของหมาก ($^{\circ}\text{C}$)
	T_2	คือ	อุณหภูมิที่สภาวะสุดท้ายของหมาก ($^{\circ}\text{C}$)

(1) พลังงานความร้อนที่ใช้อบแห้งผลหมาก

ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับอบแห้งผลหมาก 11 kg (อ้างจากหัวข้อที่ 4.2.1) ผลหมาก 40 kg ความชื้น 63 \% (wb) มีปริมาณน้ำ 25.2 kg เปลือกหมากแห้ง 7.3 kg เมล็ดหมากแห้ง 7.5 kg ค่า C_p ของน้ำที่อุณหภูมิ 70°C เท่ากับ $4.187 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ พลังงานความร้อนที่ใช้อบแห้งผลหมากสามารถคำนวณได้ดังนี้

แทนค่าลงในสมการ (4.2)

$$\begin{aligned} Q_m &= (11 \text{ kg} \times 2333.8 \text{ kJ/kg})_{l,w} + [25.2 \text{ kg} \times 4.187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (70-25)^\circ\text{C}]_{s,w} + \\ &\quad [7.3 \text{ kg} \times 2.882 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (70-25)^\circ\text{C}]_{s,fb} + [7.5 \text{ kg} \times 0.744 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (70-25)^\circ\text{C}]_{s,sb} \\ &= 31,617 \text{ kJ} \end{aligned}$$

อบแห้งให้เสร็จภายใน 5 ชั่วโมงใช้พลังงานความร้อนเท่ากับ 1.75 kW

(2) พลังงานความร้อนที่ใช้ออบแห้งเมล็ดหมาก

ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยสำหรับอบแห้งเมล็ดหมาก 2.72 kg (อ้างจากหัวข้อที่ 4.2.1) ผลหมากที่ผ่านการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อแกะเปลือกออกจะได้เมล็ดหมาก 12 kg ความชื้น 32 % (wb) ซึ่งประกอบด้วยน้ำ 4 kg เมล็ดหมากแห้ง 8 kg พลังงานความร้อนที่ใช้ออบแห้งเมล็ดหมาก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (4.2)} \quad Q_m &= Q_{l,w} + Q_{s,w} + \overset{0}{Q_{s,fb}} + Q_{s,sb} \\ Q_{s,fb} &= 0 \text{ (เนื่องจากไม่มีเปลือกหมาก)} \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} Q_m &= (2.72 \text{ kg} \times 2333.8 \text{ kJ/kg})_{l,w} + [4 \text{ kg} \times 4.187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (70-25)^\circ\text{C}]_{s,w} + \\ &\quad [8 \text{ kg} \times 1.185 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (70-25)^\circ\text{C}]_{s,sb} \\ &= 7,554 \text{ kJ} \end{aligned}$$

อบแห้งให้เสร็จภายใน 10 ชั่วโมงจะใช้พลังงานความร้อนเท่ากับ 0.21 kW

ดังนั้นพลังงานความร้อนรวมที่ใช้ออบแห้งเท่ากับพลังงานความร้อนที่ใช้ออบแห้งผลหมากและพลังงานความร้อนที่ใช้ออบแห้งเมล็ดหมาก $1.75 \text{ kW} + 0.21 \text{ kW} \approx 2 \text{ kW}$

4.2.3 คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้อบแห้ง

ในการออกแบบเครื่องอบแห้งสามารถอบผลหมากรู้ได้ครั้งละ 40 kg แบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 อบผลหมากรู้ครั้งละ 40 kg ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 63 %(wb) อบแห้งจนเหลือความชื้นประมาณ 49 %(wb) จะได้เมล็ดหมากประมาณ 12.5kg ความชื้น 32 %(wb) ขั้นตอนที่ 2 อบเมล็ดหมากจนเหลือความชื้น 12 %(wb) หากกำหนดให้อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ 70°C และอากาศออกจากห้องอบแห้งมีอุณหภูมิ 55°C สามารถคำนวณอัตราการไหลของอากาศได้ดังนี้

$$\dot{m}_a = \frac{m_w h_{fg}}{C_p (T_m - T_f)} \quad (4.7)$$

โดยที่	\dot{m}_a	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
	T_m	คือ	อุณหภูมิอากาศเข้าห้องอบแห้ง (°C)
	T_f	คือ	อุณหภูมิอากาศออกจากห้องอบแห้ง (°C)
	m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
	h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (ที่อุณหภูมิ 70°C มีค่าเท่ากับ 2333.8 kJ/kg)
	C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (ที่อุณหภูมิ 70°C มีค่าเท่ากับ 1.007 kJ/kg °C)

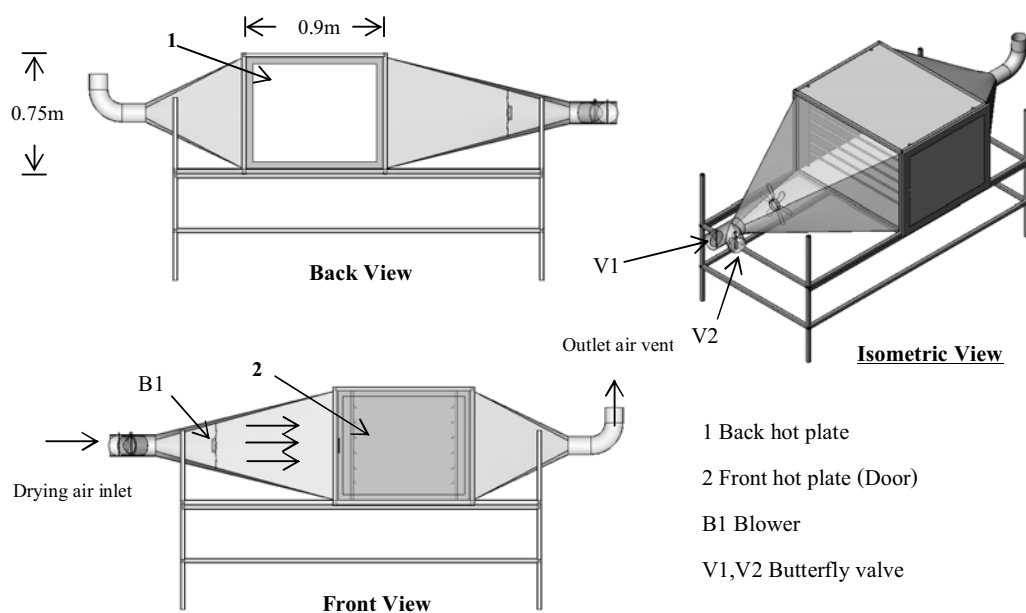
$$\text{แทนค่าลงในสมการ} \quad \dot{m}_a = \frac{(13.72\text{kg})(2333.8\text{kJ/kg})}{(1.007\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(70 - 55)\text{K}} = 2,119.81 \text{ kg}$$

$$\text{ต้องการอบแห้งภายใน 15 ชั่วโมง} = \frac{2,119.81\text{kg}}{(15 \times 60 \times 60)\text{s}}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้อัตราการไหลของอากาศ} = 0.039 \text{ kg/s}$$

4.2.4 การคำนวณและออกแบบห้องอบแห้ง

การคำนวณขนาดห้องอบแห้ง สามารถคำนวณจากปริมาณหมากที่ใช้อบแห้ง จำนวน 40 kg จากการทดลองปริมาณหมากสุกผ่าซีกประมาณ 11 kg ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร ดังนั้นถ้ากำหนดถาดอบแห้งมีขนาด $0.65 \times 0.95 \text{ m}^2$ ดังนั้นหนึ่งถาดสามารถวางหมากได้ประมาณ 6.8 kg เพราะฉะนั้นจะได้จำนวนถาด 6 ถาด และกำหนดช่องว่างระหว่างชั้น 10 เซนติเมตร ดังนั้นห้องอบแห้งมีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $1 \times 0.9 \times 0.75 \text{ m}^3$ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.5 ลักษณะห้องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย

ห้องอบแห้งออกแบบมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ผนังห้องทำด้วยสังกะสี และบุด้วยโฟม หนา 2.5 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน อากาศร้อนจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ และจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะถูกดูดด้วย Blower เข้าสู่ห้องอบแห้งทางท่อด้านเข้าโดยผ่าน Butterfly valve (V1) และ (V2) และผ่านสอปเปอร้เข้าสู่ห้องอบแห้ง และไหลออกจากห้องอบแห้งผ่านทางสอปเปอร้ด้านอากาศออก ซึ่งจะต่ออยู่กับ Chimney ห้องอบแห้งมีชั้นวางถาดอบแห้งซึ่งวางซ้อนกันได้ 6 ถาด ถาดอบแห้งเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ทำด้วยสังกะสีโปรง มีขอบทึบสูง 2 cm ลักษณะของห้องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 4.5

4.2.5 การคำนวณและออกแบบพื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์

พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\dot{m}_a C_p (T_o - T_i) = \eta_c A_c G_t \quad (4.8)$$

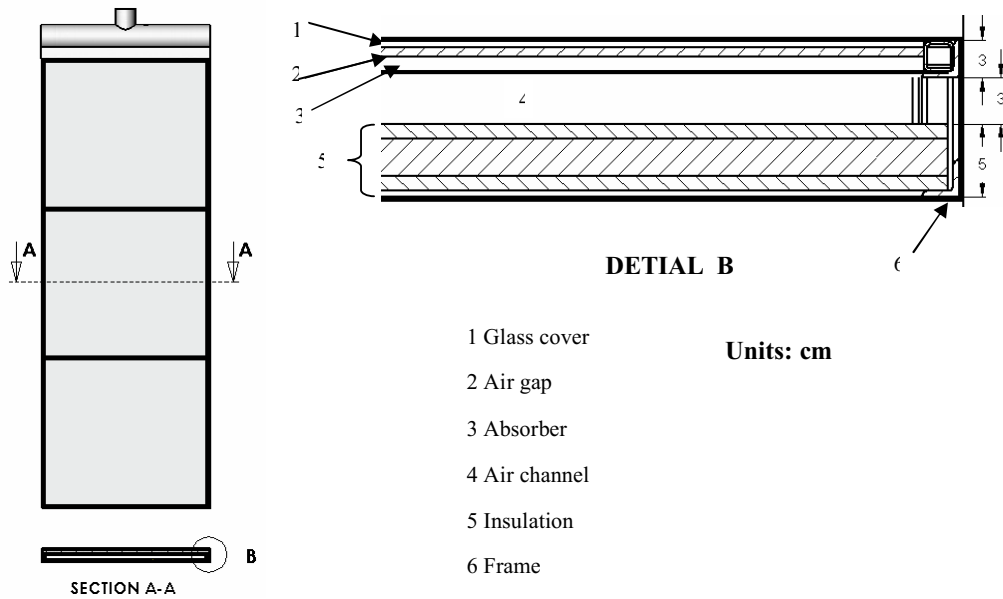
โดยที่	T_o	คือ	อุณหภูมิอากาศที่ทางออกของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
	T_i	คือ	อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
	η_c	คือ	ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (%)
	A_c	คือ	พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m^2)
	G_t	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (W/m^2)

กำหนดให้ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ เท่ากับ 0.6 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ $0.65 \text{ kW}/\text{m}^2$ (โสรจ คีรีเลิศ 2538) อัตราการไหลของอากาศ $0.039 \text{ kg}/\text{s}$ ค่า C_p ของอากาศที่อุณหภูมิ 70°C เท่ากับ $1.007 \text{ kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิตรงทางออก และทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ เท่ากับ 70 และ 33°C ตามลำดับ สามารถคำนวณพื้นที่แผงรับรังสีได้ดังนี้

$$A_c = \frac{(0.039 \text{ kg}/\text{s})(1.007 \text{ kJ}/\text{kg} - \text{K})(70 - 33) \text{ K}}{(0.60)(0.65 \text{ kW}/\text{m}^2)} = 3.75 \text{ m}^2$$

ดังนั้นพื้นที่ของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้กับเครื่องอบแห้งมีขนาดเท่ากับ 3.75 m^2 แต่ในการสร้างจริงกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 4 m^2

แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ออกแบบเป็นชนิดแผ่นเรียบ (Solar flat plate collector) แบบที่มีชั้นอากาศนิ่ง มีพื้นที่รับรังสี 4 m^2 ใช้กระจกใสปิดหนึ่งชั้นหนา 5 mm แผ่นดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์เป็นแผ่นเหล็กพันด้วยสีดำด้าน อากาศจะไหลอยู่ระหว่างแผ่นเหล็กนี้ ระหว่างแผ่นเหล็กกับกระจกมีช่องว่างอากาศนิ่ง 3 cm และช่องอากาศไหลอยู่ส่วนล่างของแผงรับรังสีมีขนาด 4 cm ด้านล่างบุด้วยแผ่นไม้อัดหนา 1 cm วางเป็นพื้นล่างสุดต่อมาเป็น โฟมหนา 2.5 cm แล้ววางทับด้วยแผ่นยิปซัมกันความร้อนอีก 1 ชั้น แสดงดังรูป 4.6 แผงรับแสงอาทิตย์วางหันหน้าไปทางทิศใต้เอียงทำมุม 7 องศา กับแนวระดับ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ)



รูปที่ 4.6 ลักษณะแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิจัย

4.3 การออกแบบและสร้างแหล่งความร้อนเสริม

4.3.1 การคำนวณและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ

อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, T_{hi}	300 °C
อุณหภูมิก๊าซร้อนที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, T_{ho}	150 °C
อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, T_{ci}	26 °C
อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, T_{co}	70 °C
ปริมาณความร้อนที่ใช้อบแห้ง, Q	2 kW
อัตราการไหลอากาศอบแห้ง	0.039 kg/s
ความจุความร้อนจำเพาะ ($T=70^{\circ}\text{C}$)	1.007 kJ/kg K

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Counter flow เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สร้อนจากเตาเผาชีวมวลกับอากาศแวดล้อม เพื่อใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิแตกต่างของของไหลทั้งสองเชิงลอก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 ดังต่อไปนี้

$$\Delta T_m = \frac{(T_{ho} - T_{ci}) - (T_{hi} - T_{co})}{\ln[(T_{ho} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{co})]}$$

แทนค่าลงในสมการ

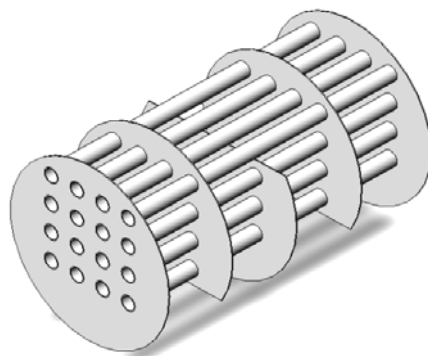
$$= \frac{(150 - 26) - (300 - 70)}{\ln[(150 - 26) / (300 - 70)]} = 188^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอุณหภูมิแตกต่างของของไหลทั้งสองเชิงลอค เท่ากับ 188°C

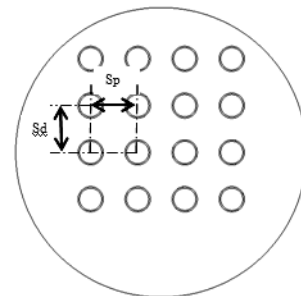
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบ Gas to Gas จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $10\text{-}40 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Holman, 1981) การออกแบบจะเลือกค่าที่ $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ ดังนั้นสามารถคำนวณพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดังนี้

$$(2)(1000)\text{W} = (20 \text{ W/m}^2\text{C})(A)(188^\circ\text{C}), \quad A = 0.6 \text{ m}^2$$

ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพื้นที่ไม่น้อยกว่า 0.6 m^2



(ก) ลักษณะท่อ



(ข) การจัดวางหม้อท่อแบบ in-line

รูปที่ 4.7 ลักษณะท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell and tube ที่ใช้ในงานวิจัย

ท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเลือกใช้ท่อเหล็กขนาด $1\frac{1}{2}$ นิ้ว มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 4.82 cm ยาว 0.8 m และจัดเรียงท่อแบบตรงกัน โดยมีระยะ S_p และ S_d เท่ากับ 2 นิ้ว (ดังแสดงในรูปที่ 4.7 (ข)) ในการออกแบบจะใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3 ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเท่ากับ 1.8 m^2 และจำนวนท่อสามารถคำนวณจากสมการ

$$A = (\pi DL)n \quad (4.9)$$

โดยที่	A	คือ	พื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)
	L	คือ	ความยาวท่อ (m)
	n	คือ	จำนวนท่อ
แทนค่าลงในสมการ	n	=	$\frac{1.8}{\pi \times 0.0482 \times 0.8} = 14.86$ ท่อ

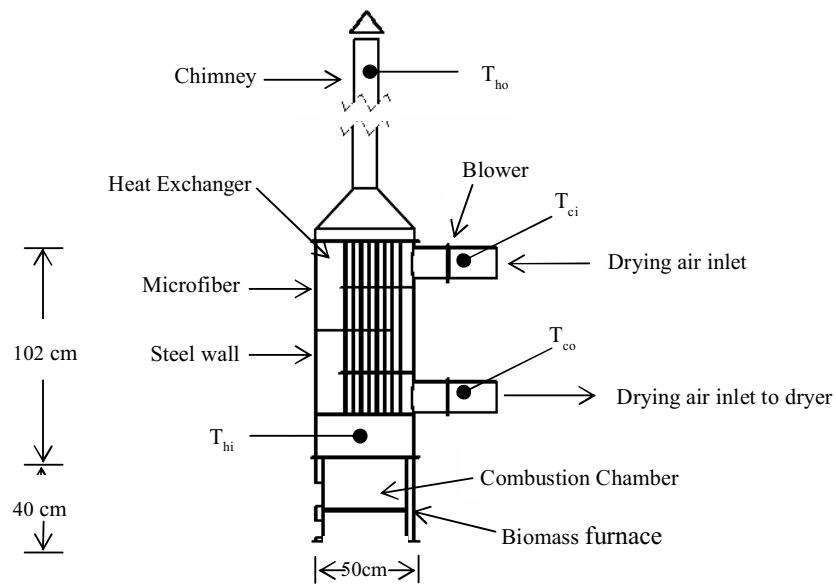
ดังนั้นจะได้จำนวนท่อเท่ากับ 14.86 ท่อ จัดวางแบบ in-line แต่ในการสร้างจริงจะกำหนดจำนวนท่อ 16 ท่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.7(ก)

การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานวิจัย เป็นแบบ shell and tube มีลักษณะเป็นแบบ counter flow ชนิด air to air ติดตั้งอยู่ด้านบนของเตาเผาชีวมวล ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอากาศที่ใช้อบแห้ง shell สร้างขึ้นโดยใช้เหล็กแผ่นหนา 3 mm ม้วนเป็นทรงกระบอกกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm สูง 102 cm หุ้มด้วยใยแก้วหนา 5 cm เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน บริเวณด้านบน และด้านล่างจะมีท่อสำหรับให้อากาศแวดล้อมไหลเข้า-ออก เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ)

4.3.2 การคำนวณและออกแบบเตาเผาชีวมวล

เตาเผาชีวมวลออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกโดยมีขนาดของพื้นที่ตะแกรงหรือพื้นที่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงควรมีค่าเท่ากับ 300 kW/m^2 (E. Servizi, 1987) เมื่อปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้ในการอบแห้ง 2 kW ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดพื้นที่ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผาได้เท่ากับ 0.006 m^2 แต่ในการสร้างจริงกำหนดให้พื้นที่การเผาไหม้มีขนาดเท่ากับ 0.1 m^2 เพื่อให้สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิด เตาเผาชีวมวลแสดงดังในรูปที่ 4.8

เตาเผาชีวมวลทำด้วยแผ่นเหล็กหนา 3 mm ม้วนเป็นทรงกระบอกกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 m สูง 0.4 m ผนังเตาทำเป็น 2 ชั้น เป็นช่องสำหรับอัดด้วยดินแดงผสมทรายหนา 0.06 m รอบตัวเตาเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ตะแกรงทำด้วยเหล็กหนา 0.05 m อยู่ส่วนใต้ของห้องเผาไหม้ และด้านล่างของตะแกรงจะเป็นส่วนเก็บขี้เถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ บริเวณใต้ตะแกรงจะมีช่องไว้สำหรับเขี่ยขี้เถ้าออก และเป็นช่องให้อากาศไหลเข้าเพื่อใช้ในการเผาไหม้ ช่องใส่เชื้อเพลิงชีวมวลและประตูจะอยู่เหนือช่องเขี่ยขี้เถ้า



รูปที่ 4.8 ลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย

4.3.3 การคำนวณปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ คือ ฟืนจากไม้ยางพารา อัตราการใช้เชื้อเพลิงคำนวณจากความร้อนและค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ดังนี้ (บัญญัติ นิยมวาส 2544)

$$M_f = \frac{Q}{LHV} \quad (4.10)$$

$$LHV = (HHV - 2.4423 \times 9 \times H)(1 - MC) - (2.4423 \times MC) \quad (4.11)$$

โดยที่	M_f	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/h)
	Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่ใช้ทั้งหมด (มีค่าเท่ากับ 2 kW)
	LHV	คือ	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg)
	HHV	คือ	ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (มีค่าเท่ากับ 14.140 MJ/kg)
	H	คือ	ร้อยละของไฮโดรเจน (มีค่าเท่ากับ 6.5%)
	MC	คือ	ร้อยละของความชื้น (มีค่าเท่ากับ 20 %wb)

ดังนั้นหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงฟืนจากไม้ยางพารา ได้ดังนี้

$$\text{LHV} = (14.140 - 2.4423 \times 9 \times 0.065)(1 - 0.2) - (2.4423 \times 0.2) = 6.129 \text{ MJ/kg (20\%wb)}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$M_f = \frac{\left(\frac{0.002 \text{ MJ}}{\text{s}}\right)(3600 \text{ s})}{\left(\frac{13.32 \text{ MJ}}{\text{kg}}\right)(\text{h})} \approx 1.2 \text{ kg/h}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิง (ฟืนจากไม้ยางพารา) เท่ากับ 1.2 kg/h

4.3.4 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผา

อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผาจะมีองค์ประกอบสองส่วน

ดังนี้คือ

$$\dot{M}_{gt} = \dot{M}_a + \dot{M}_{gf} \quad (4.11)$$

โดยที่ \dot{M}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้เผาไหม้ (kg/h)
 \dot{M}_{gf} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่เกิดจากเชื้อเพลิง (kg/h)
 \dot{M}_{gt} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อน (kg/h)

โดยที่สามารถหาค่าของ \dot{M}_a และ \dot{M}_{gf} ได้ดังต่อไปนี้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงต้องใช้อากาศทางทฤษฎีคำนวณจาก

$$A_{th} = 11.49(C) + 34.5(H-O/8) + 4.3(S) \quad (4.12)$$

เมื่อเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณคือฟืนจากไม้ยางพาราซึ่งมีผลการวิเคราะห์องค์ประกอบดังต่อไปนี้ (บัญญัติ นิยมवास 2544)

C คือ ร้อยละของของคาร์บอน (มีค่าเท่ากับ 44.5%)
H คือ ร้อยละของของไฮโดรเจน (มีค่าเท่ากับ 6.5%)
O คือ ร้อยละของของออกซิเจน (มีค่าเท่ากับ 44.2%)
S คือ ร้อยละของของซัลเฟอร์ (มีค่าเท่ากับ 0.15%)

- แทนค่าสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ ในสมการ

$$A_{th} = 11.49 \times 0.445 + 34.5(0.065 - 0.442/8) + 4.3 \times 0.0015$$

$$= 5.5 \text{ kg-air/kg-fuel}$$

จากหัวข้อ 4.3.3 มีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 1.2 kg/h ดังนั้นอัตราการใช้อากาศในการเผาไหม้จะเท่ากับ

$$\dot{M}_{Ath} = (5.5 \text{ kg-air/kg-fuel})(1.2 \text{ kg-fuel/h}) = 6.6 \text{ kg-air/h}$$

กำหนดให้ excess air 50% ดังนั้น \dot{M}_a หรืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้เผาไหม้มีค่าเป็น 9.9 kg-air/h

หาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่เกิดจากเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงมีซีดีอยู่ร้อยละ A

$$\dot{M}_{gf} = \dot{M}_f [1 - (1 - MC)A] \quad (4.13)$$

โดยที่ \dot{M}_f คือ อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (มีค่าเท่ากับ 1.2 kg-fuel/h)

A คือ ร้อยละของซีดี (มีค่าเท่ากับ 4.1%)

แทนค่าลงในสมการ

$$\dot{M}_{gf} = 1.2 \text{ kg/h} [1 - (1 - 0.2)0.041] = 1.16 \text{ kg/h}$$

หาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผา

$$\dot{M}_{gt} = \dot{M}_a + \dot{M}_{gf} = 9.9 \text{ kg/h} + 1.16 \text{ kg/h} = 11.06 \text{ kg/h}$$

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผา มีค่าเท่ากับ 11.06 kg/h สามารถหาความเร็วของก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (4.14)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วของก๊าซร้อน (m/s)

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวล (มีค่าเท่ากับ 0.003072 kg/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซร้อน (ที่ 150°C = 0.840 kg/m³)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของปล่องระบายควัน (มีค่าเท่ากับ 0.0113 m²)

แทนค่าในสมการ

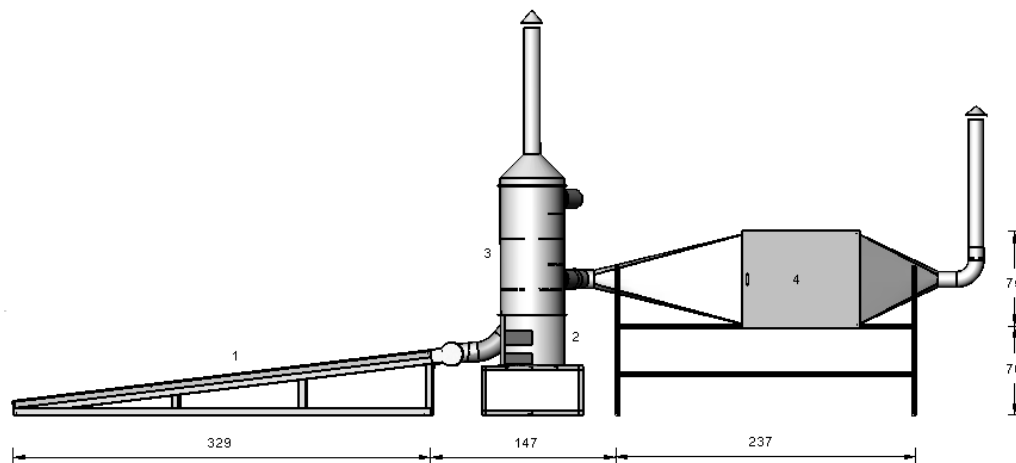
$$V = \frac{0.003072}{0.840 \times 0.0113} = 0.32 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของก๊าซร้อนที่ออกจากปล่องระบายควันเท่ากับ 0.32 m/s

4.4 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้ง

การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ในช่วงเวลากลางวัน อากาศแวดล้อมไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (หมายเลข 1) โดยอาศัยการไหลแบบธรรมชาติ และแรงดูดของพัดลม แผงรับรังสีประกอบด้วยแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ถ่ายเทให้กับอากาศที่ไหลผ่าน แผ่นกระจกใสซึ่งอยู่ด้านบนของแผงรับรังสี ทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนของชั้นอากาศนี้ โดยป้องกันการพาความร้อน จนวนกันความร้อนที่อยู่ด้านล่างสุดของแผงรับรังสี ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน อากาศแวดล้อมที่ไหลผ่านแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้นอากาศจะไหลผ่านท่อเข้าสู่ห้องอบแห้ง (หมายเลข 4) พัดลมเป่าอากาศที่อยู่ในห้องอบแห้งจะช่วยให้เกิดการกระจายอากาศร้อนทั่วทั้งห้องอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลที่ผลิตภัณฑ์ การอบแห้งจะดำเนิน ไปจนผลิตภัณฑ์อบแห้ง มีความชื้นตามค่าที่กำหนด

การอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล ในช่วงเวลากลางคืน หรือช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ใช้ฟืนจากไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาชีวมวล (หมายเลข 2) ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 3) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศแวดล้อม ก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง



1 Solar collector

2 Biomass furnace

3 Heat exchanger

4 cabinet dryer

Units: cm

รูปที่ 4.9 ลักษณะของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย

4.5 สรุป

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการแห้งของผลหมาก พบว่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับอบแห้ง คือ อุณหภูมิ และความเร็วอากาศ 70°C และ 1 m/s ตามลำดับ โดยใช้ระยะเวลาอบแห้งผลหมาก และเมล็ดหมาก เท่ากับ 5 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ ในส่วนของการออกแบบเครื่องอบแห้ง ประกอบด้วย แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ขนาด 4 m^2 ห้องอบแห้งขนาด $0.9 \times 1 \times 0.74\text{ m}^3$ สามารถวางถาดอบแห้งซ้อนกันได้ 6 ถาด อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell and tube มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 cm สูง 102 cm เตาเผาชีวมวลมีขนาดพื้นที่การเผาไหม้เท่ากับ 0.1 m^2 โดยกำหนดใช้ฟืนจากไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อให้ความร้อนในการอบแห้ง ซึ่งสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นที่ทำการวิจัย

บทที่ 5

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองของเครื่องอบแห้งหมากที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น โดยแบ่งการแสดงผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วนด้วยกัน ส่วนที่ 1 ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ส่วนที่ 2 ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ส่วนที่ 3 ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และส่วนที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง

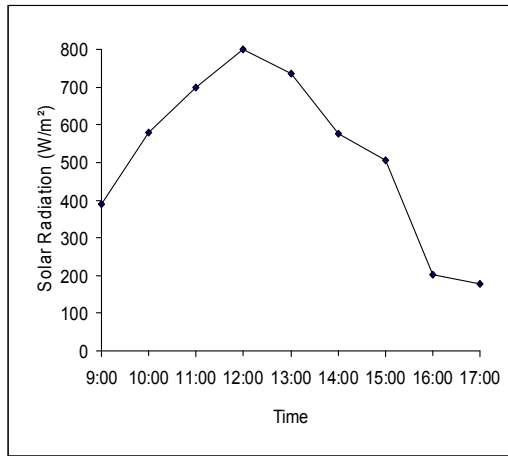
5.1 ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

5.1.1 ผลการทดลองอบแห้งผลหมาก

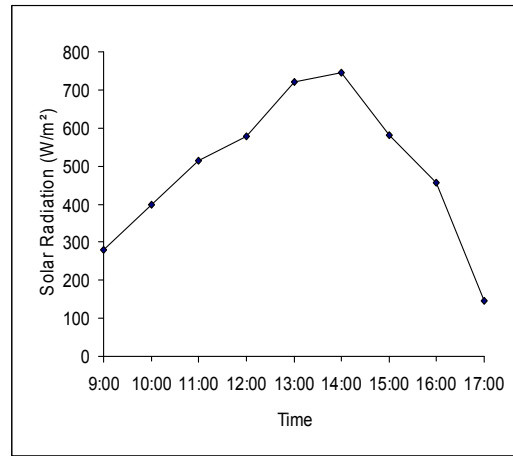
ทดลองโดยใช้ผลหมาก จำนวน 40 kg ความชื้นเริ่มต้น 63 %(wb) เป็นวัตถุดิบอบแห้ง ทำการทดลองในวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552

(1) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

เมื่อทำการทดลองและบันทึกค่าต่างๆ ในช่วงเวลา 8.00-17.00 น. ทุกๆ ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อมและอุณหภูมิทางด้านออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง $29.1-37.5^\circ\text{C}$ และ $35-65.6^\circ\text{C}$ ตามลำดับโดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยทางด้านออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า 18.7°C อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง $30.2-50.2^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม และอากาศทางด้านออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย $44.8\% \text{RH}$ และ $27.6\% \text{RH}$ ตามลำดับ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม มีค่ามากกว่า $17.4\% \text{RH}$ เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง $145.9-801.3 \text{ W/m}^2$ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 1) แผงรับรังสีมีประสิทธิภาพเท่ากับ 23.9% (อ้างจากภาคผนวก ง ในหัวข้อ ง 1.1) จากผลการทดลองจะเห็นว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิทางด้านออกของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกของการทดลอง ความชื้นของหมากค่อนข้างสูง ส่งผลให้ความร้อนของอากาศอบแห้งถ่ายเทให้กับวัตถุดิบค่อนข้างมาก และความร้อนที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ผลิตได้จะแปรผันตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 5.1 และ 5.2

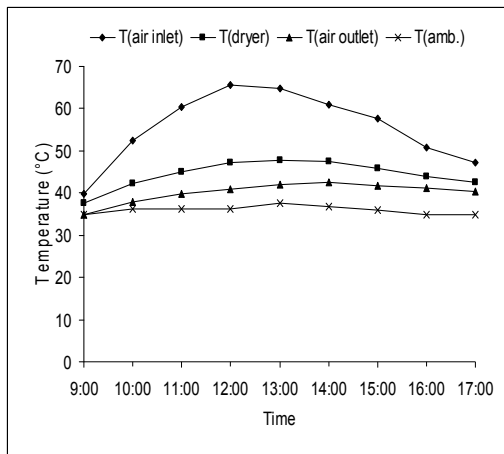


(ก) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์
วันที่ 9 มิถุนายน 2552

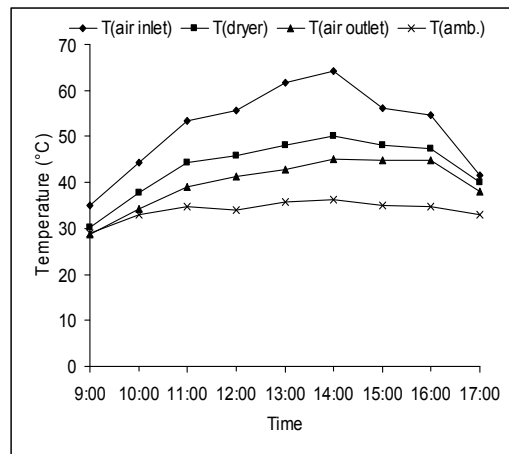


(ข) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์
วันที่ 10 มิถุนายน 2552

รูปที่ 5.1 ผลของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ของการอบแห้งผลหมาก วันที่ 9 มิถุนายน 2552
เฉลี่ย 518.2 W/m² และวันที่ 10 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 491.4 W/m²



(ก) อุณหภูมิอากาศ วันที่ 9 มิถุนายน 2552



(ข) อุณหภูมิอากาศวันที่ 10 มิถุนายน 2552

รูปที่ 5.2 ผลของอุณหภูมิอากาศของการทดลองอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552

(2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

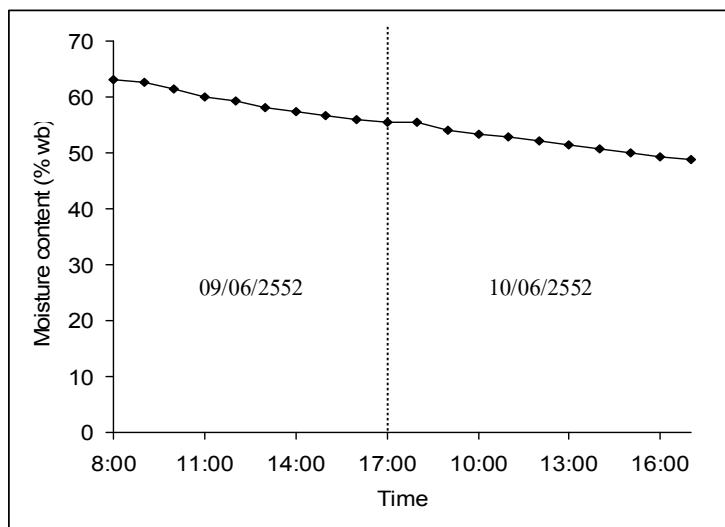
การทดลองอบผลหมากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ในหัวข้อ ง 1.1)

การทดลองวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552 มีข้อมูลต่างๆดังนี้

น้ำหนักผลหมากก่อนอบแห้ง	=	40	kg
น้ำหนักผลหมากหลังอบแห้ง	=	28	kg
น้ำหนักของน้ำที่ระเหย	=	12	kg
ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบแผงรับรังสี	=	130.8	MJ
ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ	=	1.656	MJ
พลังงานทั้งหมดที่ใช้กับระบบอบแห้ง	=	132.5	MJ
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	=	2.4	MJ/kg (ที่ $T = 44^{\circ}\text{C}$)
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง	=	21.71	%
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	=	11.04	MJ/kg H_2O evap.
ความสิ้นเปลืองไฟฟ้าจำเพาะ	=	0.138	MJ/kg H_2O evap.
ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์	=	23.9	%

(3) ค่าความชื้นผลหมาก

ผลหมากที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 63 %(wb) เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ รวมระยะเวลา 18 ชั่วโมง (2 วัน) เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 48.76 %(wb) จากรูปที่ 6.3 พบว่าปริมาณความชื้นของผลหมากมีอัตราลดลงค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ความร้อนในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง $30.2-50.2^{\circ}\text{C}$ (อ้างจากตารางที่ ก 1) จะเห็นว่าอุณหภูมิค่อนข้างต่ำและไม่สม่ำเสมอ โดยที่อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา และจากการทดลองมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย $0.66 \text{ kg H}_2\text{O evap./h}$



รูปที่ 5.3 ผลการลดลงของความชื้นของการอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
 อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552

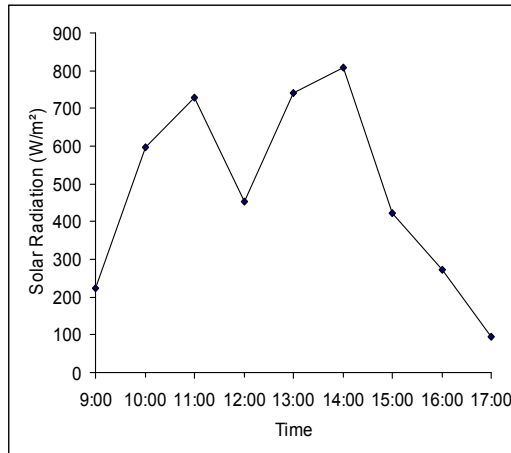
5.1.2 ผลการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

ผลหมากที่ผ่านการอบแห้งจากขั้นตอนที่ 1 เมื่อแกะเปลือกออกปริมาณเมล็ดหมาก 11.5 kg ความชื้น 32 % (wb) อบต่อเนื่องโดยใช้แสงอาทิตย์ ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 12 % (wb) ทำการทดลองในวันที่ 11-14 มิถุนายน 2552

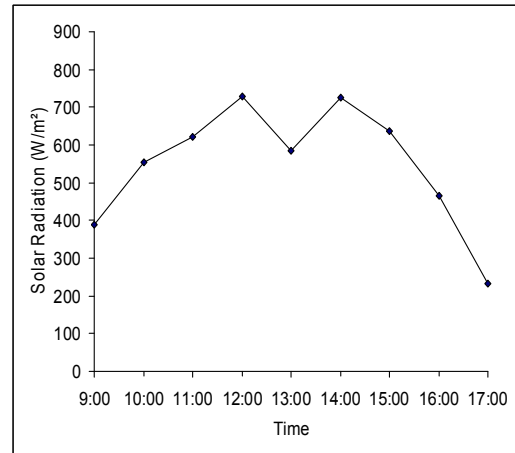
(1) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

เมื่อทำการทดลองและบันทึกค่าต่างๆ ในช่วงเวลา 8.00-17.00 น. ทุกๆ ชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ จากผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมและทางด้านออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ อยู่ในช่วง $29.6-39.8^\circ\text{C}$ และ $32.5-67.8^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิทางด้านออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า 18.4°C อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง $29.5-59.6^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม และทางด้านออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย $41.6\% \text{ RH}$ และ $20.2\% \text{ RH}$ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมมากกว่า $21.4\% \text{ RH}$ เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง $87.3-820.5 \text{ W}/\text{m}^2$ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 3) แผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 26.7% (อ้างจากภาคผนวก ง ในหัวข้อ ง 1.2) จากผลการทดลองอุณหภูมิในห้องอบแห้งค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ โดยแตกต่างกัน 4.8°C ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งในตอนที่ 2 ความชื้นและปริมาณของเมล็ดหมากค่อนข้างน้อย มีผลให้ความร้อนของอากาศอบแห้งถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์น้อยลง และความร้อนที่แผงรับรังสีดวง

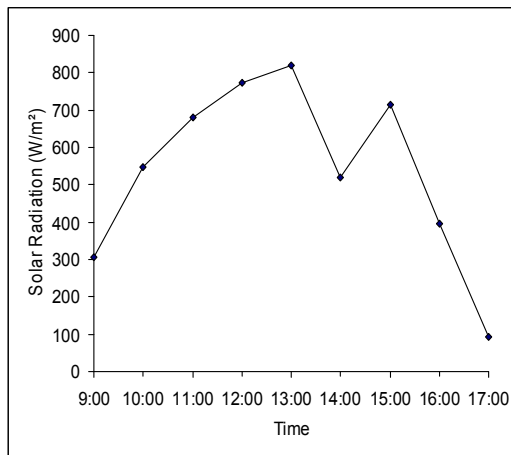
อาทิตย์ผลิตได้แปรผันตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5



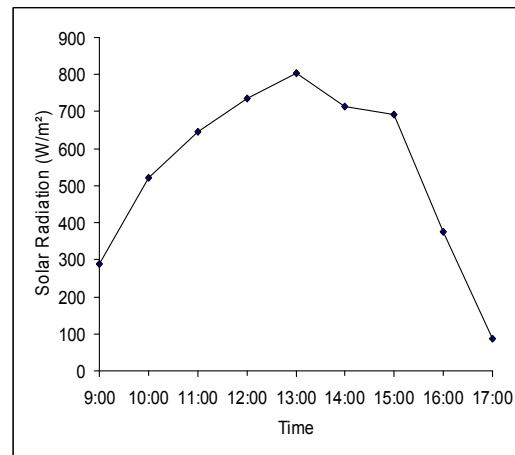
(ก) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์
วันที่ 11 มิถุนายน 2552



(ข) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์
วันที่ 12 มิถุนายน 2552

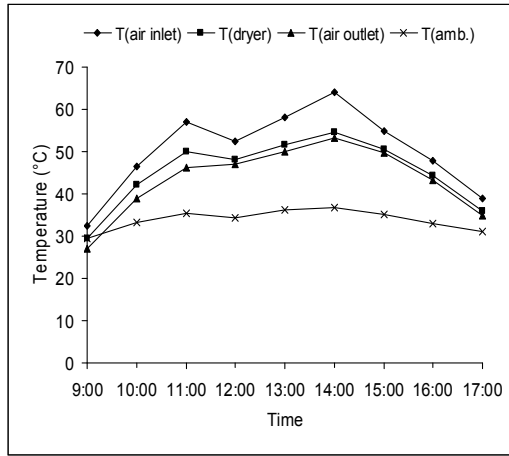


(ค) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์
วันที่ 13 มิถุนายน 2552

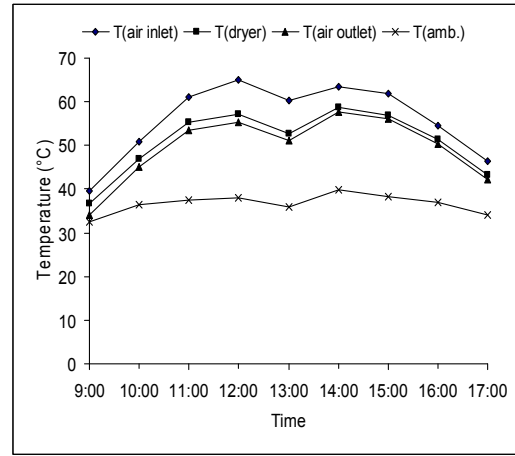


(ง) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์
วันที่ 14 มิถุนายน 2552

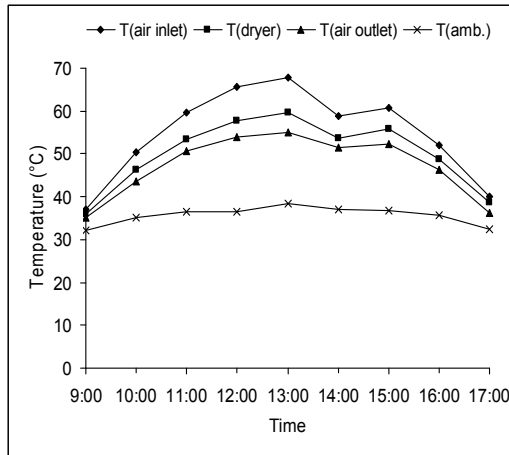
รูปที่ 5.4 ผลของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของการอบแห้งเมล็ดหมาก วันที่ 11 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 482 W/m^2 วันที่ 12 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 548.2 W/m^2 วันที่ 13 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 538.9 W/m^2 และวันที่ 14 มิถุนายน 2552 เฉลี่ย 540 W/m^2



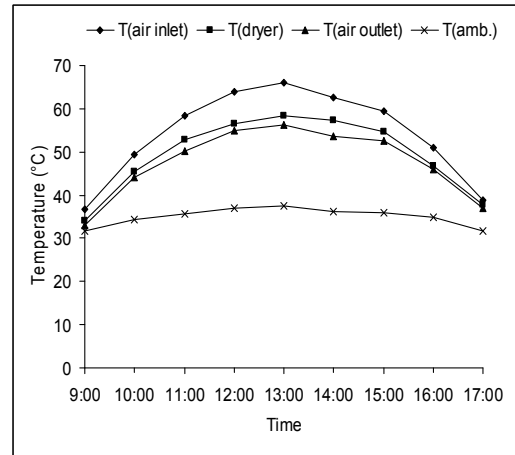
(ก) อุณหภูมิอากาศวันที่ 11 มิถุนายน 2552



(ข) อุณหภูมิอากาศวันที่ 12 มิถุนายน 2552



(ค) อุณหภูมิอากาศวันที่ 13 มิถุนายน 2552



(ง) อุณหภูมิอากาศวันที่ 14 มิถุนายน 2552

รูปที่ 5.5 ผลของอุณหภูมิอากาศ ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงาน
แสงอาทิตย์อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 11-14 มิถุนายน 2552

(2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

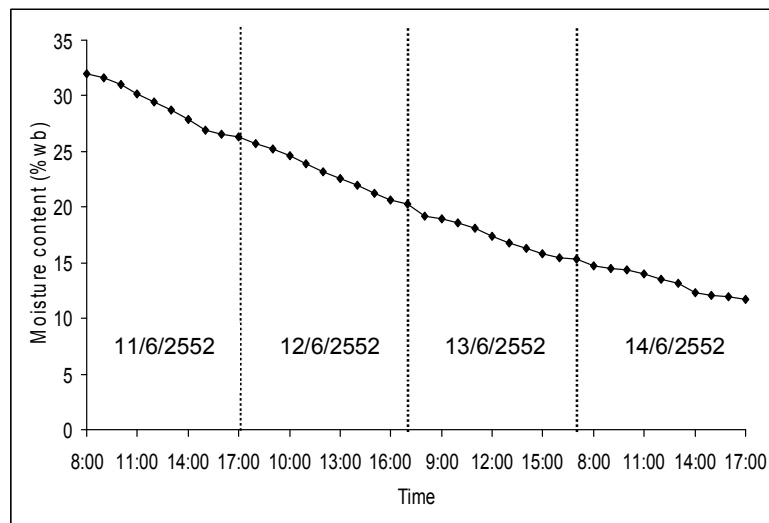
การทดลองอบเมล็ดหมากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ในหัวข้อ ง 1.2)

การทดลองวันที่ 11-14 มิถุนายน 2552 มีข้อมูลต่างๆดังนี้

น้ำหนักเมล็ดหมากก่อนอบแห้ง	=	11.5	kg
น้ำหนักเมล็ดหมากหลังอบแห้ง	=	8.8	kg
น้ำหนักของน้ำที่ระเหย	=	2.7	kg
ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบแผงรับรังสี	=	273.4	MJ
ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ	=	3.24	MJ
พลังงานทั้งหมดที่ใช้กับระบบอบแห้ง	=	276.64	MJ
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	=	2.385	MJ/kg (ที่ $T = 49^{\circ}\text{C}$)
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง	=	2.32	%
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	=	102	MJ/kg H_2O evap.
ความสิ้นเปลืองไฟฟ้าจำเพาะ	=	1.2	MJ/kg H_2O evap.
ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์	=	26.7	%

(3) ค่าความชื้นเมล็ดหมาก

เมล็ดหมากที่ทำการทดลอง มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 32 %(wb) เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ รวมระยะเวลา 36 ชั่วโมง (4 วัน) คงเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 11.74 %(wb) จากการศึกษาพบว่าปริมาณความชื้นของเมล็ดหมากลดลงทีละน้อยไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง $29.5-59.6^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิค่อนข้างต่ำและไม่สม่ำเสมอ เปลี่ยนแปลงตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา และจากการทดลองมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย $75 \text{ g } \text{H}_2\text{O}$ evap./h ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
 อย่างเดียว ในระหว่างวันที่ 11-14 มิถุนายน 2552

5.2 ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

5.2.1 ผลการทดลองอบแห้งผลหมาก

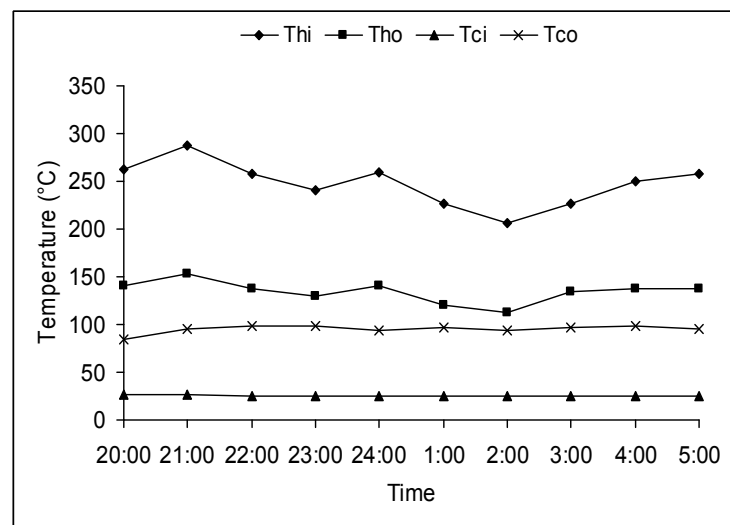
ทดลองโดยใช้ผลหมากพันธุ์ผลกลมรี จำนวน 40 kg ความชื้นเริ่มต้น 64.21 %(wb) เป็นวัตถุดิบอบแห้ง ทำการทดลองวันที่ 19 มีนาคม 2553 เวลา 20.00-05.00 น. รวม 10 ชั่วโมง

(1) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

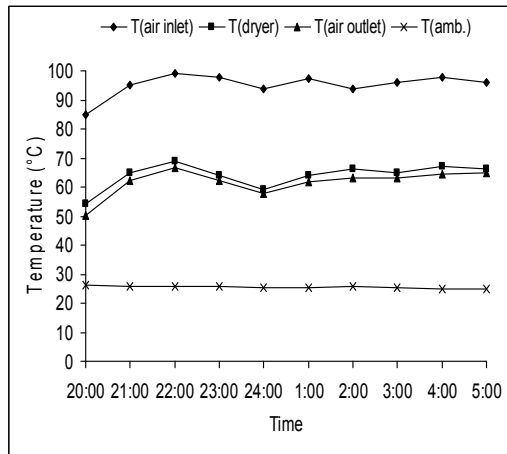
จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 2.65 kg/h อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 0.056 m³/s อุณหภูมิของก๊าซร้อน และอากาศเย็น ไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในช่วง 248-134°C และ 25.5-95.2°C ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 5) ประสิทธิภาพ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 51.23 % และ 36.89% ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ง หัวข้อ ง 2.1) จากการทดลองมีความร้อนสูญเสียค่อนข้างมากที่บริเวณเตาเผา และปล่องทางออกของแก๊สร้อน เนื่องจากไม่ได้หุ้มฉนวนกันความร้อน อุณหภูมิของก๊าซร้อน และก๊าซเย็น ไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.7

อุณหภูมิอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งเฉลี่ย 95.2°C และ 61.1°C ตามลำดับ แตกต่างกัน 33.5°C จะเห็นว่าแตกต่างค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากผลหมากในห้องอบแห้งมีปริมาณ และความชื้นมาก ส่งผลให้ความร้อนของอากาศในห้องอบแห้งถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งเฉลี่ย 3.9 และ

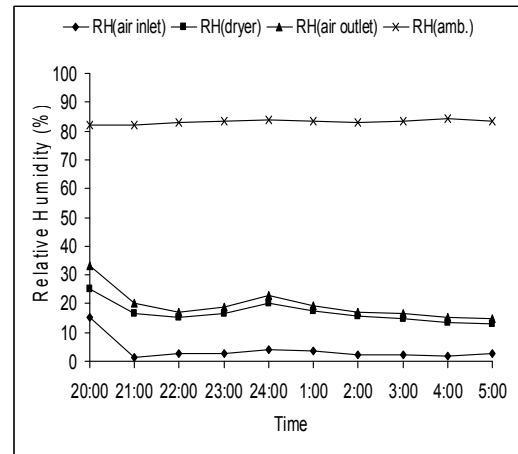
19.5 %RH ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิทางด้านเข้าห้องอบแห้งสูง ส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูง ไอน้ำในอากาศระเหยออกไปมาก ดังนั้นเมื่ออากาศที่เข้าสู่ห้องอบแห้งมีอุณหภูมิสูง และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศมากตามไปด้วย ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทางด้านออกจากห้องอบแห้ง มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศทางด้านเข้าห้องอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจากการทดลอง แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว



(ก) อุณหภูมิอากาศ



(ข) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

รูปที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

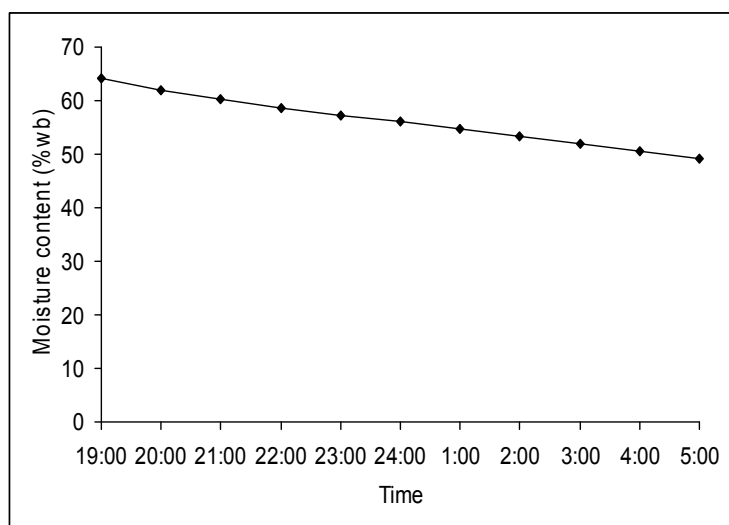
(2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล

การทดลองอบผลหมากด้วยพลังงานชีวมวล ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ในหัวข้อ 2.1) การทดลองวันที่ 19 มีนาคม 2553 มีข้อมูลต่างๆดังนี้

น้ำหนักผลหมากก่อนอบแห้ง	=	40	kg
น้ำหนักผลหมากหลังอบแห้ง	=	25.5	kg
น้ำหนักของน้ำที่ระเหย	=	14.5	kg
ปริมาณพลังงานจากชีวมวล	=	374.7	MJ
ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ	=	3.0	MJ
พลังงานทั้งหมดที่ใช้กับระบบอบแห้ง	=	377.7	MJ
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	=	2.35	MJ/kg (ที่ T = 64°C)
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง	=	9.0	%
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	=	26.05	MJ/kg H ₂ O evap.
ความสิ้นเปลืองไฟฟ้าจำเพาะ	=	0.2	MJ/kg H ₂ O evap.

(3) ค่าความชื้นผลหมาก

ผลหมากที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 64.21 %(wb) เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล รวมระยะเวลาอบแห้ง 10 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้าย 49.11 %(wb) จากรูปที่ 5.9 พบว่าปริมาณความชื้นของผลหมากลดลงค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 54.4-69°C (อ้างจากตารางที่ ก 8) และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 1.45 kg H₂O evap./h



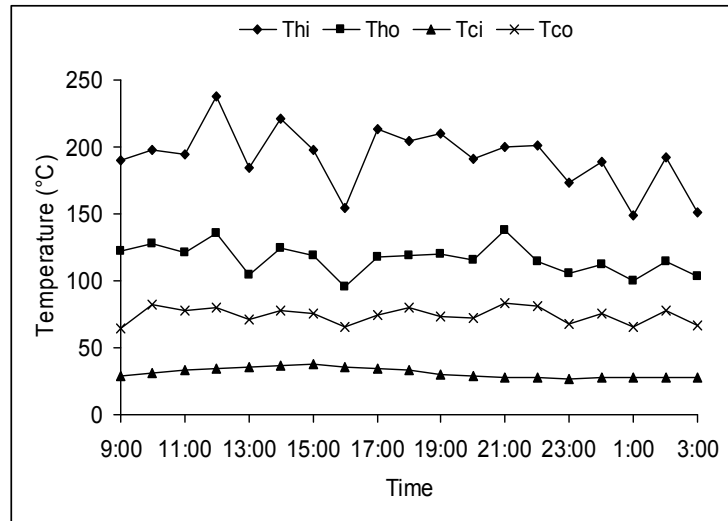
รูปที่ 5.9 ผลการลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

5.2.2 ผลการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

ผลหมากที่อบแห้งจากขั้นตอนที่ 1 ปริมาณเมล็ดหมากเมื่อแกะเปลือกเท่ากับ 11 kg ความชื้น 31.45 %(wb) อบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลให้เหลือความชื้นสุดท้าย 12 % (wb)

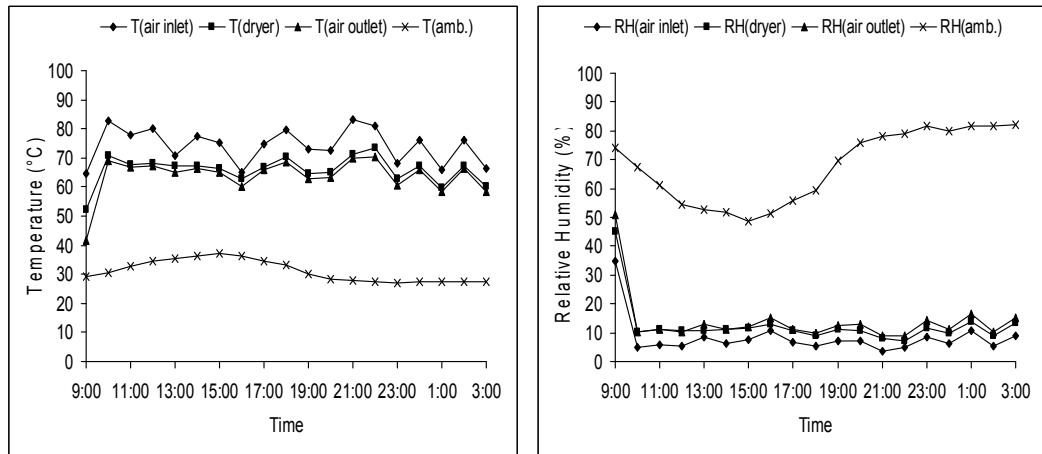
(1) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 2.1 kg/h อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 0.056 m³/s อุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในช่วง 192.2-116.4°C และ 31.1-74°C ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ก ตารางที่ ก 8) ประสิทธิภาพ และประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 47% และ 30.82% ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ง หัวข้อ ง 2.2) จากการทดลองเกิดการสูญเสียความร้อนค่อนข้างมากที่บริเวณเตาเผา และบริเวณปล่องทางออกของแก๊สร้อน เนื่องจากไม่ได้หุ้มฉนวนกันความร้อน อุณหภูมิของก๊าซร้อน และอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อน และอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งมีค่าเฉลี่ย 74°C และ 63.7°C ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 9) แตกต่างกัน 10.3°C ซึ่งเห็นว่ามีความน้อยลง เมื่อเทียบกับการทดลองอบผลหมากในหัวข้อที่ 5.2.1 ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดหมากที่ใช้ออบแห้งมีปริมาณและความชื้นค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของอากาศในห้องอบแห้งไปยังเมล็ดหมากค่อนข้างน้อย ทำให้ความร้อนปล่อยทิ้งจากห้องอบแห้งค่อนข้างสูง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งเฉลี่ย $8.3\% \text{RH}$ และ $14.0\% \text{RH}$ ตามลำดับ ซึ่งเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิทางด้านเข้าห้องอบแห้งสูง ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงไอน้ำในอากาศระเหยออกไปมาก และความชื้นสัมพัทธ์อากาศทางด้านออกของเครื่องอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ทางด้านเข้า ทั้งนี้เนื่องจากอากาศรับความชื้นจากผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.11



(ก) อุณหภูมิอากาศ

(ข) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

รูปที่ 5.11 ผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

(2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานชีวมวล

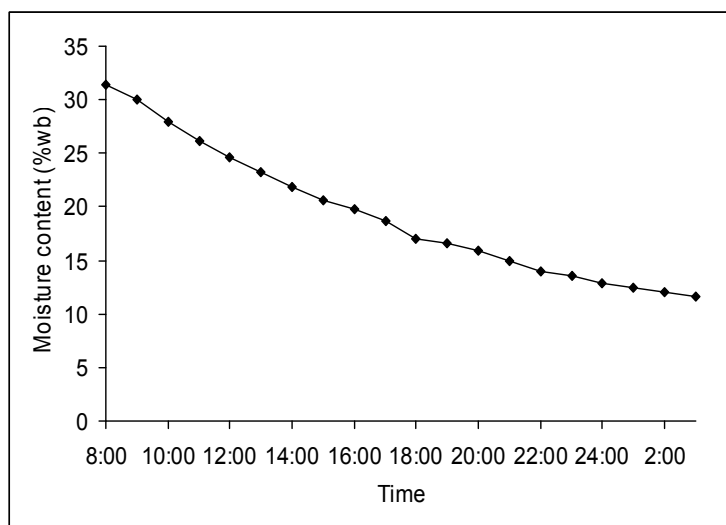
การทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวล ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ในหัวข้อ 2.2)

การทดลองวันที่ 19-20 มีนาคม 2553 มีข้อมูลต่างๆดังนี้

น้ำหนักผลหมากก่อนอบแห้ง	=	11	kg
น้ำหนักผลหมากหลังอบแห้ง	=	8.5	kg
น้ำหนักของน้ำที่ระเหย	=	2.5	kg
ปริมาณพลังงานจากชีวมวล	=	565.6	MJ
ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ	=	5.4	MJ
พลังงานทั้งหมดที่ใช้กับระบบอบแห้ง	=	571	MJ
ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ	=	2.346	MJ/kg (ที่ T= 65.8°C)
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง	=	1.02	%
ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	=	228	MJ/kg H ₂ O evap.
ความสิ้นเปลืองไฟฟ้าจำเพาะ	=	2.16	MJ/kg H ₂ O evap.

(3) ค่าความชื้นเมล็ดหมาก

เมล็ดหมากที่ใช้ทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 31.45 %(wb) เมื่อผ่านการอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล ระยะเวลา 19 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้าย 11.64 %(wb) จากรูปที่ 5.12 พบว่า ปริมาณความชื้นลดลงค่อนข้างช้า ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดหมากมีเนื้อแน่นและแข็งทำให้การเคลื่อนย้ายความชื้นจากภายในผลิตภัณฑ์มาที่ผิวจะช้า โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 52-73 °C และมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 131 g H₂O evap./h



รูปที่ 5.12 ผลการลดลงของความชื้นในการอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

5.3 ผลการทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

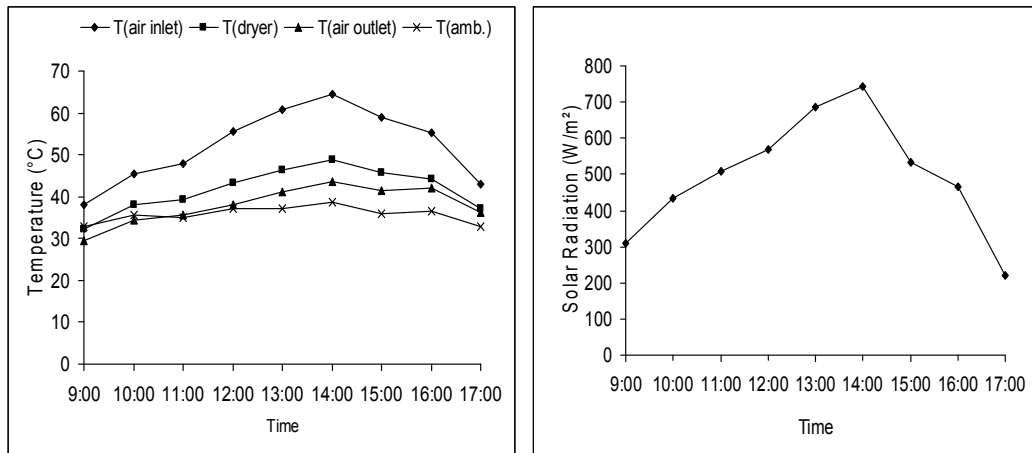
5.3.1 ผลการทดลองอบแห้งผลหมาก

การทดลองใช้ผลหมาก จำนวน 40 kg ความชื้นเริ่มต้น 66.24 %(wb) เป็นวัตถุดิบอบแห้ง ทดลองวันที่ 2 มีนาคม 2552 อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 8.00-17.00 น. และอบต่อเนื่องโดยใช้พลังงานชีวมวลในช่วงเวลา 18.00-23.00 น.

(1) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิตรงทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 32.81-38.7 °C และ 38-64.4 °C ตามลำดับ อุณหภูมิตรงทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 16.4 °C อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งอยู่

ในช่วง 32.3-48.9°C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม และอากาศตรงทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 62 %RH และ 32.5 %RH ตามลำดับโดยที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมมากกว่า 29.5 %RH ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง 220-742 W/m² (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 11) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 25.5 % (อ้างจากภาคผนวก ง หัวข้อ ง 3.1.1) อุณหภูมิในห้องอบแห้งค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิตรงทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ โดยแตกต่างกัน 16.4°C ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบในห้องอบแห้งมีปริมาณและความชื้นค่อนข้างมาก ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของอากาศอบแห้งไปยังวัตถุดิบค่อนข้างมาก ในช่วงเช้าอุณหภูมิจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ และอุณหภูมิสูงมากขึ้นในช่วงเที่ยง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิจะแปรตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศ แสดงดังรูปที่ 5.13



(ก) อุณหภูมิอากาศวันที่ 2 มีนาคม 2552

(ข) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 496.4 W/m²
วันที่ 2 มีนาคม 2552

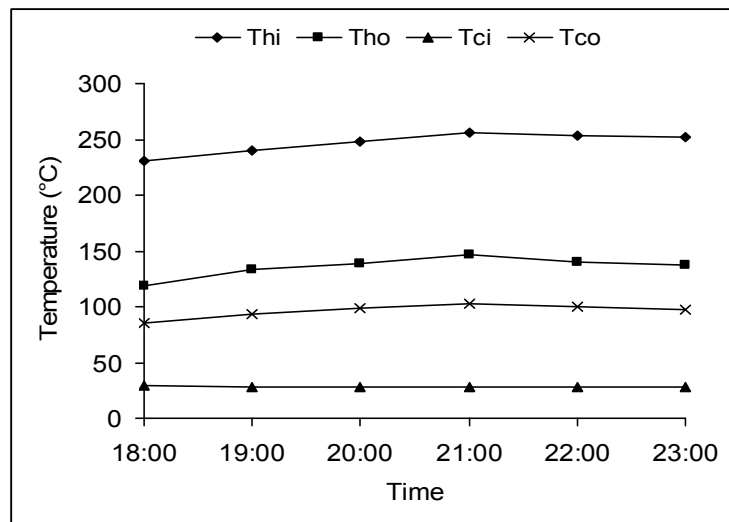
รูปที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิอากาศและความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ของการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล วันที่ 2 มีนาคม 2552

(2) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

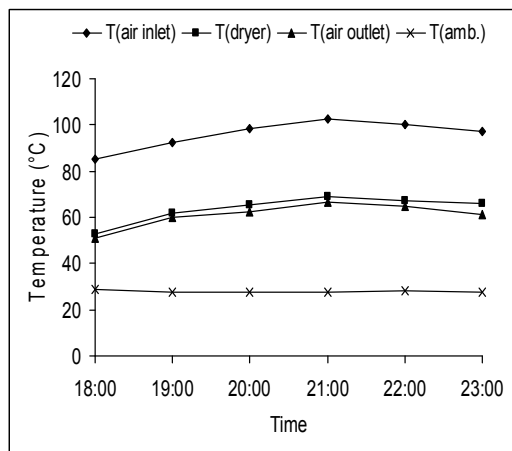
จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตรา 2.66 kg/h อัตราการไหลของอากาศ 0.056 m³/s อุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในช่วง 246.8-136°C และ 27.9-96.2°C ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 13) ประสิทธิภาพและประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 50.6% และ 35.8% ตามลำดับ

(อ้างจากภาคผนวก ง หัวข้อ ง 3.1.1) อุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.14

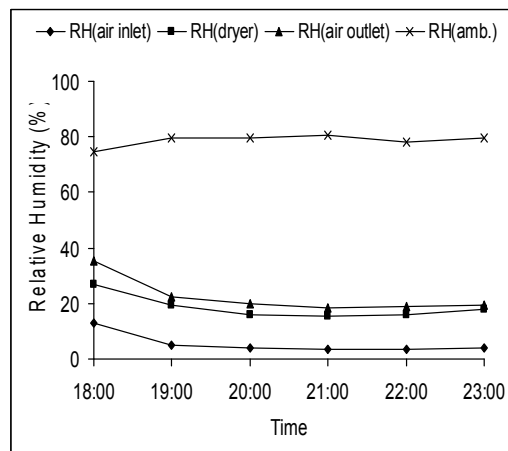
จากผลการทดลอง อุณหภูมิอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งเฉลี่ย 96.2°C และ 61.1°C ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนของอากาศในห้องอบแห้งไปยังวัตถุดิบค่อนข้างมาก และความชื้นสัมพัทธ์อากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งเฉลี่ย 5.5 และ 22.4 %RH ตามลำดับ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 12) จะเห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตรงทางออกค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับตรงทางเข้า ทั้งนี้เนื่องจากการระเหยของน้ำในวัตถุดิบให้กับอากาศมีมาก ส่งผลให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตรงทางออกจากห้องอบแห้งมีค่าสูงดังกล่าว อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศของการทดลองอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล แสดงดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.14 ผลของอุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล



(ก) อุณหภูมิอากาศ



(ข) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

รูปที่ 5.15 ผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

(2) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

การทดลองอบผลหมากด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ในหัวข้อ 3.1)

การทดลองวันที่ 2 มีนาคม 2552 มีข้อมูลต่างๆดังนี้

น้ำหนักผลหมากก่อนอบแห้ง = 40 kg

น้ำหนักผลหมากหลังอบแห้ง = 24.6 kg

น้ำหนักของน้ำที่ระเหย = 15.4 kg

ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบแผงรับรังสี
= 64.152 MJ

ปริมาณพลังงานจากชีวมวล = 226.24 MJ

ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ = 2.628 MJ

พลังงานทั้งหมดที่ใช้กับระบบอบแห้ง = 293.02 MJ

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ = 2.382 MJ/kg (ที่ $T = 63.7^{\circ}\text{C}$)

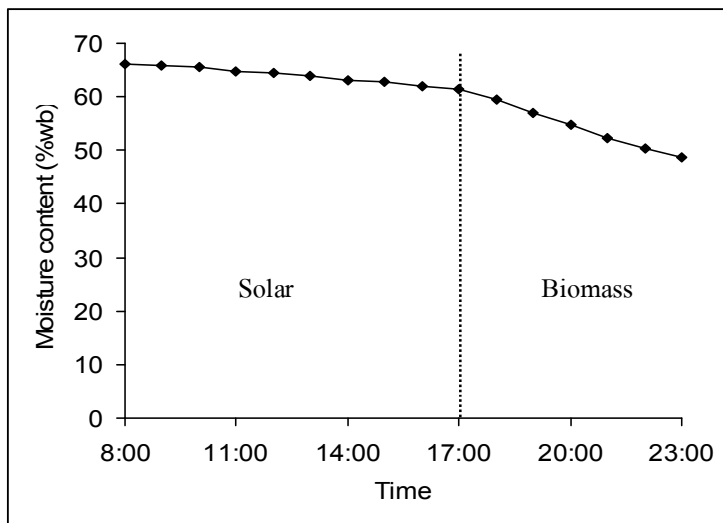
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง = 12.5 %

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ = 19 MJ/kg H_2O evap.

ความสิ้นเปลืองไฟฟ้าจำเพาะ = 0.17 MJ/kg H_2O evap.

(3) ค่าความชื้นหมาก

ผลหมากมีความชื้นเริ่มต้น 66.24 %(wb) เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานร่วม แสงอาทิตย์และชีวมวล รวมระยะเวลาในการอบแห้ง 15 ชั่วโมง จากรูปที่ 5.16 พบว่าปริมาณ ความชื้นของผลหมากลดลงทีละน้อยในช่วงใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และลดลงค่อนข้างมากในช่วง ใช้พลังงานจากชีวมวล ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิในห้อง อบแห้งอยู่ในช่วง 32.3-48.9°C (ดังแสดงในรูปที่ 5.13 ก และตารางที่ ค 11) ซึ่งอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ และไม่สม่ำเสมอ เปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แต่ละช่วงเวลา ช่วงการอบด้วยพลังงาน ชีวมวล อุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 53-68.7°C (ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ก และตารางที่ ค 12) ซึ่งอุณหภูมิก่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการอบด้วยแสงอาทิตย์ และค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยที่อุณหภูมิ ในห้องอบแห้งสามารถควบคุมได้โดยอัตราการใส่ฟืนในเตาเผา และจากการทดลองพบว่าเมื่ออัตรา การอบแห้งเฉลี่ย 1.026 kg H₂O evap./h



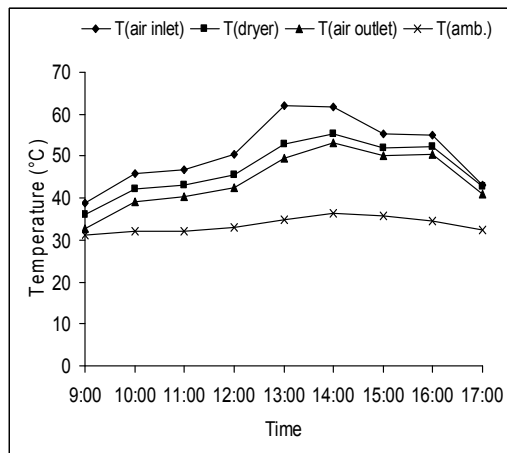
รูปที่ 5.16 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานร่วม แสงอาทิตย์และชีวมวล

5.3.2 ผลการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก

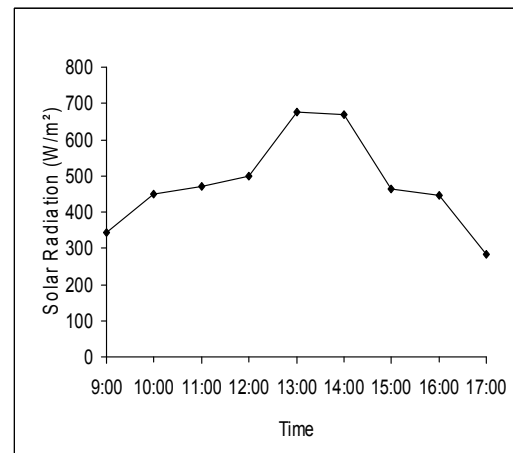
ผลหมากที่ผ่านการอบแห้งจากตอนที่ 1 ทำการแกะเมล็ดหมากออกจากเปลือก เมล็ดหมากมีความชื้น 32.58 %(wb) ปริมาณเท่ากับ 11.3 kg อบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วม แสงอาทิตย์และชีวมวล จนเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 12 %(wb)

(1) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

เมื่อทำการทดลองและบันทึกค่าต่างๆ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00-17.00 น. ทุกชั่วโมง อัตราการไหลของอากาศในห้องอบแห้ง $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อม และอุณหภูมิตรงทางออกของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง $31.3\text{-}36.5^\circ\text{C}$ และ $38.7\text{-}61.9^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยอุณหภูมิทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 17.3°C อุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง $36.1\text{-}55.4^\circ\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมและอากาศตรงทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย $61.5\% \text{RH}$ และ $34.3\% \text{RH}$ ตามลำดับ โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อมสูงกว่าอากาศตรงทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ $23.6\% \text{RH}$ เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์อยู่ในช่วง $282.3\text{-}675.9 \text{ W/m}^2$ (อ้างจากภาคผนวก ค ตารางที่ ค 15) แผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 28% จะเห็นว่าอุณหภูมิในห้องอบแห้งมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิตรงทางออกแผงรับรังสี โดยแตกต่างกัน 4°C ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นและปริมาณเมล็ดหมากจะค่อนข้างต่ำ มีผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับวัตถุเปียกในห้องอบแห้งเกิดขึ้นค่อนข้างน้อย และความร้อนที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ผลิตได้จะแปรผันตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศและความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 5.17



(ก) อุณหภูมิอากาศของเครื่องอบแห้ง
พลังงานแสงอาทิตย์

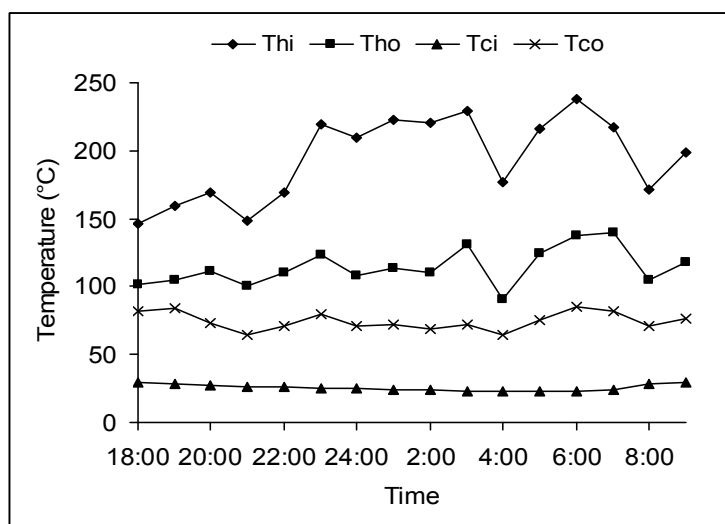


(ข) ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์

รูปที่ 5.17 ผลของอุณหภูมิอากาศ และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์)

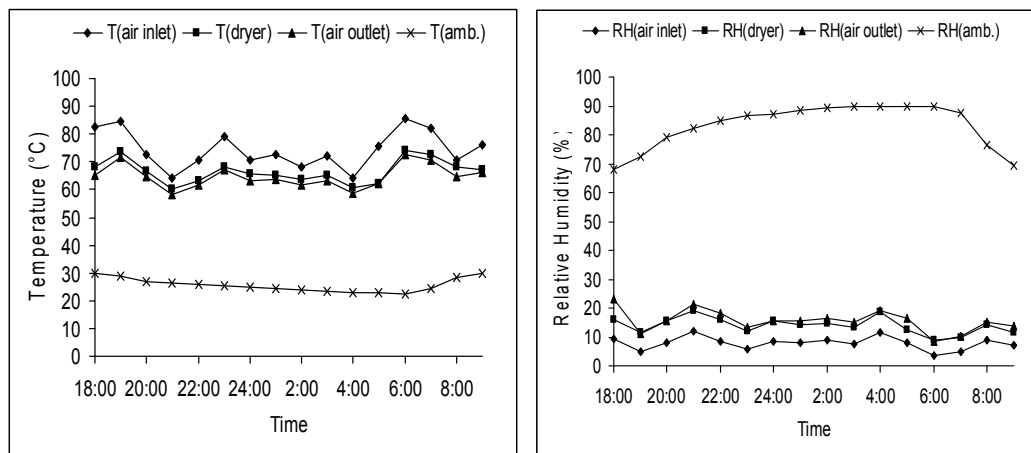
(2) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

จากการทดลองพบว่า อัตราการใช้เชื้อเพลิง 2.18 kg/h อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 0.056 m³/s อุณหภูมิก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในช่วง 194.5-114.6°C และ 25.6-74.4°C ตามลำดับ (อ้างอิงภาคผนวก ค ตารางที่ ค 17) ประสิทธิภาพและประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ย 47.3% และ 35% ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนค่อนข้างมากที่บริเวณเตาเผา และบริเวณปล่องทางออกของแก๊สร้อนเนื่องจากไม่ได้หุ้มฉนวนกันความร้อน อุณหภูมิของกระแสอากาศร้อน และกระแสอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 อุณหภูมิของก๊าซร้อนและอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของ การทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

อุณหภูมิของอากาศตรงทาง เข้า-ออก ห้องอบแห้งเฉลี่ย 74.4°C และ 64.7°C ตามลำดับ มีความแตกต่าง 9.7°C จะเห็นว่าความแตกต่างอุณหภูมิมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการทดลอง อบผลหมากในหัวข้อที่ 5.3.1 ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดหมากที่ใส่อบแห้งมีปริมาณและความชื้นค่อนข้าง ต่ำ ส่งผลให้การถ่ายความร้อนระหว่างอากาศกับวัตถุดิบอบแห้งน้อย มีผลให้มีความร้อนปล่อยทิ้ง จากห้องอบแห้งค่อนข้างสูง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตรงทางด้าน เข้า-ออก ห้องอบแห้งมี ค่าเฉลี่ย 7.7 และ 15.5 %RH ตามลำดับ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ แสดงดังรูปที่ 5.19



(ก) อุณหภูมิอากาศ

(ข) ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

รูปที่ 5.19 ผลของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)

(3) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

การทดลองอบแห้งเมล็ดหมากด้วยพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ประสิทธิภาพของระบบอบแห้งสามารถหาค่าได้ดังต่อไปนี้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง ในหัวข้อ 3.2) การทดลองวันที่ 3 มีนาคม 2552 มีข้อมูลต่างๆดังนี้

น้ำหนักเมล็ดหมากก่อนอบแห้ง = 11.3 kg

น้ำหนักเมล็ดหมากหลังอบแห้ง = 8.6 kg

น้ำหนักของน้ำที่ระเหย = 2.7 kg

ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบแผงรับรังสี

= 61.91 MJ

ปริมาณพลังงานจากชีวมวล = 494.9 MJ

ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ = 5.364 MJ

พลังงานทั้งหมดที่ใช้กับระบบอบแห้ง = 562.17 MJ

ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ = 2.358 MJ/kg (ที่ $T=66.5^{\circ}\text{C}$)

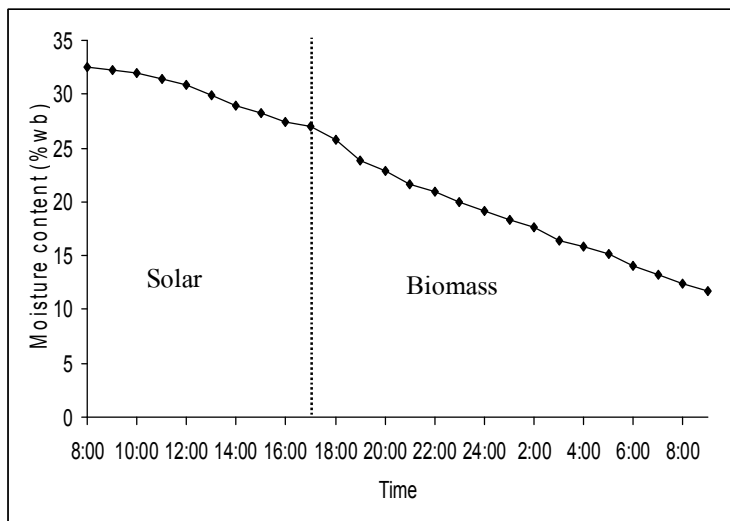
ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง = 1.13 %

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ = 208.21 MJ/kg H_2O evap.

ความสิ้นเปลืองไฟฟ้าจำเพาะ = 1.98 MJ/kg H_2O evap.

(4) ค่าความชื้นหมาก

เมล็ดหมากที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 32.58 %(wb) เมื่อผ่านการอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล รวมระยะเวลา 25 ชั่วโมง พบว่าปริมาณความชื้นของเมล็ดหมากลดลงทีละน้อย และไม่สม่ำเสมอในช่วงของการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนในช่วงการอบด้วยพลังงานชีวมวล ความชื้นจะลดลงค่อนข้างมากและสม่ำเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 36.1-55.4°C (ดังแสดงในรูปที่ 5.17 ก) ซึ่งอุณหภูมิต่ำและไม่สม่ำเสมอ จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา การอบด้วยพลังงานชีวมวลอุณหภูมิในห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 60-74.3°C (ดังแสดงในรูปที่ 5.18) ซึ่งอุณหภูมิต่ำสูงและสม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยที่อุณหภูมิในห้องอบแห้งสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมอัตราการใส่ฟืนในเตาเผา และจากผลการทดลองอบเมล็ดหมากข้างต้น มีอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 0.108 kg H₂O evap./h อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดหมากจากการอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 ผลการลดลงของความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลการทดลองอบแห้งหมากด้วยเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ และเครื่องอบแห้งพลังร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

Description of drying	Laboratory dryer		Solar drying		Biomass drying		Solar and Biomass drying	
	betel nuts fruit	betel nuts kernel	betel nuts fruit	betel nuts kernel	betel nuts fruit	betel nuts kernel	betel nuts fruit	betel nuts kernel
Condition of drying								
Drying time, hr	5	10	18	36	10	19	15	25
Average drying temperature, °C	70	70	44	48.9	64	65.8	50.5	59.4
Air flow rate, m ³ /s	0.25	0.25	0.028	0.028	0.056	0.056	0.039	0.046
Average ambient condition								
Temperture, C	30.3	31.7	35	35.3	25.5	31.1	32.6	28.5
Relative humidity, %			44.8	41.6	83.1	67.8	67.8	74.1
Condition of betelnuts								
Initial moisture content, %wb	63.5	32.8	63	32	64.21	31.45	66.24	32.58
Final moisture content, %wb	47	12.3	48.76	11.74	49.11	11.64	48.56	11.76
Initial weight, kg	2.4	0.66	40	11.5	40	11	40	11.3
Final weight, kg	1.72	0.5	28	8.8	25.5	8.5	24.6	8.6
Water evaporated, kg	0.77	0.16	12	2.7	14.5	2.5	15.4	2.7
Energy consumption								
Electrical, kW-h	7.38	16.8	0.460	0.900	0.840	1.500	0.730	1.490
Solar radiation, W/m ²			504.8	527.4			496.4	477.7
Wood, kg					26.5	40	16	35
Total energy consumption, MJ	26.56	60.48	132.5	276.644	377.7	571	293.02	562.17
Specific energy consumption, MJ/kg H ₂ O evap.	34.5	378	11.04	102	26	228	19	208.21
Drying rate, kg H ₂ O evap./h	0.077	0.015	0.66	0.075	1.45	0.131	1.026	0.108
Specific energy consumption, MJ/kg dried betel nuts	174		46.5		111.6		100	

จากตารางที่ 5.1 พบว่า

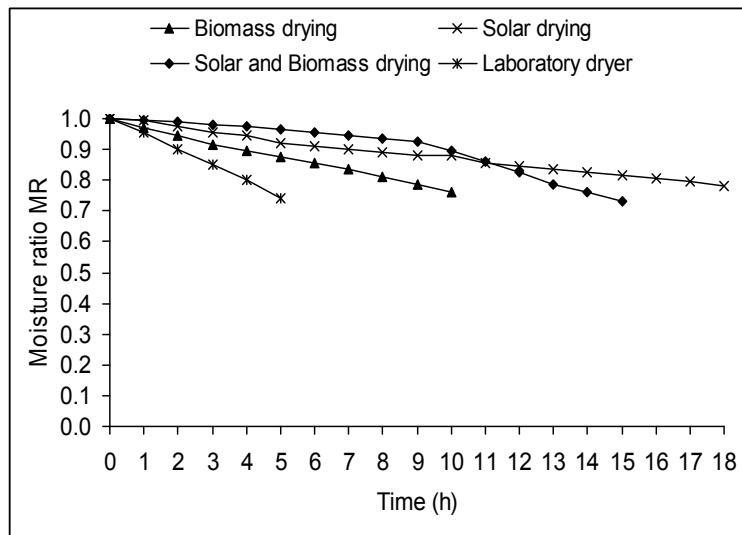
(1) ระยะเวลาอบแห้ง จากผลการทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ทั้งสองขั้นตอนใช้ระยะเวลาการอบแห้งรวมเท่ากับ 15, 54, 29 และ 40 ชั่วโมงตามลำดับ จะเห็นว่า การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ มีระยเวลาน้อยที่สุด และการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว มีระยะเวลามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการหมากที่ใช้อบแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อย (2.4 kg) โดยที่ความชื้นที่ต้องระเหยมีปริมาณน้อยตามไปด้วย และอุณหภูมิในตู้อบแห้งค่อนข้างสูงและคงที่ (70°C) ส่งผลให้การระเหยของความชื้นค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยที่ปริมาณหมากที่ใช้อบแต่ละครั้งเท่ากับ 40 kg มีผลให้ปริมาณความชื้นที่ต้องระเหยมากตามไปด้วย และอุณหภูมิต่ออบแห้งค่อนข้างต่ำประมาณ 46.5°C จึงต้องใช้ระยะเวลาการอบแห้งค่อนข้างมาก ดังที่กล่าวข้างต้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่พัฒนาขึ้น อบโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว มีระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุด คือ 29 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการอบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว และการอบโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล คือ 54 และ 40 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการอบโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งค่อนข้างสูง (65°C) สามารถควบคุมอุณหภูมิโดยการควบคุมอัตราการใส่ฟืนในเตาเผาได้

(2) การใช้พลังงานจำเพาะ จากผลทดลองอบแห้งหมาก การใช้พลังงานจำเพาะอบแห้งเมล็ดหมากค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับการอบแห้งผลหมาก ทั้งนี้เนื่องจากเมล็ดหมากมีเนื้อแน่นและค่อนข้างแข็ง มีผลให้ความชื้นระเหยออกจากเนื้อหมากได้ค่อนข้างยาก ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนาน ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากตามไปด้วย ซึ่งแตกต่างจากการอบแห้งผลหมากที่มีการใช้พลังงานจำเพาะน้อยกว่าหลายเท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้เนื่องจากผลหมากมีส่วนของเปลือกที่หนาลักษณะเป็นใย ส่งผลให้ความชื้นระเหยได้ง่าย ซึ่งจากผลการทดลองอบผลหมาก และเมล็ดหมากโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีค่าการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 34.5, 11.04, 26.05, 19 และ 378, 102, 228, 208.21 MJ/kg H₂O evap. ตามลำดับ

(3) อัตราการอบแห้ง การอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีอัตราการอบแห้งที่ใกล้เคียงกัน แต่การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ มีอัตราการอบแห้ง

ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับการอบแห้งข้างต้น ดังเช่นการอบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ และใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว มีอัตราการอบแห้งเท่ากับ 0.015 และ 0.075 kg H₂O evap./h ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกัน 5 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณเมล็ดหมาก และปริมาณน้ำที่ต้องระเหยค่อนข้างจะแตกต่างกันมาก กล่าวคือ การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ มีปริมาณเมล็ดหมาก 0.66 kg ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยเท่ากับ 0.16 kg แต่การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว มีปริมาณเมล็ดหมาก 11.5 kg ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยเท่ากับ 2.7 kg จึงส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น

(4) การใช้พลังงานต่อผลผลิตเมล็ดหมากแห้ง จากผลการทดลองอบหมากโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีการใช้พลังงานต่อผลผลิตเมล็ดหมากแห้งเท่ากับ 174, 46.5, 111.6 และ 100 MJ/kg dried betel nuts ตามลำดับ จะเห็นว่า การอบหมากโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการจะใช้พลังงานมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการอบโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้าในการอบแห้ง มีการปล่อยทิ้งความร้อนออกจากตู้อบแห้งค่อนข้างมาก และหมากที่อบแต่ละครั้งมีปริมาณน้อย จึงมีผลให้มีการใช้พลังงานต่อผลผลิตเมล็ดหมากแห้งค่อนข้างมาก



รูปที่ 5.21 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 5.21 พบว่า

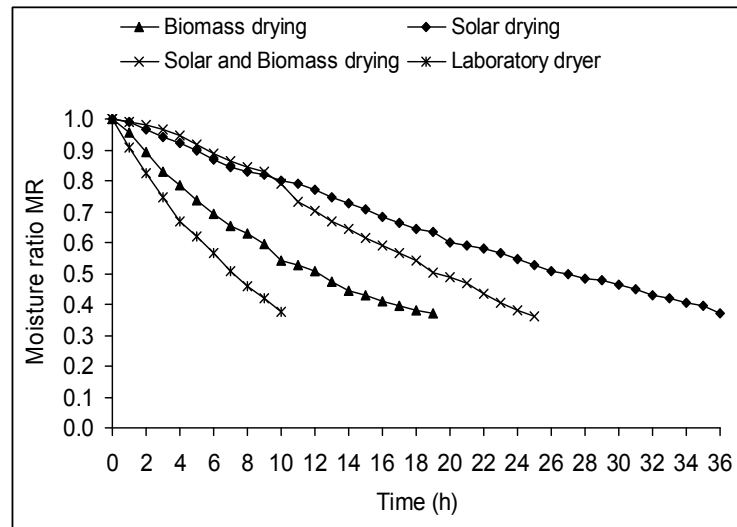
(1) การอบผลหมากโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ปริมาณหมากที่ใช้อบครั้งละ 2.4 kg อุณหภูมิ 70°C อัตราการไหลของอากาศ 0.25 m³/s อัตราการอบแห้ง 0.077 kg H₂O evap./h ระยะเวลาการอบแห้ง 5 ชั่วโมง จะเห็นว่าปริมาณผลหมากสุกที่ใช้อบแห้งแต่ละครั้งค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับอบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (40 kg) อุณหภูมิในห้องอบแห้งและอัตราการไหลของอากาศที่สูงกว่าเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล จึงส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่าแบบอื่นๆ โดยที่น้อยกว่าการอบโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว การอบ โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล การอบ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว เท่ากับ 5, 10 และ 13 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยที่ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ 63.5 %(wb) และ 47 %(wb) ตามลำดับ

(2) การอบผลหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ปริมาณผลหมากที่ใช้อบแห้งครั้งละ 40 kg อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 44°C อัตราการไหลของอากาศ 0.028 m³/s อัตราการอบแห้ง 0.66 kg H₂O evap./h การอบแห้งในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสมีเมฆน้อยจะใช้ระยะเวลาประมาณ 2 วัน (18 ชั่วโมง) โดยที่ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผลหมากเท่ากับ 63 %(wb) และ 48.76 %(wb) ตามลำดับ จะเห็นว่าระยะเวลาอบแห้งค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิในห้องอบแห้งค่อนข้างต่ำ จะแปรค่าตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยใช้เวลาใกล้เคียงกับวิธีการผึ่งแดดของเกษตรกร (2 วัน)

(3) การอบผลหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ปริมาณผลหมากที่ใช้อบแห้งครั้งละ 40 kg อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 64°C อัตราการไหลของอากาศ 0.056 m³/s อัตราการอบแห้ง 1.45 kg H₂O evap./h ระยะเวลาอบแห้ง 10 ชั่วโมง จะเห็นว่าใช้ระยะเวลาอบแห้งค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีอุณหภูมิอบแห้งค่อนข้างสูง และการอบด้วยพลังงานชีวมวล สามารถควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งได้ ด้วยการควบคุมอัตราการใส่ฟืนในเตาเผา โดยที่ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสุดท้ายของผลหมาก 64.21 %(wb) และ 49.11 %(wb) ตามลำดับ

(4) อบผลหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 50.5°C อัตราการไหลของอากาศ 0.039 m³/s อัตราการอบแห้ง 1.026 kg H₂O evap./h ระยะเวลาอบแห้ง 15 ชั่วโมง จะเห็นว่าระยะเวลาการอบแห้ง มากกว่าการอบโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว 5 ชั่วโมง และมากกว่าการอบด้วยเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ 10 ชั่วโมง แต่จะน้อยกว่าการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว 3 ชั่วโมง โดยในชั่วโมง 1-9 เป็นช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จะเห็นว่าอัตราการลดลงของความชื้นค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับชั่วโมงที่

10-15 ซึ่งเป็นช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงการอบด้วยพลังงานชีวมวล อุณหภูมิในห้องอบแห้ง สูงกว่าในช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยที่ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 66.24 %(wb) และ 48.56 %(wb) ตามลำดับ



รูปที่ 5.22 อัตราส่วนความชื้นของเมล็ดหมากในการอบแห้ง โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ

จากรูปที่ 5.22 พบว่า

(1) อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้เครื่องอบขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ ปริมาณเมล็ดหมากที่ใช้อบครั้งละประมาณ 0.66 kg อุณหภูมิอบแห้ง 70°C อัตราการไหลของอากาศ 0.25 m³/s อัตราการอบแห้ง 0.015 kg H₂O evap./h ระยะเวลาอบแห้ง 10 ชั่วโมง จะเห็นว่าปริมาณเมล็ดหมากค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (11 kg) ซึ่งน้อยกว่าประมาณ 16 เท่า อุณหภูมิ และอัตราการไหลของอากาศ ของเครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการที่มากกว่าเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล จึงส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งน้อยกว่า

(2) อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ปริมาณเมล็ดหมาก 11.5 kg อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 48.9°C อัตราการไหลของอากาศ 0.028 m³/s อัตราการอบแห้ง 0.075 H₂O evap./h โดยที่ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของเมล็ดหมากเท่ากับ 32 %(wb)

และ 11.74 %(wb) ตามลำดับ การอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสมีเมฆน้อยใช้เวลาประมาณ 4 วัน (36 ชั่วโมง) จะเห็นว่าใช้เวลาอบแห้งค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิอบแห้งค่อนข้างต่ำ เนื่องจากความร้อนในห้องอบแห้งจะขึ้นกับความชื้นของรังสีดวงอาทิตย์ โดยใช้เวลาใกล้เคียงกับการผึ่งแดดของเกษตรกร (4-5 วัน)

(3) อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานจากชีวมวลอย่างเดียว ปริมาณเมล็ดหมาก 11 kg อุณหภูมิอบแห้ง 65.8°C อัตราการไหลของอากาศ $0.056 \text{ m}^3/\text{s}$ อัตราการอบแห้ง $0.131 \text{ kg H}_2\text{O evap./h}$ เวลาอบแห้ง 19 ชั่วโมง จะเห็นว่าใช้เวลาอบแห้งค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว เนื่องจากการอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลสามารถควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งได้ ด้วยการควบคุมอัตราการใส่ฟืนในเตาเผา โดยที่ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ 31.45 %(wb) และ 11.64 %(wb) ตามลำดับ

(4) อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ปริมาณเมล็ดหมาก 11.3 kg อุณหภูมิอบแห้ง 59.4°C อัตราการไหลของอากาศ $0.046 \text{ m}^3/\text{s}$ อัตราการอบแห้ง $0.108 \text{ kg H}_2\text{O evap./h}$ เวลาอบแห้ง 25 ชั่วโมง จะเห็นว่าใช้เวลามากกว่าการอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว 6 ชั่วโมง และมากกว่าอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการ 15 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว 11 ชั่วโมง โดยที่ในช่วงชั่วโมงที่ 1-9 เป็นช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ จะเห็นว่าอัตราการลดลงของความชื้นค่อนข้างน้อย ในช่วงชั่วโมงที่ 10-25 เป็นช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล อัตราการลดลงของความชื้นจะค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงการอบด้วยพลังงานชีวมวล อุณหภูมิในห้องอบแห้งจะสูงกว่าในช่วงการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยที่ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของเมล็ดหมากเท่ากับ 32.58 %(wb) และ 11.76 %(wb) ตามลำดับ

5.4 ผลการทดสอบคุณภาพของหมากแห้ง

การทดสอบคุณภาพของหมากแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบพลังงานร่วม แสงอาทิตย์และชีวมวลทั้ง 3 แบบ โดยการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ความชื้น Water activity(a_w) จุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา และสี เปรียบเทียบกับหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ โดยพิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมากแห้ง (มผช.1060/2548) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก

5.4.1 ความชื้น

สุ่มตัวอย่างหมาก 3 ตัวอย่างในแต่ละการทดลอง ตัวอย่างละ 50 กรัม นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995) จากผลการทดลองหมากแห้งที่ผ่านการอบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีความชื้นเท่ากับ 11.74, 11.64 และ 11.76 %(wb) ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ มผช.1060/2548 และจากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นหมากแห้งที่อบโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ มีค่าความชื้นเท่ากับ 12.5 %(wb) ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ มผช.1060/2548 ค่าความชื้นของเมล็ดหมากแห้งแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่า Water activity ความชื้นสุดท้าย และปริมาณจุลินทรีย์ของเมล็ดหมากแห้ง ที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ

วิธีอบแห้ง	Water activity (a_w)	ความชื้นสุดท้าย %(wb)	ปริมาณจุลินทรีย์ (โคโลนี/กรัม)	
			จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์และรา
Sun dried	0.72	12.5	1.24×10^3	5.2×10^2
Solar drying	0.68	11.74	3.85×10^2	1.80×10^2
Biomass drying	0.62	11.64	2.0×10^2	1.0×10^2
Solar-Biomass drying	0.69	11.76	2.4×10^2	1.4×10^2
มาตรฐาน (มผช.1060/2548)		12	1×10^4	< 100

5.4.2 Water activity (a_w)

จากผลการทดลองวัดค่า a_w ของเมล็ดหมากที่ผ่านการอบแห้งด้วยแบบต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.2 พบว่าหมากแห้งที่ผ่านการอบโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว มีค่า a_w ต่ำสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.62 ขณะที่หมากแห้งที่ผ่านการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว และ โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีค่า a_w เท่ากับ 0.68 และ 0.69 ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าวิธีการอบแห้งทั้ง 3 วิธีนี้ มีค่า a_w ที่ใกล้เคียงกัน และหมากแห้งที่ผ่านการอบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ มีค่า a_w สูงสุด เท่ากับ 0.72

5.4.3 จุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา

จากตารางที่ 5.2 แสดงผลการวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ในตัวอย่างหมากที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยแบบต่างๆ พิจารณาหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ พบว่ามีจำนวนจุลินทรีย์สูงสุดเท่ากับ 1.24×10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และจำนวนของยีสต์และราสูงสุดเท่ากับ 5.2×100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม โดยที่หมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และ โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล พบว่ามีจำนวนจุลินทรีย์เท่ากับ 3.85×100 , 2.0×100 และ 2.4×100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ตามลำดับ และจำนวนของยีสต์และราเท่ากับ 1.80×100 , 1.0×100 และ 1.4×100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ตามลำดับ

ผลของ a_w ต่อจุลินทรีย์ จะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของจุลินทรีย์ ซึ่งจะมีช่วง a_w ที่จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ ซึ่งนอกจากมีปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์นำไปใช้แล้ว ยังต้องมีอาหารเพียงพอต่อการเจริญ จุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษส่วนใหญ่มักเจริญในอาหารที่มีค่า a_w สูงกว่า 0.85 ส่วนยีสต์และรานั้นทนสภาพแห้งแล้งได้ดีกว่าจุลินทรีย์ จึงเจริญเติบโตได้ในอาหารที่แห้ง ซึ่งมีค่า a_w ต่ำกว่า ดังนั้นหากต้องการให้ปลอดภัยจากจุลินทรีย์และยีสต์และรา ควรควบคุมให้อาหารมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.61 (ฉัตรชัย สังข์ผุด 2551)

หมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ มีปริมาณจุลินทรีย์และยีสต์และราสูงกว่าแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการอบแห้งของเกษตรกร โดยการผึ่งแดดบนลานซีเมนต์หรือบนผ้าเตนท์ ซึ่งจะง่ายต่อการปนเปื้อนของจุลินทรีย์และยีสต์และรา อีกทั้งค่าความชื้นสุดท้ายของเมล็ดหมาก (12.5 %wb) มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งจะมีผลให้ค่า a_w สูงตามไปด้วย ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณจุลินทรีย์และยีสต์และราของหมากแห้ง คือการควบคุมค่า a_w ให้ต่ำกว่า 0.61 เพื่อลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และยีสต์และรา โดยการอบแห้งให้ค่าความชื้นลดต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (12 %wb) อีกทั้งการอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงาน

ร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่พัฒนาขึ้น ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถลดปริมาณของ จุลินทรีย์และยีสต์และราได้ เมื่อเทียบกับการฝังแคดตามธรรมชาติ

5.4.4 สี

ตัวอย่างหมากแห้งที่บดละเอียด วัดค่าสีด้วยเครื่อง colorimeter ยี่ห้อ Hunter Lab ระบบ CIE L*, a*, b* เปรียบเทียบกับหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการฝังแคด วิเคราะห์หาความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new Multiple Rang Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS 11.5 for Window มีผลดังนี้

(1) ค่า L*

ค่า L* เป็นค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 ค่า L* เท่ากับ 0 เป็นสีมืดที่สุด ค่า L* เท่ากับ 100 สีสว่างมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่า หมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีค่าความสว่าง (L*) ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 56.39 ± 0.11 , 56.67 ± 0.43 และ 56.71 ± 0.33 ตามลำดับ โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 0.05$) และหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการฝังแคดตามธรรมชาติ มีความสว่างน้อยกว่าหมากแห้งที่อบด้วยวิธีดังกล่าวข้างต้น (52.29 ± 0.14) ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ค่า L* ดังแสดงในตารางที่ 5.3

(2) ค่า a*

ค่า a* คือค่าบ่งบอกความเป็นสีเขียวและสีแดง โดยค่า a*(+) แสดงความเป็นสีแดง ค่า a*(-) แสดงความเป็นสีเขียว หมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการฝังแคด มีค่าความเป็นสีแดงมากที่สุด (15.72 ± 0.07) โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับหมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ซึ่งมีค่าความเป็นสีแดงเท่ากับ 14.37 ± 0.03 , 14.23 ± 0.07 และ 14.34 ± 0.05 ตามลำดับ ค่า a* แสดงดังตารางที่ 5.3

(3) ค่า b*

ค่า b* คือค่าบ่งบอกความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่า b*(+) แสดงถึงความเป็นสีเหลือง ค่า b*(-) แสดงความเป็นสีน้ำเงิน จากผลการทดลองหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการฝังแคด มีค่าความเป็นสีเหลืองน้อยที่สุด (20.15 ± 0.09) โดยมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับหมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้

พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ซึ่งมีค่าความเป็นสีเหลืองเท่ากับ 21.48 ± 0.10 , 21.62 ± 0.18 และ 21.44 ± 0.01 ตามลำดับ ค่า b^* แสดงดังตารางที่ 5.3

ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่า L^* , a^* และ b^* ของหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการผึ่งแดด อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว อบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล พบว่าหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการผึ่งแดด มีค่า L^* น้อย ค่า a^* มาก และมีค่า b^* น้อย จึงมีแนวโน้มของสีเป็นสีน้ำตาล และหมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว อบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และ อบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีค่า L^* มาก ค่า a^* น้อย และมีค่า b^* มาก มีแนวโน้มของสีเป็นสีน้ำตาลอ่อน ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 5.23 และ 5.24

ความสว่างหรือความขาวในกรณีของพืชจะตีความหมายถึงเม็ดแป้งหรือโปรตีน ซึ่งถ้าสว่างมากหมายถึงเม็ดแป้งหรือโปรตีนยังมีการเปลี่ยนแปลงสีน้อย (color development) จึงเห็นสีขาวหรือความสว่างมากนั่นเอง รังสีแสงอาทิตย์จะมีรังสียูวี ซึ่งทำให้ผิวหมากที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดด มีสีน้ำตาลเข้ม หมากที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ซึ่งอยู่ในห้องอบที่ปิดสนิทไม่โดนรังสียูวีจึงส่งผลให้สีของหมากมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน

ตารางที่ 5.3 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของเมล็ดหมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล และที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ

วิธีอบแห้ง	ค่าสี (mean \pm sd)		
	L^*	a^*	b^*
Sun dried	52.29 ± 0.14^b	15.72 ± 0.07^a	20.15 ± 0.09^b
Solar drying	56.39 ± 0.11^a	14.37 ± 0.03^b	21.48 ± 0.10^a
Biomass drying	56.67 ± 0.43^a	14.23 ± 0.07^c	21.62 ± 0.18^a
Solar and Biomass drying	56.71 ± 0.33^a	14.34 ± 0.05^{bc}	21.44 ± 0.01^a

หมายเหตุ ตัวเลขในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



(ก) Sun dried (ข) Solar drying (ค) Biomass drying (ง) Solar and Biomass drying

รูปที่ 5.23 เปรียบเทียบสีของหมากแห้งบดละเอียด ที่ผ่านการอบแห้งแบบต่างๆ



(ก) Sun dried (ข) Solar drying (ค) Biomass drying (ง) Solar and Biomass drying

รูปที่ 5.24 เปรียบเทียบสีของเมล็ดหมากแห้ง ที่ผ่านการอบแห้งแบบต่างๆ

5.5 สรุป

จากผลทดลองอบแห้งหมากโดยใช้เครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่พัฒนาขึ้น พบว่าการอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ใช้เวลานานที่สุด 54 ชั่วโมง (6 วัน) รองลงมาคือ การอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ใช้เวลา 40 ชั่วโมง และการอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ใช้เวลาน้อยที่สุดเท่ากับ 29 ชั่วโมง หมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการผึ่งแดด ใช้ระยะเวลา 6-8 วัน ซึ่งใกล้เคียงกับการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว คุณภาพของหมากแห้งที่อบโดยเครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวลที่พัฒนาขึ้น ทั้ง 3 แบบ ความชื้น ปริมาณจุลินทรีย์และยีสต์และรา เป็นที่น่าพอใจมากกว่าหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีการผึ่งแดดตามธรรมชาติ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

6.1.1 สมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

การศึกษา และพัฒนาเครื่องอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล สามารถสรุปได้ว่า

(1) จากการศึกษาตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งหมากพบว่า อุณหภูมิและความเร็วอากาศที่เหมาะสม คือ 70°C และ 1 m/s ตามลำดับ

(2) การทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว ขั้นตอนที่ 1 การอบแห้งผลหมากพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 23.9% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบแห้ง 21.7% การใช้พลังงานจำเพาะ $11.04\text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$. ขั้นตอนที่ 2 การอบแห้งเมล็ดหมากพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 26.7% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง 2.32% การใช้พลังงานจำเพาะ $102\text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$

(3) การทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว ขั้นตอนที่ 1 การอบแห้งผลหมากพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 36.89% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง 9% การใช้พลังงานจำเพาะ $26\text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$. ขั้นตอนที่ 2 การอบแห้งเมล็ดหมากพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 30.82% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง 1.02% การใช้พลังงานจำเพาะ $2.5\text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$.

(4) การทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ขั้นตอนที่ 1 การอบแห้งผลหมากพบว่า ช่วงการอบแห้งด้วยพลังแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 25.5% และในช่วงเวลากลางคืนอบแห้งต่อเนื่องด้วยพลังงานชีวมวล ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 35.8% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง 12.51% การใช้พลังงานจำเพาะ $19\text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$. ขั้นตอนที่ 2 การอบแห้งเมล็ดหมากพบว่า ช่วงการอบแห้งด้วยพลังแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 28% และในช่วงการอบด้วยพลังงานชีวมวล ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 25% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง 1.13% การใช้พลังงานจำเพาะ $208.21\text{ MJ/kg H}_2\text{O evap}$.

6.1.2 คุณภาพของหมากแห้ง

(1) ความชื้น หมากแห้งที่อบโดยใช้เครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมากแห้ง (มผช.1060/2548) และหมากแห้งที่ผลิตโดยเกษตรกร มีค่าความชื้นไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

(2) สี หมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้เครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีสีที่ใกล้เคียงกัน (สีน้ำตาลอ่อน) และหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติมีสีน้ำตาลเข้ม แต่ทั้งนี้สีของหมากแห้งที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลกระทบต่อาราคารับซื้อในท้องตลาด แต่ในส่วนของคุณภาพ และจุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา มีผลต่อาราคารับซื้อ

(3) Water activity (a_w) หมากแห้งที่อบโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติอบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว อบโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว และอบโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล มีค่า Water activity เท่ากับ 0.72, 0.68, 0.62 และ 0.69 ตามลำดับ โดยที่หมากแห้งที่อบโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ มีค่า a_w มากที่สุด

(4) จุลินทรีย์ทั้งหมดและยีสต์และรา หมากแห้งที่อบแห้งโดยใช้เครื่องอบพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล ทั้ง 3 แบบ มีปริมาณจุลินทรีย์และยีสต์และรา อยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าหมากแห้งที่อบแห้งโดยเกษตรกรด้วยวิธีผึ่งแดดตามธรรมชาติ ทั้งนี้เปรียบเทียบโดยใช้เกณฑ์มาตรฐานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมากแห้ง (มผช.1060/2548)

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ควรนำเอาความร้อนที่กลับมาใช้ใหม่ อากาศร้อนที่ออกจากห้องอบแห้งยังมีศักยภาพสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในการอบแห้ง โดยการออกแบบท่อไหลกลับ สามารถทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงขึ้น

6.2.2 ควรนำเอาความร้อนที่ปล่อยทิ้งที่ปล่อยระบายควันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกลับมาใช้ เพราะยังมีศักยภาพสูง สามารถนำไปใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร หรือวัสดุอื่นๆได้

6.2.3 ควรมีการหุ้มฉนวนที่เตาเผาชีวมวล เพื่อลดการสูญเสียความร้อน สามารถทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น

6.2.4 ควรมีการสลับถาดวางผลิตภัณฑ์แต่ละชั้นในระหว่างการอบแห้ง เนื่องจากในแต่ละชั้นผลิตภัณฑ์แห้งไม่สม่ำเสมอกัน โดยชั้นด้านบนจะแห้งมากกว่าชั้นด้านล่าง ดังนั้นการสลับถาดระหว่างชั้นบนกับชั้นล่างจะช่วยให้การแห้งของผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานและภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2547. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. บริษัทจรัสรัตน์ จำกัด กรุงเทพฯ
- กรมส่งเสริมการเกษตร. 2549. อนาคตหมากจะเป็นอย่างไร (ออนไลน์). สืบค้นจาก:
<http://www.doae.go.th/LIBRARY/html/detail/futureofac/inde.htm> (30 มกราคม 2552)
- จงจิตร หิรัญลาภ. 2520. กระบวนการพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน. สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ฉัตรชัย สังข์ผุด. 2551. จุลชีววิทยาทางอาหาร. นครศรีธรรมราช: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช.
- ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2531. อนุกรมพลังงานออกแบบและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. กรุงเทพฯ: คณะพลังงานและวัสดุ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธีรเดช ใหญ่บุง, มาริษา มะหนิ, จอมพบ แวศักดิ์, นพนนท์ นานคงเนบ และ ภรพนา บัวเพ็ชร. 2550. “การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบถาดโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าแบบหมุนเวียนอากาศ”, การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3, 1-5.
- บัญญัติ นิยมवास. 2544. การพัฒนาระบบอบแห้งผลปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พุทธิพงษ์ แสนสบาย. 2539. การพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน เพื่อใช้ออบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ยุทธนา กุลอินทรประเสริฐ. 2548. การถนอมอาหารด้วยการอบแห้ง. ใน เทคโนโลยีอบแห้งในอุตสาหกรรมอาหาร, วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, บรรณาธิการ. หน้า 114-130. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- รัฐธิปไตย ปางวัชราร. 2545. การพัฒนาเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วรวิทย์ รุ่งจิรวารักษ์. 2538. การศึกษาระบบอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์ขนาดอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- สมชาติ โสภณธฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ส่วนวิจัยเกษตรกรรม ธนาคารกสิกรไทย. 2532. หมาก. สมุนไพร 10 (1/2532): 26-36.
- สุขฤดี นาดกรณกุล, บงกช ประสิทธิ์, รตนรรม์ บุญมัติ และ จารุณี มั่งทัด. 2547. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแก๊สชีวภาพ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. วิทยาลัยพลังงานทดแทน. มหาวิทยาลัยนเรศวร
- สุขฤดี สุขใจ. 2535. สมรรถนะของเครื่องอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนและแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- โสรจ คีรีเลิศ. 2538. การอบแห้งกระเทียมโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานจากก๊าซชีวมวล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Amer, B.M.A., Hossain, M.A. and Gottschalk, K., 2010, "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana" *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp 813-820.
- AOAC. 1995, *Official Method of Analysis*, 16th ed, The Association of Official Analytical Chemists.
- Ekechukwu, O. V., 1999, "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory," *Energy Conversion and Management*, Vol. 40, pp 593-613.
- Ekechukwu, O.V. and Norton, B., 1999, "Review of solar energy drying system II: an overview of solar drying technology," *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, pp 615 – 655.
- Ekechukwu, O.V. and Norton, B., 1999, "Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications," *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, pp 657–667.
- E. Servizi S.r.l. 1987. *Wood energy through steam engine*. TARGET Technology, Rome
- Fadhela, A., Koolia, S., Farhata, A. and Bellghith, A., 2005, "Study of the solar drying of grapes by three different processes," *Desalination*, Vol. 185, pp 535-541.
- Holman, J.P. 1981. *Heat Transfer*. Fifth Edition. McGraw-Hill.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Kaleemullah, S. and Kailappan, R., 2006, "Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies," *Journal of Food Engineering*, Vol. 76, pp 531-537.
- Kolawole, O. and Emmanuel, S., 2007, "Air-drying and rehydration characteristics of date palm(*Phoenix dactylifera* L.) fruits" *Journal of Food Engineering*, Vol. 79, pp 724-730.
- Madhlapa, A. and Ngwalo, G., 2007, "Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater," *Solar Energy*, Vol. 81, pp 449-462.
- Mastekbayeva, G.A., Bhatta, C.P., Leon, M.A. and Kumar, S. 1999. Experimental studies on hybrid dryer. Asian Institute of Technology.
- Meeso, N., Nathakaranakule, A., Madhiyanon, T. and Soponronnarit, S., 2004, "Influence of FIR irradiation on paddy moisture reduction and milling quality after fluidized bed drying," *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp 293-301.
- Prasad, J. and Vijay, V.K. 2005, "Experimental studies on drying of *Zingiber officinale*, *Curcuma longa* l. and *Tinospora cordifolia* in solar-biomass hybrid drier," *Renewable energy*, Vol. 30, pp 2097-2109.
- Shrikant Baslingappa Swami, Das, S.K. and Maiti, B., 2007, "Convective hot air drying and quality characteristics of bori:A traditional Indian nugget prepared from black gram pulse batter," *Journal of Food Engineering*, Vol. 79, pp 225-233.
- Thanaraj, T., Dharmasena, D.A.N. and Samarajeewa, U., 2004, "Development of solar hybrid dryer for small scale copra processing," *Tropical Agriculture Research*, Vol. 16, pp 305-315.
- Turhan Koyuncu, Yunus Pinar. and Fuat Lule, 2007, "Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegusmonogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits," *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, pp.1471-1475.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนหมากแห้ง
(มผช.1060/2548)

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมหมากที่ทำให้แห้ง อยู่ในลักษณะเป็นชิ้นบรรจุในภาชนะบรรจุ

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้มีดังต่อไปนี้

2.1 หมากแห้ง หมายถึง ผลไม้ที่ได้ออกจากการนำผลหมากที่สดและอยู่ในสภาพดีมาแกะเปลือกออก นำส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นเป็นชิ้นตามขนาดที่ต้องการ ทำให้แห้งโดยใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือแหล่งพลังงานอื่น

3. คุณลักษณะที่ต้องการ

3.1 ลักษณะทั่วไป

ต้องเป็นชิ้นแห้ง อาจมีชิ้นหักปนอยู่ได้บ้างเล็กน้อย

3.2 สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของหมากแห้ง

3.3 กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของหมากแห้ง ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนตามข้อ 8.1 แล้ว ต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคนไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนนจากผู้ตรวจสอบคนใดคนหนึ่ง

3.4 สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ดิน ทราย กรวด ชิ้นส่วนหรือสิ่งปฏิกูลจากสัตว์

3.5 ความชื้น

ต้องไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

3.6 จุลินทรีย์

3.6.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.6.2 ยีสต์และรา ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

4. สุขลักษณะ

4.1 สุขลักษณะในการทำหมักแห้ง ให้เป็นไปตามคำแนะนำตามภาคผนวก ก.

5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุหมักแห้งในภาชนะบรรจุที่สะอาด ปิดได้สนิท และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

5.2 น้ำหนักสุทธิของหมักแห้งในแต่ละภาชนะบรรจุต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจุหมักแห้งทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้อย่างชัดเจน

- (1) ชื่อเรียกผลิตภัณฑ์ เช่น หมักแห้ง หมาก
- (2) น้ำหนักสุทธิ
- (3) วัน เดือน ปีที่ทำ และวัน เดือน ปีที่หมดอายุ หรือข้อความ “ควรบริโภคก่อน (วัน เดือน ปี)”
- (4) ข้อแนะนำในการบริโภคและการเก็บรักษา
- (5) ชื่อผู้ทำหรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

7. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง หมักแห้งที่ทำในระยะเวลาเดียวกัน

7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบสิ่งแปลกปลอม การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อ

ตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.4 ข้อ 5. และข้อ 6. จึงจะถือว่าหมากแห่งรูนนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป สี และกลิ่นรส ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้อ 7.2.1 แล้ว จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.1 ถึงข้อ 3.3 จึงจะถือว่าหมากแห่งรูนนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบความชื้น ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันจำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เพื่อทำเป็นตัวอย่างรวม โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 100 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่มโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.5 จึงจะถือว่าหมากแห่งรูนนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.4 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบจุลินทรีย์ ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เพื่อทำเป็นตัวอย่างรวม โดยมีน้ำหนักรวมไม่น้อยกว่า 200 กรัม กรณีตัวอย่างไม่พอให้ชักตัวอย่างเพิ่มโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันให้ได้ตัวอย่างที่มีน้ำหนักรวมตามที่กำหนด เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.6 จึงจะถือว่าหมากแห่งรูนนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างหมากแห่งต้องเป็นไปตามข้อ 7.2.1 ข้อ 7.2.2 ข้อ 7.2.3 และข้อ 7.2.4 ทุกข้อ จึงจะถือว่าหมากแห่งรูนนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

8. การทดสอบ

8.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป สี และกลิ่นรส

8.1.1 ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบหมากแห่งอย่างน้อย 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 เติตัวอย่างหมากแห่งลงในจานกระเบื้องสีขาว ตรวจสอบโดยการตรวจพินิจและชิม

8.1.3 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน

(ข้อ 8.1.3)

ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน(คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ต้องเป็นชั้นแห้ง อาจมีชั้นหัก ปนอยู่ได้บ้างเล็กน้อย	4	3	2	1
สี	ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของ หมากแห้ง	4	3	2	1
กลิ่นรส	ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติ ของหมากแห้ง ปราศจากกลิ่น รสอื่นที่ไม่พึงประสงค์	4	3	2	1

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก

ให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบความชื้น

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.4 การทดสอบจุลินทรีย์

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.5 การทดสอบน้ำหนักสุทธิ

ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก.

สุขลักษณะ

(ข้อ 4.1)

ก.1 สถานที่ตั้งและอาคารที่ทำ

ก.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและที่ใกล้เคียงอยู่ในที่ที่จะไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย โดย

ก.1.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและบริเวณโดยรอบ สะอาด ไม่มีน้ำขังและและ

สกปรก

ก.1.1.2 อยู่ห่างจากบริเวณหรือสถานที่ที่มีฝุ่นเขม่า ควัน มากผิดปกติ

ก.1.1.3 ไม่อยู่ใกล้เคียงกับสถานที่น่ารังเกียจเช่น บริเวณเพาะเลี้ยงสัตว์ แหล่งเก็บหรือกำจัดขยะ

ก.1.2 อาคารที่มีขนาดเหมาะสม มีการออกแบบและก่อสร้างในลักษณะที่ง่ายแก่การบำรุงรักษา การทำความสะอาด และสะดวกในการปฏิบัติงาน โดย

ก.1.2.1 พื้น ฝาผนัง และเพดานของอาคารที่ทำ ก่อสร้างด้วยวัสดุที่คงทน เรียบ ทำความสะอาด และซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

ก.1.2.2 แยกบริเวณที่ทำออกเป็นสัดส่วน ไม่อยู่ใกล้ห้องสุขา ไม่มีสิ่งของที่ไมใช้แล้วหรือไม่เกี่ยวข้องกับการทำอยู่ในบริเวณที่ทำ

ก.1.2.3 พื้นที่ปฏิบัติงานไม่แออัด มีแสงสว่างเพียงพอ และมีการระบายอากาศที่เหมาะสม

ก.2 เครื่องมือเครื่องจักร และอุปกรณ์ในการทำ

ก.2.1 ภาชนะหรืออุปกรณ์ในการทำที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ ทำจากวัสดุที่มีผิวเรียบ ไม่เป็นสนิม ล้างทำความสะอาดได้ง่าย

ก.2.2 เครื่องมือเครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ สะอาด เหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนติดตั้งได้ง่าย มีปริมาณเพียงพอ รวมทั้งสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

ก.3 การควบคุมกระบวนการทำ

ก.3.1 วัตถุดิบและส่วนผสมในการทำ สะอาด มีคุณภาพดี มีการล้างหรือทำความสะอาดก่อนนำไปใช้

ก.3.2 การทำ การเก็บรักษา การขนย้าย และการขนส่ง มีการป้องกันการปนเปื้อนและการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์

ก.4 การสุขาภิบาล การบำรุงรักษาและการทำความสะอาด

ก.4.1 น้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และมีมือของผู้ทำ เป็นน้ำสะอาดและมีปริมาณเพียงพอ

ก.4.2 มีวิธีการป้องกันและกำจัดสัตว์นำเชื้อ แมลงและฝุ่นผง ไม่ให้เข้าในบริเวณที่ทำตามความเหมาะสม

ก.4.3 มีการกำจัดขยะ สิ่งสกปรก และน้ำทิ้ง อย่างเหมาะสมเพื่อไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนกลับลงสู่ผลิตภัณฑ์

ก.4.4 สารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด และใช้กำจัดสัตว์นำเชื้อและแมลง ใช้ในปริมาณที่เหมาะสม และเก็บแยกจากบริเวณที่ทำ เพื่อไม่ให้ปนเปื้อนลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้

ก.5 บุคลากรและสุขลักษณะของผู้ทำ

ผู้ทำทุกคน ต้องรักษาความสะอาดส่วนบุคคลให้ดี เช่น สวมเสื้อผ้าที่สะอาด มีผ้าคลุมผมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นผมหล่นลงในผลิตภัณฑ์ ไม่ไว้เล็บยาว ล้างมือให้สะอาดทุกครั้งก่อนปฏิบัติงาน หลังการใช้ห้องสุขาและเมื่อมือสกปรก

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์คุณภาพมากแห่ง

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1995)

อุปกรณ์

1. ตู้อบไฟฟ้า (Oven)
2. ถ้วยหาความชื้น (Moisture can)
3. โถดูดความชื้น (Dessicator)

วิธีการ

ชั่งตัวอย่างหมากรประมาณ 150 กรัม ใส่ในภาชนะอลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจน น้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 °C ประมาณ 9-12 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง กำหนดปริมาณความชื้น โดยน้ำหนักเปียก (wet basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

กำหนดปริมาณความชื้น โดยน้ำหนักแห้ง (dry basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{ร้อยละความชื้น โดยน้ำหนักเปียก}) \times 100}{(100 - \text{ร้อยละความชื้น โดยน้ำหนักเปียก})}$$

2. การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)

อุปกรณ์

1. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ยี่ห้อ Novasina รุ่น Thermoconstanter

วิธีการ

1. ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีให้ได้ 25°C แล้วปรับตั้งเครื่อง วัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีด้วยเกลือมาตรฐาน
2. บดตัวอย่างหมากรแห้งให้ละเอียดและบรรจุลงในตลับพลาสติกให้ได้ปริมาตรที่เหมาะสม โดยประมาณร้อยละ 80-90 แล้วนำตลับตัวอย่างใส่ลงใน Measuring chamber
3. ค่าที่เครื่องวัดได้เป็นค่า Equilibrium relative humidity (ERH) เมื่อหารด้วย 100 จะได้ค่า วอเตอร์แอกทิวิตีตามที่ต้องการ

3. วิเคราะห์หาค่าสี (Color test)

วัดค่าสีด้วยเครื่อง Colourimeter ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น ColorFlex 45/0 ระบบ CIE L*, a*, b* โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (Illuminant) แบบ D65/10° โดยค่าสี L* เป็นค่าของความสว่าง (lightness) โดยเมื่อ L* มีค่าเป็น 0 แสดงถึงสีดำและเมื่อ L* มีค่า 100 แสดงถึงสีขาวที่สุด (สีขาว) ค่า a* (+) เป็นค่าสีแดง (redness), (-) ค่าสีเขียว (greenness) และ b* (+) เป็นค่าสีเหลือง (yellowness), (-) ค่าสีน้ำเงิน (blueness)

อุปกรณ์

1. เครื่อง Colourimeter ยี่ห้อ Hunter Lab
2. คอมพิวเตอร์

วิธีการ

1. ตรวจสอบมาตรฐานของเครื่องวัดสี ทำการ standardized ทุกครั้ง โดยใช้แผ่นเทียบมาตรฐานสีดำ (black) และสีขาว (white)
2. ใส่วงแหวนสีดำขนาด 10 มิลลิเมตร ลงในถ้วยแก้ว (glass sample cup) ขนาด 2.5 นิ้ว
3. นำตัวอย่างหมากแห้งที่บดละเอียดใส่ใน glass sample cup จนตัวอย่างอยู่เหนือระดับวงแหวนนำแผ่นดิสที่เคลือบเซรามิกสีสีขาวมาวางกดทับบนตัวอย่าง เพื่อให้ตัวอย่างเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน
4. นำ glass sample cup วางบนเครื่อง ครอบปิดตัวอย่างด้วยถ้วยทึบแสง เพื่อป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกมีผลกระทบต่อ detector
5. อ่านค่าสีที่วัดได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์ในรูปแบบ L*, a*, b*



รูปที่ ข 1 เครื่องวัดสียี่ห้อ Hunter Lab

ภาคผนวก ค
ข้อมูลการทดลองเครื่องอบแห้งหมาก

ตารางที่ ค 1 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

Time (hour)	Solar drying								Solar radiation (W/m ²)
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient		
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	
9:00	39.8	36.2	37.7	53.9	34.9	66.6	34.9	51.2	387.9
10:00	52.4	32.5	42.4	48.7	37.9	67.9	36.3	47.5	579.9
11:00	60.5	23.6	45.1	39.3	39.8	59.4	36.2	41.6	697.4
12:00	65.6	19.2	47.2	34.5	40.9	55.3	36.1	39.5	801.3
13:00	64.9	20.4	47.9	34.0	42.0	53.2	37.5	38.7	734.3
14:00	61.1	21.2	47.6	35.3	42.5	52.9	36.9	40.9	575.8
15:00	57.8	23.6	45.9	36.8	41.6	52.6	36.0	44.3	506.6
16:00	50.8	24.0	43.8	40.1	41.2	52.1	34.8	48.2	202.1
17:00	47.3	27.5	42.5	42.2	40.4	52.7	34.9	49.2	178.1
9:00	35.0	63.7	30.2	79.6	28.6	88.8	29.1	63.1	280.0
10:00	44.4	47.6	37.7	59.5	34.3	76.2	33.0	49.5	400.0
11:00	53.3	27.2	44.3	34.0	39.0	52.5	34.7	43.6	515.0
12:00	55.6	23.7	45.8	29.6	41.2	44.3	34.1	43.3	578.0
13:00	61.7	20.9	48.1	26.2	42.7	40.9	35.8	39.1	722.0
14:00	64.1	18.4	50.2	23.0	45.0	36.3	36.3	37.0	744.6
15:00	56.1	19.3	48.1	24.1	44.8	34.4	34.9	40.8	580.6
16:00	54.5	20.2	47.3	25.2	44.9	33.9	34.7	41.1	456.9
17:00	41.5	27.9	40.1	34.9	38.0	39.5	33.0	48.8	145.9
Average	53.7	27.6	44.0	38.9	40.0	53.3	35.0	44.8	504.8
Maximum	65.6	63.7	50.2	79.6	45.0	88.8	37.5	63.1	801.3
Minimum	35.0	18.4	30.2	23.0	28.6	33.9	29.1	37.0	145.9

ตารางที่ ค 2 ข้อมูลความชื้นของผลหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลองอบแห้ง
ผลหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Solar drying						
	Tray1	Tray2	Tray3	Tray4	Tray5	Tray6	Average
8:00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00	63.00
9:00	62.40	62.58	62.65	62.65	62.67	62.65	62.60
10:00	60.94	61.33	61.51	61.56	61.60	61.52	61.41
11:00	59.27	59.84	60.19	60.29	60.35	60.20	60.02
12:00	58.47	59.16	59.56	59.73	59.85	59.65	59.40
13:00	56.91	57.69	58.15	58.40	58.50	58.59	58.04
14:00	55.98	56.90	57.39	57.74	57.96	57.75	57.29
15:00	55.28	56.29	56.77	57.17	57.44	57.23	56.70
16:00	54.49	55.62	56.09	56.56	56.89	56.71	56.06
17:00	53.79	55.01	55.48	56.00	56.35	56.23	55.48
8:00	53.87	54.99	55.46	56.05	56.38	56.56	55.55
9:00	52.05	53.44	53.93	54.56	54.89	55.03	53.98
10:00	51.24	52.84	53.38	54.07	54.41	54.52	53.41
11:00	50.39	52.16	52.71	53.44	53.83	53.90	52.74
12:00	49.61	51.52	52.08	52.87	53.32	53.34	52.12
13:00	48.71	50.76	51.28	52.17	52.65	52.69	51.38
14:00	47.79	50.00	50.47	51.47	52.00	52.05	50.63
15:00	47.13	49.42	49.87	50.93	51.48	51.57	50.07
16:00	46.21	48.64	49.04	50.22	50.81	50.93	49.31
17:00	45.56	48.09	48.45	49.71	50.31	50.45	48.76

ตารางที่ ค 3 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งเมล็ด
หมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

Time (hour)	Solar drying								Solar radiation (W/m ²)
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient		
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	
9:00	32.5	58.0	29.5	66.7	27.0	63.0	29.6	64.0	222.3
10:00	46.5	38.1	42.2	43.8	39.0	44.1	33.4	49.0	596.8
11:00	57.1	23.1	49.9	26.5	46.2	27.3	35.4	39.8	728.8
12:00	52.5	23.8	48.0	27.3	47.0	29.4	34.4	45.0	453.1
13:00	58.1	19.0	51.6	21.8	50.0	25.8	36.2	34.7	740.3
14:00	64.0	16.7	54.6	19.2	53.2	23.5	36.7	36.0	807.2
15:00	54.9	18.3	50.5	21.1	49.8	25.0	35.2	39.0	423.3
16:00	47.9	20.9	44.3	24.1	43.2	27.9	33.0	43.7	271.7
17:00	38.9	28.3	36.0	32.5	35.0	38.9	31.0	54.8	94.1
9:00	39.6	34.5	36.7	39.7	34.1	37.6	32.5	44.3	388.2
10:00	51.0	22.0	47.0	25.3	45.2	23.4	36.4	39.2	552.7
11:00	61.1	15.3	55.2	17.6	53.4	16.2	37.5	37.8	620.0
12:00	65.0	11.4	57.2	13.1	55.4	12.2	38.0	36.3	730.0
13:00	60.3	12.6	52.8	14.5	51.2	14.5	36.0	35.7	583.6
14:00	63.3	10.3	58.7	11.8	57.8	12.8	39.8	36.2	725.2
15:00	62.0	11.6	57.0	13.3	56.0	14.0	38.3	38.2	636.7
16:00	54.6	12.0	51.5	13.7	50.4	16.5	37.0	41.7	464.5
17:00	46.3	23.9	43.3	27.4	42.3	33.3	34.0	51.2	233.2
9:00	37.1	36.5	35.9	41.9	35.1	38.5	32.1	46.3	305.0
10:00	50.5	23.6	46.4	27.2	43.7	25.4	35.2	41.2	548.8
11:00	59.7	16.9	53.3	19.5	50.6	18.2	36.6	39.8	679.8
12:00	65.6	13.0	57.7	15.0	53.9	14.2	36.5	38.3	774.0
13:00	67.8	11.7	59.6	13.4	55.0	13.3	38.5	34.7	820.5
14:00	58.9	11.9	53.6	13.7	51.6	14.8	37.1	38.2	520.2
15:00	60.8	13.2	55.8	15.2	52.3	16.0	36.8	41.5	715.2

ตารางที่ ค 3 (ต่อ) ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้งของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว

Time (hour)	Solar drying								Solar radiation (W/m ²)
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient		
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	
16:00	52.1	13.6	48.7	15.6	46.4	18.5	35.6	43.7	395.2
17:00	40.0	25.5	38.7	29.3	36.1	35.3	32.4	54.8	91.9
9:00	36.7	34.7	34.1	39.8	33.0	36.5	31.6	44.0	289.8
10:00	49.5	22.5	45.4	25.8	44.2	24.1	34.3	39.1	521.3
11:00	58.4	16.1	52.8	18.5	50.3	17.3	35.7	36.1	645.8
12:00	64.0	12.4	56.6	14.2	55.1	13.5	37.0	34.2	735.3
13:00	66.1	11.1	58.5	12.8	56.1	12.6	37.6	33.0	805.3
14:00	62.6	11.3	57.3	13.0	53.5	14.1	36.2	34.2	712.5
15:00	59.4	12.6	54.8	14.4	52.5	15.2	35.9	37.1	692.1
16:00	51.0	16.2	46.7	18.6	45.9	21.9	34.8	43.7	375.4
17:00	38.9	24.2	37.7	27.9	37.0	33.5	31.7	52.1	87.3
Average	53.7	20.2	48.9	23.2	46.9	24.1	35.3	41.6	527.4
Maximum	67.8	58.0	59.6	66.7	57.8	63.0	39.8	64.0	820.5
Minimum	32.5	10.3	29.5	11.8	27.0	12.2	29.6	33.0	87.3

ตารางที่ ค 4 ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลองอบแห้ง
เมล็ดหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดี่ยว

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Solar drying						
	Tray1	Tray2	Tray3	Tray4	Tray5	Tray6	Average
8:00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
9:00	31.60	31.60	31.59	31.68	31.67	31.69	31.64
10:00	30.93	30.94	30.83	31.00	31.04	31.06	30.97
11:00	30.09	30.12	29.96	30.15	30.27	30.28	30.15
12:00	29.38	29.46	29.28	29.40	29.61	29.61	29.46
13:00	28.66	28.75	28.50	28.69	28.97	28.95	28.75
14:00	27.71	27.85	27.51	27.72	28.08	28.07	27.82
15:00	26.99	27.16	26.80	26.44	26.97	27.42	26.96
16:00	26.44	26.63	26.24	26.36	26.97	26.87	26.58
17:00	26.06	26.25	25.90	26.08	26.64	26.57	26.25
8:00	25.44	25.61	25.19	25.52	26.16	26.04	25.66
9:00	24.99	25.18	24.71	25.08	25.75	25.64	25.23
10:00	24.44	24.60	24.10	24.50	25.22	25.11	24.66
11:00	23.67	23.84	23.31	23.74	24.54	24.42	23.92
12:00	22.91	23.11	22.58	22.95	23.83	23.72	23.18
13:00	22.29	22.53	21.95	22.34	23.27	23.15	22.59
14:00	21.59	21.86	21.26	21.63	22.61	22.50	21.91
15:00	20.87	21.18	20.57	20.92	21.97	21.83	21.22
16:00	20.28	20.59	19.99	20.33	21.42	21.29	20.65
17:00	19.88	20.20	19.61	19.92	21.04	20.91	20.26
8:00	18.85	19.01	18.47	18.92	20.07	19.97	19.21
9:00	18.51	18.71	18.17	18.60	19.78	19.67	18.90
10:00	18.16	18.41	17.87	18.27	19.48	19.37	18.59

**ตารางที่ 4 (ต่อ) ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลอง
อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว**

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Solar drying						
	Tray1	Tray2	Tray3	Tray4	Tray5	Tray6	Average
11:00	17.62	17.88	17.33	17.72	18.93	18.86	18.06
12:00	16.95	17.24	16.70	17.06	18.28	18.24	17.41
13:00	16.37	16.65	16.14	16.44	17.68	17.69	16.83
14:00	15.78	16.05	15.50	15.91	17.10	17.16	16.25
15:00	15.34	15.68	15.16	15.50	16.68	16.79	15.86
16:00	15.01	15.32	14.88	15.10	16.31	16.43	15.51
17:00	14.85	15.16	14.77	14.98	16.17	16.29	15.37
8:00	14.19	14.57	14.18	14.40	15.58	15.71	14.77
9:00	13.92	14.17	13.79	14.09	15.21	15.43	14.43
10:00	13.77	14.05	13.67	13.97	15.09	15.31	14.31
11:00	13.46	13.72	13.39	13.59	14.80	15.00	13.99
12:00	13.04	13.28	12.99	13.21	14.33	14.60	13.57
13:00	12.38	12.79	12.69	12.90	13.98	14.30	13.17
14:00	11.52	11.93	11.86	12.05	13.10	13.35	12.30
15:00	11.30	11.72	11.63	11.83	12.87	13.14	12.08
16:00	11.11	11.53	11.42	11.66	12.71	12.95	11.90
17:00	10.95	11.36	11.27	11.50	12.54	12.81	11.74

ตารางที่ ค 5 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลอง
อบแห้งผลหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

Time (hour)	T_{hi} (°C)	T_{ho} (°C)	T_{ci} (°C)	T_{co} (°C)
20:00	262	140	26.3	85.0
21:00	288	153	25.9	95.0
22:00	258	137	25.6	99.0
23:00	241	130	25.7	98.0
24:00	259	140	25.5	93.9
1:00	226	121	25.4	97.3
2:00	207	113	25.6	93.9
3:00	226	134	25.4	96.2
4:00	250	138	24.9	98.0
5:00	258	137	25.1	96.0
Average	248	134	25.5	95.2
Maximum	287.8	153.0	26.3	99.0
Minimum	206.5	112.7	24.9	85.0

ตารางที่ 6 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

Time (hour)	Biomass drying							
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient	
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)
20:00	85.0	15.4	54.4	24.9	50.2	33.3	26.3	81.9
21:00	95.0	1.4	65.0	16.7	62.3	20.1	25.9	82.1
22:00	99.0	2.7	69.0	15.3	66.7	17.2	25.6	83.1
23:00	98.0	2.9	64.2	16.6	62.3	18.7	25.7	83.3
24:00	93.9	3.9	59.0	20.2	57.7	22.9	25.5	83.7
1:00	97.3	3.4	63.9	17.4	62.0	19.3	25.4	83.6
2:00	93.9	2.4	66.2	15.5	63.3	17.0	25.6	82.8
3:00	96.2	2.1	64.9	14.8	63.1	16.6	25.4	83.2
4:00	98.0	1.8	66.9	13.4	64.4	15.3	24.9	84.3
5:00	96.0	2.6	66.3	13.2	64.7	14.8	25.1	83.6
Average	95.2	3.9	64.0	16.8	61.7	19.5	25.5	83.1
Maximum	99.0	15.4	69.0	24.9	66.7	33.3	26.3	84.3
Minimum	85.0	1.4	54.4	13.2	50.2	14.8	24.9	81.9

ตารางที่ 7 ข้อมูลความชื้นของผลหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลอง
อบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Biomass drying						
	tray1	tray2	tray3	tray4	tray5	tray6	Average
19:00	64.21	64.21	64.21	64.21	64.21	64.21	64.21
20:00	62.61	62.57	62.42	59.98	62.05	62.42	62.01
21:00	60.69	60.71	60.55	58.72	60.35	61.03	60.34
22:00	58.59	58.68	58.54	57.31	58.58	59.49	58.53
23:00	57.00	57.11	57.01	56.20	57.30	58.33	57.16
24:00	55.68	55.82	55.78	55.26	56.28	57.36	56.03
1:00	54.17	54.35	54.41	54.25	55.12	56.27	54.76
2:00	52.52	52.71	52.84	53.10	53.78	55.06	53.33
3:00	50.99	51.17	51.38	52.08	52.56	53.91	52.02
4:00	49.28	49.50	49.80	50.94	51.25	52.78	50.59
5:00	47.55	47.82	48.25	49.78	49.97	51.65	49.17

ตารางที่ ค 8 ข้อมูลสภาพอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ของการทดลองอบแห้ง
เมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

Time (hour)	T_{hi} (°C)	T_{ho} (°C)	T_{ci} (°C)	T_{co} (°C)
9:00	190.0	122.0	29.4	64.7
10:00	198.0	127.4	30.7	82.6
11:00	193.9	121.6	32.8	77.7
12:00	237.5	136.1	34.6	79.9
13:00	184.9	104.8	35.5	70.7
14:00	220.6	123.9	36.2	77.3
15:00	197.6	118.8	37.3	75.4
16:00	154.8	96.1	36.1	65.1
17:00	213.8	117.8	34.3	74.6
18:00	204.9	119.1	33.1	79.7
19:00	209.6	119.7	30.0	73.1
20:00	191.2	115.9	28.4	72.5
21:00	200.1	137.6	27.7	83.4
22:00	201.2	113.9	27.5	80.9
23:00	173.2	105.7	26.9	68.0
24:00	188.8	112.2	27.4	76.0
1:00	149.4	100.0	27.3	65.8
2:00	192.0	115.0	27.4	77.3
3:00	151.3	103.5	27.3	67.2
Average	192.2	116.4	31.1	74
Maximum	237.5	137.6	37.3	83.4
Minimum	149.4	96.1	26.9	64.7

ตารางที่ 9 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลอง
อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

Time (hour)	Biomass drying							
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient	
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)
9:00	64.7	34.6	52.0	45.0	41.4	51.0	29.4	74.1
10:00	82.6	4.9	70.8	10.3	69.2	10.4	30.7	67.6
11:00	77.7	5.8	67.6	11.2	66.7	11.3	32.8	61.3
12:00	79.9	5.3	68.0	10.7	67.1	10.4	34.6	54.6
13:00	70.7	8.5	67.1	10.9	64.9	12.8	35.5	52.5
14:00	77.3	6.3	67.2	11.1	66.3	11.2	36.2	51.9
15:00	75.4	7.7	66.5	11.4	65.0	12.1	37.3	48.8
16:00	65.1	10.8	62.8	13.0	60.0	15.0	36.1	51.5
17:00	74.6	6.6	66.8	10.6	65.8	11.1	34.3	56.0
18:00	79.7	5.4	70.4	8.9	68.8	9.8	33.1	59.3
19:00	73.1	7.0	64.8	11.2	63.0	12.7	30.0	69.5
20:00	72.5	7.0	65.1	10.9	63.2	13.0	28.4	75.9
21:00	83.4	3.7	71.4	8.1	69.7	8.8	27.7	78.2
22:00	80.9	4.8	73.3	7.3	70.3	9.0	27.5	79.1
23:00	68.0	8.6	62.7	11.8	60.5	14.4	26.9	81.5
24:00	76.0	6.3	67.3	9.8	66.0	11.3	27.4	79.9
1:00	65.8	10.5	59.9	14.0	58.5	16.5	27.3	81.7
2:00	76.1	5.2	67.4	8.8	66.2	10.3	27.6	81.9
3:00	66.2	9.1	60.1	13.2	58.5	15.0	27.4	82.1
Average	74	8.3	65.8	12.5	63.7	14.0	31.1	67.8
Maximum	83.4	34.6	73.3	45.0	70.3	51.0	37.3	82.1
Minimum	64.7	3.7	52.0	7.3	41.4	8.8	26.9	48.8

ตารางที่ 10 ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆ ของการทดลอง
อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Biomass drying						
	tray1	tray2	tray3	tray4	tray5	tray6	Average
8:00	31.45	31.45	31.45	31.45	31.45	31.45	31.45
9:00	29.91	29.38	30.04	30.25	30.26	30.22	30.01
10:00	27.94	27.71	27.68	28.06	28.51	28.10	28.00
11:00	25.58	25.90	25.82	26.34	26.56	26.49	26.11
12:00	24.00	24.35	24.27	24.93	25.22	25.24	24.67
13:00	22.62	22.85	22.72	23.41	23.83	23.88	23.22
14:00	20.93	21.47	21.33	21.99	22.58	22.65	21.82
15:00	19.80	20.31	19.53	20.92	21.58	21.64	20.63
16:00	18.68	19.40	19.23	19.82	20.60	20.78	19.75
17:00	17.49	18.29	18.05	18.80	19.56	19.77	18.66
18:00	15.93	16.49	16.61	17.29	18.07	17.78	17.03
19:00	15.47	16.09	16.12	16.84	17.68	17.35	16.59
20:00	14.62	15.32	15.29	16.01	16.87	17.22	15.89
21:00	13.65	14.39	14.29	15.02	15.94	16.37	14.94
22:00	12.74	13.54	13.29	14.07	14.94	15.45	14.01
23:00	12.27	13.07	12.79	13.50	14.39	14.96	13.50
24:00	11.58	12.49	12.10	12.81	13.72	14.36	12.84
1:00	11.24	11.98	11.68	12.47	13.33	13.96	12.44
2:00	10.90	11.46	11.26	12.12	12.95	13.56	12.04
3:00	10.56	10.95	10.84	11.77	12.56	13.16	11.64

ตารางที่ ค 11 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์)

Time (hour)	Solar drying								Solar radiation (W/m ²)
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient		
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	
9:00	38.0	60.8	32.3	73.4	29.6	63.2	32.8	83.6	310.5
10:00	45.3	42.0	38.2	55.2	34.3	53.4	35.7	69.8	432.4
11:00	48.0	35.2	39.3	51.0	35.6	53.0	35.1	65.1	509.3
12:00	55.7	25.6	43.4	43.2	38.2	48.5	37.2	59.7	570.3
13:00	60.8	20.3	46.3	37.7	41.0	47.8	37.0	53.0	685.6
14:00	64.4	17.0	48.9	33.2	43.6	43.2	38.7	48.5	742.5
15:00	59.1	22.4	45.7	47.6	41.3	51.5	36.0	62.2	532.1
16:00	55.2	26.1	44.3	42.5	42.1	51.3	36.4	55.5	465.0
17:00	42.9	42.8	37.1	54.9	36.1	59.5	33.0	62.2	220.3
Average	52.2	32.5	41.7	48.7	38.0	52.4	35.8	62.2	496.4
Maximum	64.4	60.8	48.9	73.4	43.6	63.2	38.7	83.6	742.5
Minimum	38.0	17.0	32.3	33.2	29.6	43.2	32.8	48.5	220.3

ตารางที่ ค 12 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)

Time (hour)	Biomass drying							
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient	
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)
18:00	85.2	12.8	53.0	26.8	51.1	35.4	28.7	74.5
19:00	92.7	4.8	62.1	19.2	59.7	22.4	27.4	79.7
20:00	98.5	4.0	65.3	16.1	62.6	19.9	27.9	79.4
21:00	102.8	3.6	68.7	15.3	66.7	18.5	27.5	80.7
22:00	100.5	3.7	67.2	15.7	65.1	18.9	28.0	78.1
23:00	97.2	4.1	66.1	17.7	61.5	19.2	27.8	79.4
Average	96.2	5.5	63.7	18.5	61.1	22.4	27.9	78.6
Maximum	102.8	12.8	68.7	26.8	66.7	35.4	28.7	80.7
Minimum	85.2	3.6	53.0	15.3	51.1	18.5	27.4	74.5

ตารางที่ ค 13 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)

Time (hour)	T _{hi} (°C)	T _{ho} (°C)	T _{ci} (°C)	T _{co} (°C)
18:00	231	119	28.7	85.2
19:00	240	133	27.4	92.7
20:00	248	139	27.9	98.5
21:00	256	147	27.5	102.8
22:00	254	140	28.0	100.5
23:00	252	138	27.8	97.2
Average	246.8	136.0	27.9	96.2
Maximum	256.0	147.0	28.7	102.8
Minimum	231.0	119.0	27.4	85.2

ตารางที่ ค 14 ข้อมูลความชื้นของผลหมากในภาชนะตัวอย่าง ของการทดลองอบแห้งผลหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Solar-Biomass drying						
	tray1	tray2	tray3	tray4	tray5	tray6	Average
8:00	66.24	66.24	66.24	66.24	66.24	66.24	66.24
9:00	65.90	65.98	65.85	66.03	66.05	66.00	65.97
10:00	65.25	65.50	65.60	65.66	65.63	65.56	65.53
11:00	64.54	64.97	64.98	64.76	65.24	64.34	64.81
12:00	63.71	64.46	64.67	64.73	64.75	64.61	64.49
13:00	63.13	63.79	64.07	64.14	64.57	64.23	63.99
14:00	61.82	62.90	63.18	63.85	63.81	63.41	63.16
15:00	61.18	62.53	62.94	63.07	63.54	63.03	62.72
16:00	60.27	61.92	62.19	62.45	63.11	62.46	62.07
17:00	59.80	61.53	61.80	62.10	60.41	62.39	61.34
18:00	56.48	58.89	59.54	59.88	61.14	60.31	59.37
19:00	53.31	56.42	57.00	57.52	58.82	58.24	56.89
20:00	51.14	53.85	54.67	55.38	56.67	56.32	54.67
21:00	48.69	51.08	52.09	53.04	54.31	54.10	52.22
22:00	47.04	48.84	50.08	51.14	52.40	52.37	50.31
23:00	45.16	47.01	48.56	48.64	50.92	51.06	48.56

ตารางที่ ค 15 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้ง เมล็ดหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์)

Time (hour)	Solar drying								Solar radiation (W/m ²)
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient		
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	
9:00	38.7	58.9	36.1	62.3	32.8	67.8	31.3	67.0	341.6
10:00	45.7	55.6	42.3	58.1	39.2	61.9	32.2	61.7	448.4
11:00	46.8	42.6	43.0	51.2	40.4	53.6	32.2	62.3	469.7
12:00	50.4	33.5	45.4	44.1	42.6	46.9	32.9	59.2	500.8
13:00	61.9	22.2	52.9	29.6	49.5	33.6	34.9	53.4	675.9
14:00	61.6	20.3	55.4	23.3	53.3	25.9	36.5	49.7	669.2
15:00	55.4	22.0	52.1	24.2	50.2	27.3	35.7	51.3	464.6
16:00	54.9	23.1	52.2	25.3	50.5	26.4	34.4	55.3	447.0
17:00	43.0	31.0	42.7	33.4	41.1	38.4	32.3	61.5	282.3
Average	50.9	34.3	46.9	39.1	44.4	42.4	33.6	57.9	477.7
Maximum	61.9	58.9	55.4	62.3	53.3	67.8	36.5	67.0	675.9
Minimum	38.7	20.3	36.1	23.3	32.8	25.9	31.3	49.7	282.3

ตารางที่ ค 16 ข้อมูลสภาวะอากาศภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล(ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)

Time (hour)	Biomass drying							
	air inlet		air dryer		air outlet		air ambient	
	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)	T(°C)	%RH(%)
18:00	82.4	9.3	68.0	16.0	65.1	23.1	29.9	67.9
19:00	84.5	4.7	73.7	11.6	71.6	11.0	28.8	72.3
20:00	72.8	7.8	66.7	15.7	64.6	15.5	27.1	78.9
21:00	64.0	12.0	60.0	19.0	58.0	21.3	26.2	82.4
22:00	70.8	8.6	63.0	16.0	61.5	18.1	25.8	84.9
23:00	79.2	5.7	68.1	12.1	67.1	13.3	25.2	86.5
24:00	70.5	8.4	65.6	15.6	63.3	15.7	24.7	87.2
1:00	72.5	7.8	65.1	14.2	63.5	15.5	24.4	88.3
2:00	68.4	9.0	63.9	14.7	61.6	16.5	23.7	89.2
3:00	71.9	7.5	65.0	13.4	63.3	14.9	23.4	89.9
4:00	64.0	11.5	60.9	18.8	58.6	19.0	23.1	89.9
5:00	75.6	8.0	62.0	12.3	62.4	16.3	22.8	90.0
6:00	85.6	3.4	74.3	8.7	72.4	8.3	22.4	89.9
7:00	82.0	4.8	72.4	10.0	70.4	10.2	24.3	87.7
8:00	70.6	8.7	68.0	14.4	64.8	15.1	28.3	76.4
9:00	75.9	7.0	67.4	11.6	66.4	13.8	29.7	69.3
Average	74.4	7.7	66.5	14.0	64.7	15.5	25.6	83.2
Maximum	85.6	12.0	74.3	19.0	72.4	23.1	29.9	90.0
Minimum	64.0	12.0	60.0	19.0	58.0	23.1	22.4	90.0

ตารางที่ ค 17 ข้อมูลสภาวะอากาศของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอบแห้งเมล็ดหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (ช่วงการอบแห้งด้วยพลังงานชีวมวล)

Time (hour)	T_{hi} (°C)	T_{ho} (°C)	T_{ci} (°C)	T_{co} (°C)
18:00	146.2	102	29.9	82.4
19:00	159.1	105.0	28.8	84.5
20:00	169.4	111.8	27.1	72.8
21:00	148.5	100.3	26.2	64.0
22:00	168.8	110.3	25.8	70.8
23:00	219.5	123.9	25.2	79.2
24:00	210.0	108.5	24.7	70.5
1:00	222.4	113.3	24.4	72.5
2:00	220.4	110.8	23.7	68.4
3:00	229.8	131.3	23.4	71.9
4:00	176.7	91.1	23.1	64.0
5:00	216.5	125.0	22.8	75.6
6:00	237.5	137.7	22.4	85.6
7:00	217.3	139.2	24.3	82.0
8:00	171.0	104.8	28.3	70.6
9:00	198.4	118.3	29.7	75.9
Average	194.5	114.6	25.6	74.4
Maximum	237.5	139.2	29.9	85.6
Minimum	146.2	91.1	22.4	64.0

ตารางที่ ค 18 ข้อมูลความชื้นของเมล็ดหมากในภาชนะตัวอย่างที่ชั้นต่างๆของการทดลอง
อบแห้งเมล็ดหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

Time (hour)	Moisture content (%wb)						
	Solar and Biomass drying						
	tray1	tray2	tray3	tray4	tray5	tray6	Average
8:00	32.58	32.58	32.58	32.58	32.58	32.58	32.58
9:00	32.18	32.18	32.27	32.30	32.38	32.28	32.27
10:00	31.80	31.82	31.86	31.90	32.06	31.95	31.90
11:00	31.24	31.59	31.34	31.38	31.54	31.56	31.44
12:00	30.76	30.83	30.82	30.86	30.59	31.00	30.81
13:00	29.60	29.86	29.68	29.95	30.29	30.01	29.90
14:00	28.57	28.93	28.83	28.75	29.21	28.95	28.87
15:00	27.81	28.16	28.09	28.26	28.63	28.10	28.18
16:00	27.06	27.48	27.55	27.55	27.95	27.28	27.48
17:00	26.64	27.02	26.91	27.13	27.39	26.91	27.00
18:00	24.82	25.10	25.85	26.17	26.66	26.26	25.81
19:00	23.12	23.52	24.42	24.48	24.85	22.82	23.87
20:00	21.73	22.11	23.44	23.43	23.75	22.61	22.85
21:00	20.10	20.55	21.68	22.83	23.11	21.95	21.70
22:00	19.44	19.94	20.94	22.08	22.35	21.01	20.96
23:00	18.55	19.37	20.00	21.25	21.27	19.79	20.04
24:00	17.94	18.46	19.19	20.10	20.37	18.94	19.17
1:00	17.25	17.86	18.45	19.25	19.49	18.01	18.38
2:00	16.64	17.20	17.75	18.45	18.74	17.17	17.66
3:00	15.94	16.52	16.89	15.10	17.90	16.28	16.44
4:00	15.55	16.10	16.42	14.57	17.06	15.62	15.89
5:00	14.86	15.50	15.69	14.15	16.29	14.81	15.22
6:00	14.03	14.62	14.61	14.00	13.70	13.67	14.11
7:00	13.29	13.86	13.76	13.11	12.73	12.81	13.26
8:00	12.63	13.15	12.93	12.27	11.86	11.98	12.47
9:00	12.04	12.54	12.21	11.45	11.08	11.21	11.76

ภาคผนวก ง
การคำนวณสมรรถนะ

ง 1 การทดลองอบหมากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (วันที่ 10-15 มิ.ย. 2552)

ง 1.1 อบแห้งผลหมาก

จากผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00–17.00 น. ของวันที่ 9-10 มิถุนายน 2552 อุณหภูมิที่ทางเข้าของแผงรับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 35°C อุณหภูมิที่ทางออกของแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53.7°C เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 504.8 W/m^2

(1) ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว สามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าสู่ระบบ โดยประเภทของเครื่องอบแห้งแบบบังคับใช้สมการ ดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{m_w h_{fg}}{G_t A_c + E_c} \times 100$$

โดยที่

η_{solar}	คือ	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้ง (%)
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
G_t	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m^2)
A_c	คือ	พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m^2)
E_c	คือ	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 18 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 44°C ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $h_{fg} = 2397.18 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned} \text{น้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)} &= \text{มวลผลหมากก่อนอบ (kg)} - \text{มวลผลหมากหลังอบ (kg)} \\ &= 40 - 28 = 12 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี} &= 504.8 \text{ w/m}^2 \times 18 \text{ hr} \times 3,600 \text{ s} \\ &= 32,711 \text{ kJ/ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ} = 0.460 \text{ kW-h} = 1,656 \text{ kJ}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{12 \text{ kg} \times 2397.18 \text{ kJ/kg}}{(32,711 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 + 1,656 \text{ kJ})} \times 100 = 0.217$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 21.71 %

(2) ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_t A_c}$$

$$Q_u = m_a C_p (T_o - T_i)$$

โดยที่

A_c คือ พื้นที่แผงรับรังสีเฉพาะส่วนที่สามารถดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ = 4 m²

Q_u คือ พลังงานความร้อนที่ห้องอบได้รับ = 31,284.6 kJ

G_t คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี =

$$504.8 \text{ w/m}^2 \times 18 \text{ hr} \times 3,600 \text{ s} = 32,711 \text{ kJ/m}^2$$

m_a คือ ปริมาณอากาศที่เข้าสู่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (kJ/kg °C)

T_o คือ อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)

T_i คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)

ค่า m_a หาได้จากสูตร $m_a = \rho V A t$

โดยที่

A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มี

$$\text{ค่าเท่ากับ } 0.04 \text{ m} \times 1.18 \text{ m} = 0.047 \text{ m}^2$$

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)

V คือ ความเร็วของอากาศเฉลี่ยที่ทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m/s)

t คือ เวลาอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์คือ 8.00–17.00 น. มีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= 0.6 \text{ m/s} \\
 A &= 0.04 \text{ m} \times 1.18 \text{ m} = 0.047 \text{ m}^2 \\
 T_i &= 35 \text{ }^\circ\text{C} \\
 T_o &= 53.7 \text{ }^\circ\text{C} \\
 C_p &= 1.006 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} \\
 \rho &= 1.092 \text{ kg/m}^3 \\
 t &= 18 \text{ hr} = 64,800 \text{ s}
 \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 m_a &= (1.092 \text{ kg/m}^3) \times (0.6 \text{ m/s}) \times (0.047 \text{ m}^2) \times (64,800 \text{ s}) \\
 &= 1663 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_i , และ T_o ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned}
 Q_u &= 1663 \times 1.006 \times (53.7 - 35) \\
 &= 31,284.6 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ห้องอบได้รับเท่ากับ 31,284.6 kJ

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned}
 \eta_c &= \frac{31,284.6 \text{ kJ}}{(32,711 \text{ kJ/m}^2)(4 \text{ m}^2)} \\
 &= 0.239 \\
 &= 23.9 \%
 \end{aligned}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 23.9 %

จากการทดลองพลังงานที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 32,711 MJ/ m² เม
แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ขนาด 4 m² พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการอบแห้งผลหมาก คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{พลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้} &= \text{รังสีรวมที่ตกบนแผงรับรังสี} \times \text{ประสิทธิภาพ} \\
 &\text{ของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{แทนค่า} &= (32.711 \text{ kJ/ m}^2) \times (4 \text{ m}^2) \times (0.239) \\
 &= 31.27 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งผลหมากสุกเท่ากับ 31.27 MJ

(3) การใช้พลังงานจำเพาะ

การใช้พลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_m = \frac{G_t A_c + E_c}{m_w}$$

โดยที่ E_m คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (MJ/kg H₂O evap.)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ = 12 kg

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{32,711 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 + 1,656 \text{ kJ}}{12 \text{ kg}} \\ &= 11.04 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap.} \end{aligned}$$

ดังนั้นการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 11.04 MJ/kg H₂O evap.

ง 1.2 อบแห้งเมล็ดหมาก

จากผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00—17.00 น. ของวันที่ 11-12 มิถุนายน 2552 พบว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 35.3°C อุณหภูมิที่ทางออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53.7°C เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 527.4 W/m²

(1) ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว สามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้าสู่ระบบ โดยประเภทของเครื่องอบแห้งแบบบังคับใช้สมการ ดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{m_w h_{fg}}{G_t A_c + E_c} \times 100$$

โดยที่

η_{solar} คือ ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์(%)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)

G_t คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m²)

A_c คือ พื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ (m²)

E_c คือ ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 36 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้งตลอดการทดลอง 48.9°C ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $h_{fg} = 2,385.36 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned} \text{น้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)} &= \text{มวลเมล็ดหมากก่อนอบ (kg)} - \text{มวลเมล็ดหมากหลังอบ (kg)} \\ &= 11.5 \text{ kg} - 8.8 \text{ kg} = 2.7 \text{ kg} \end{aligned}$$

ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี

$$\begin{aligned} &= 527.4 \text{ w/m}^2 \times 36 \text{ hr} \times 3,600 \text{ s} \\ &= 68,351 \text{ kJ/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ} = 0.900 \text{ kW-h} = 3,240 \text{ kJ}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\eta_{\text{solar}} = \frac{2.7 \text{ kg} \times 2,385.36 \text{ kJ/kg}}{(68,351 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 + 3,240 \text{ kJ})} \times 100 = 0.02328$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับ 2.32 %

(2) ประสิทธิภาพแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_t A_c}$$

$$Q_u = m_a C_p (T_o - T_i)$$

โดยที่

A_c คือ พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์

Q_u คือ พลังงานความร้อนที่ห้องอบได้รับ = 99,062.14 kJ

G_t คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี
 $= 527.4 \text{ w/m}^2 \times 36 \text{ hr} \times 3,600 \text{ s} = 68,351 \text{ kJ/m}^2$

m_a คือ ปริมาณอากาศที่เข้าสู่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)

T_o คือ อุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

T_i คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

ค่า m_a หาได้จากสูตร $m_a = \rho V A t$
โดยที่

- A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 V คือ ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าแผงรับรังสีดวงแสงอาทิตย์ (m/s)
 t คือ เวลาอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์คือ 8.00–17.00 น. มีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} V &= 0.6 \text{ m/s} \\ A &= 0.04 \text{ m} \times 1.18 \text{ m} = 0.047 \text{ m}^2 \\ T_i &= 35.3^\circ\text{C} \\ T_o &= 53.7^\circ\text{C} \\ C_p &= 1.006 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \\ \rho &= 1.080 \text{ kg/m}^3 \\ t &= 36 \text{ hr} = 129,600 \text{ s} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} m_a &= (1.080 \text{ kg/m}^3) \times (0.6 \text{ m/s}) \times (0.047 \text{ m}^2) \times (129,600 \text{ s}) \\ &= 3,947 \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_i , และ T_o ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned} Q_u &= (3,947 \text{ kg}) \times (1.006 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) \times (53.7 - 35.3)^\circ\text{C} \\ &= 73,060 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ตู้อบได้รับเท่ากับ 73,060 kJ

แทนค่าลงในสมการ

$$\eta_c = \frac{73,060 \text{ kJ}}{(68,351 \text{ kJ/m}^2) \times (4 \text{ m}^2)} = 0.267$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 26.7 %

จากการทดลองพลังงานที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ 68.351 MJ/ m² เมแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ขนาด 4 m² พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดหมาก คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้} &= \text{รังสีรวมที่ตกบนแผงรับรังสี} \times \text{ประสิทธิภาพ} \\ &\text{ของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์} \\ \text{แทนค่า} &= (68,351 \text{ kJ/ m}^2) \times (4 \text{ m}^2) \times (0.267) \\ &= 73 \text{ MJ} \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเมล็ดหมากเท่ากับ 73 MJ

(3) การใช้พลังงานจำเพาะ

การใช้พลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_m = \frac{G_t A_c + E_c}{m_w}$$

โดยที่

E_m คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (MJ/kg H₂O evap.)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ = 2.7 kg

แทนค่า

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{68,351 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 + 3,240 \text{ kJ}}{2.7 \text{ kg}} \\ &= 102 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap.} \end{aligned}$$

ดังนั้นการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 102 MJ/kg H₂O evap.

ง 2 การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวล

ง 2.1 อบแห้งผลหมาก

จากผลการทดลองและเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ พบว่าเวลาใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์เท่ากับ 10 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง 64°C อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเฉลี่ย 2.65 kg/h อุณหภูมิของก๊าซร้อนไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ย 248°C และ 134°C ตามลำดับ อุณหภูมิของอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเฉลี่ย 25.5°C และ 95.2°C ตามลำดับ

(1) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta T(\text{Minimum fluid})}{\text{Maximum temperature difference in heat exchanger}} \times 100 \\ &= \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}}\end{aligned}$$

โดยที่

ε คือ ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (%)

$T_{hi} - T_{ho}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของก๊าซร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{hi} - T_{ci}$ คือ ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

ช่วงเวลาทดลองเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล 20.00-05.00 น. มีค่าต่างๆ ดังนี้ $T_{hi} = 248^{\circ}\text{C}$, $T_{ho} = 134^{\circ}\text{C}$, $T_{ci} = 25.5^{\circ}\text{C}$ แทนค่าต่างๆลงในสมการ

$$\varepsilon = \frac{248 - 134}{248 - 25.5} = 0.5123$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 51.23 %

(2) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{m_a C_p (T_{co} - T_{ci}) \times 100}{m_f q_f}$$

โดยที่

m_a	คือ	มวลของอากาศ (kg)
C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (kJ/kg°C)
T_{co}	คือ	อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
T_{ci}	คือ	อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
m_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
q_f	คือ	ความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)

ค่า m_a หาได้จากสูตร $m_a = \rho V A t$

โดยที่

A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m ²)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³)
V	คือ	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (m/s)
t	คือ	เวลาอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยชีวมวลคือ 20.00-05.00 น. รวม 10 ชั่วโมง มีค่าต่างๆดังนี้

V	=	3.7	m/s
A	=	$\pi d^2/4$	= $\pi(0.14)^2/4$ = 0.01538 m ²
T_{ci}	=	25.5	°C
T_{co}	=	95.2	°C
C_p	=	1.0098	kJ/kg°C
ρ	=	0.9586	kg/m ³
t	=	10 hr	= 36,000 s

แทนค่าลงในสมการ

$$m_a = (0.9586 \text{ kg/m}^3) \times (3.7 \text{ m/s}) \times (0.01538 \text{ m}^2) \times (36,000 \text{ s})$$

$$= 1,964 \text{ kg}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_{ci} , m_f , T_{co} และ HHV ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$\eta = \frac{1,964 \text{ kg} \times 1.0098 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (95.2 - 25.5)^\circ\text{C} \times 100}{26.5 \text{ kg} \times 14,140 \text{ kJ/kg}} = 36.89$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 36.89 %

(3) ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล สามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานจากชีวมวลที่เข้าสู่ระบบ โดยเครื่องอบแห้งแบบบังคับ ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{\text{biomass}} = \frac{m_w h_{fg}}{q_f m_f + E_c} \times 100$$

โดยที่

η_{biomass}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล (%)
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
m_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
q_f	คือ	ความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)
E_c	คือ	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

ใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 10 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้งตลอดการทดลอง 64°C ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $h_{fg} = 2348.66 \text{ kJ/kg}$
 น้ำที่ระเหยออกจากตัวผลิตภัณฑ์ (kg) = มวลผลหมากรกก่อนอบ (kg) – มวลผลหมากรกหลังอบ (kg)
 $= 40 - 25.5 = 14.5 \text{ kg}$

ปริมาณเชื้อเพลิงไม้ฟืนที่ใช้ 26.5 kg เชื้อเพลิงมีความชื้นเทียบฐานแห้ง 25.0 % ให้ค่าความร้อน $q_f = 14,140 \text{ MJ/kg}$

$$\text{ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ} = 0.840 \text{ kW-h} = 3,024 \text{ kJ}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\eta_{\text{biomass}} = \frac{14.5 \text{ kg} \times 2348.66 \text{ kJ/kg}}{(14,140 \text{ kJ/kg} \times 26.5 \text{ kg}) + (3,024 \text{ kJ})} \times 100 = 9.0 \%$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวลเท่ากับ 9.0 %

(4) การใช้พลังงานจำเพาะ

การใช้พลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_m = \frac{q_f m_f + E_e}{m_w}$$

โดยที่

E_m คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (MJ/kg H₂O evap.)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ = 14.5 kg

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{14,140 \text{ kJ/kg} \times 26 \text{ kg} + 3,024 \text{ kJ}}{14.5 \text{ kg}} = 26.05 \\ &= 26.05 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap.} \end{aligned}$$

การใช้พลังงานจำเพาะ เท่ากับ 26 MJ/kg H₂O evap.

ง 2.2 อบแห้งเมล็ดหมาก

จากผลการทดลอง ใช้เวลาอบแห้ง 19 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง 65.8°C อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.1 kg/h อุณหภูมิของก๊าซร้อนไหลเข้า-ออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 192.2°C และ 116.4°C ตามลำดับ อุณหภูมิของอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน 31.1°C และ 74°C ตามลำดับ

(1) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta T(\text{Minimum fluid})}{\text{Maximum temperature difference in heat exchanger}} \times 100 \\ &= \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \end{aligned}$$

โดยที่

ε คือ ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(%)

$T_{hi}-T_{ho}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของก๊าซร้อน(°C)

$T_{hi}-T_{ci}$ คือ ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(°C)

ช่วงเวลาที่ทดลองเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล 9.00-03.00 น.
มีค่าต่างๆดังนี้ $T_{hi} = 192.2^{\circ}\text{C}$, $T_{ho} = 116.4^{\circ}\text{C}$, $T_{ci} = 31.1^{\circ}\text{C}$ แทนค่าต่างๆลงในสมการ

$$\varepsilon = \frac{192.2 - 116.4}{192.2 - 31.1} = 0.4705$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 47.05 %

(2) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{m_a C_p (T_{co} - T_{ci}) \times 100}{m_f \text{HHV}}$$

โดยที่

m_a	คือ	มวลอากาศ (kg)
C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)
T_{co}	คือ	อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ci}	คือ	อุณหภูมิอากาศเย็นที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
m_f	คือ	ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
q_f	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

ค่า m_a หาได้จากสูตร

$$m_a = \rho V A t$$

โดยที่

A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
V	คือ	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m/s)
t	คือ	เวลาแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยชีวมวลคือ 09.00-03.00 น. รวม 19 ชั่วโมง มีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} V &= 3.7 \text{ m/s} \\ A &= \pi d^2/4 = \pi(0.14)^2/4 = 0.01538 \text{ m}^2 \\ T_{ci} &= 31.1 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{co} &= 74 \text{ }^\circ\text{C} \\ C_p &= 1.0078 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} \\ \rho &= 1.036 \text{ kg/m}^3 \\ t &= 19 \text{ hr} = 68,400 \text{ s} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} m_a &= (1.036 \text{ kg/m}^3) \times (3.7 \text{ m/s}) \times (0.01538 \text{ m}^2) \times (68,400 \text{ s}) \\ &= 4,032 \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_{ci} , m_f , T_{co} และ q_f ลงในสมการข้างต้น

$$\eta = \frac{4,032 \text{ kg} \times 1.0078 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} (74 - 31.1)^\circ\text{C} \times 100}{40 \text{ kg} \times 14,140 \text{ kJ/kg}} = 30.82$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 30.82 %

(3) ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล

การคำนวณหาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล สามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ กับพลังงานจากชีวมวลที่เข้าสู่ระบบ โดยเครื่องอบแห้งแบบบังคับ ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{biomass}} = \frac{m_w h_{fg}}{q_f m_f + E_c} \times 100$$

โดยที่

η_{biomass}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล (%)
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
m_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
q_f	คือ	พลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)
E_c	คือ	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

ใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 19 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้งตลอดการทดลอง 65.8°C ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $h_{fg} = 2346.2 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned} \text{น้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)} &= \text{มวลเม็สดมวกก่อนอบ (kg)} - \text{มวลเม็สดมวกหลังอบ (kg)} \\ &= 11 \text{ kg} - 8.5 \text{ kg} = 2.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

ปริมาณเชื้อเพลิงไม้ฟืนที่ใช้ 40 kg เชื้อเพลิงมีความชื้นเทียบฐานแห้ง 25.0 % ให้ค่าความร้อน $q_f = 14,140 \text{ kJ/kg}$

$$\text{ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ} = 1.500 \text{ kW-h} = 5,400 \text{ kJ}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\eta_{\text{biomass}} = \frac{2.5 \text{ kg} \times 2346.2 \text{ kJ/kg}}{(14,140 \text{ kJ/kg} \times 40 \text{ kg}) + (5,400 \text{ kJ})} \times 100 = 1.02 \%$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งเท่ากับ 1.02 %

(4) การใช้พลังงานจำเพาะ

การใช้พลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_m = \frac{q_f m_f + E_e}{m_w}$$

โดยที่

E_m คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (MJ/kg H_2O evap.)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ = 2.5 kg

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{14,140 \text{ kJ/kg} \times 40 \text{ kg} + 5,400 \text{ kJ}}{2.5 \text{ kg}} \\ &= 228 \text{ MJ/kg water evap.} \end{aligned}$$

ดังนั้นการใช้พลังงานจำเพาะ เท่ากับ 228 MJ/kg H_2O evap.

ง 3 การทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

ง 3.1 อบแห้งผลหมาก

ง 3.1.1 อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

จากผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00–17.00 น. ของวันที่ 2 มีนาคม 2553 รวมเวลา 9 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 35.8°C อุณหภูมิของอากาศทางออกของแผงรับดวงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 52.2°C เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 496.4 W/m^2

(1) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_t A_c}$$

$$Q_u = m_a C_p (T_o - T_i)$$

$$m_a = \rho V A t$$

โดยที่

A_c	คือ	พื้นที่แผงรับรังสีดวงแสงอาทิตย์ = 4 m^2
Q_u	คือ	พลังงานความร้อนที่ห้องอบแห้งได้รับ
G_t	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี เท่ากับ $496.4 \text{ w/m}^2 \times 9 \text{ hr} \times 3,600 \text{ s} = 16,083 \text{ kJ/ m}^2$
m_a	คือ	ปริมาณอากาศที่เข้าสู่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (kg)
C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$)
T_i	คือ	อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
T_o	คือ	อุณหภูมิของอากาศไหลออกแผงรับรังสี ดวงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์
ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
V	คือ	ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m/s)
t	คือ	เวลาอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์คือ 8.00–17.00 น. มีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} V &= 0.6 \text{ m/s} \\ A &= 0.04 \text{ m} \times 1.18 \text{ m} = 0.047 \text{ m}^2 \\ T_{ci} &= 35.8 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{co} &= 52.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ C_p &= 1.006 \text{ kJ/kg }^{\circ}\text{C} \\ \rho &= 1.092 \text{ kg/m}^3 \\ t &= 9 \text{ hr} = 32,400 \text{ s} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} m_a &= (1.092 \text{ kg/m}^3) \times (0.6 \text{ m/s}) \times (0.047 \text{ m}^2) \times (32,400 \text{ s}) \\ &= 998 \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_i และ T_o ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned} Q_u &= 998 \times 1.006 \times (52.2 - 35.8) \\ &= 16,461 \text{ kJ} \end{aligned}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ห้องอบแห้งได้รับเท่ากับ 16,461 kJ

แทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{16,461 \text{ kJ}}{(16,083 \text{ kJ/m}^2)(4 \text{ m}^2)} = 0.255 \\ &= 25.5 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 25.5 %

ง 3.1.2 อบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล

จากการทดลองพบว่าใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 6 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องอบแห้ง 63.7°C อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.66 kg/h อุณหภูมิของก๊าซร้อนไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ย 246.8°C และ 136.0°C ตามลำดับ อุณหภูมิของอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ย 27.9°C และ 96.2°C ตามลำดับ

(1) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{\Delta T(\text{Minimum fluid})}{\text{Maximum temperature difference in heat exchanger}} \times 100$$

$$= \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}}$$

โดยที่ ε คือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (%)

$T_{hi} - T_{ho}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของก๊าซร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{hi} - T_{ci}$ คือ ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

ช่วงเวลาทดลองเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานชีวมวล 20.00-05.00 น. มีค่าต่างๆ ดังนี้ $T_{hi} = 246.8^{\circ}\text{C}$, $T_{ho} = 136^{\circ}\text{C}$, $T_{ci} = 27.9$ แทนลงในสมการ จะได้

$$\varepsilon = \frac{246.8 - 136}{246.8 - 27.9} = 0.506$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 50.6 %

(2) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{m_a C_p (T_{co} - T_{ci}) \times 100}{m_f q_f}$$

โดยที่

m_a คือ มวลของอากาศ (kg)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$)

T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

m_f คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)

q_f คือ ความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)

ค่า m_a หาได้จากสูตร

$$m_a = \rho V A t$$

โดยที่

A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าเครื่องอุปกรณ์เปลี่ยนความร้อน (m^2)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

V คือ ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m/s)

t คือ เวลาอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยชีวมวลคือ 20.00-05.00 น. รวม 10 ชั่วโมง มีค่าต่างๆดังนี้

$$V = 3.7 \text{ m/s}$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.14)^2}{4} = 0.01538 \text{ m}^2$$

$$T_{ci} = 27.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{co} = 96.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_p = 1.009 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C}$$

$$\rho = 0.9562 \text{ kg/m}^3$$

$$t = 6 \text{ hr} = 21,600 \text{ s}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} m_a &= (0.9562 \text{ kg/m}^3) \times (3.7 \text{ m/s}) \times (0.01538 \text{ m}^2) \times (21,600 \text{ s}) \\ &= 1,175.33 \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_{ci} , m_f , T_{co} และ q_f ลงในสมการ จะได้

$$\eta = \frac{1,175.33 \text{ kg} \times 1.009 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} (96.2 - 27.9) \text{ }^\circ\text{C} \times 100}{16 \text{ kg} \times 14,140 \text{ kJ/kg}} = 0.3580$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 35.80 %

(3) ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{\text{all}} = \frac{m_w h_{fg}}{G_t A_c + q_f m_f + E_c} \times 100$$

โดยที่

η_{all}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (%)
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
m_f	คือ	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
q_f	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงไม้ฟืน (kJ/kg)
E_c	คือ	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)
G_t	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m ²)
A	คือ	พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m ²)

ใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 15 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้งตลอดการทดลอง 50.5°C ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $h_{fg} = 2382.7$ kJ/kg

น้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg) = เมล็ดหมากก่อนอบ (kg) – เมล็ดหมากหลังอบ (kg)

$$= 40 \text{ kg} - 24.6 \text{ kg} = 15.4 \text{ kg}$$

ปริมาณเชื้อเพลิงไม้ฟืนที่ใช้ 16 kg เชื้อเพลิงมีความชื้นเทียบฐานแห้ง 25.0% ให้ค่า

ความร้อน $q_f = 14,140$ kJ/kg

ช่วงเวลาที่อบแห้ง 8.00–17.00 น. (จำนวน 9 ชั่วโมง) พื้นที่รับแสงอาทิตย์ = 4 m²

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี = 496.4 w/m² x 9 hr x 3,600 s

$$= 16,083.36 \text{ kJ/m}^2$$

ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ = 0.730 kW-h = 2,628 kJ

แทนค่าลงในสมการ

$$\eta_{\text{biomass}} = \frac{15.4 \text{ kg} \times 2382.7 \text{ kJ/kg}}{(16,083.36 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2) + (14,140 \text{ kJ/kg} \times 16 \text{ kg}) + (2,628 \text{ kJ})} \times 100$$

$$= 12.51 \%$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เท่ากับ 12.5 %

(4) การใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption: SEC)

การใช้พลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_m = \frac{G_{t,c} A_c + q_{f,f} m_w + E_c}{m_w}$$

โดยที่

E_m คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (MJ/kg H₂O evap.)

m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ = 15.4 kg

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{(16,083.36 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2) + (14,140 \text{ kJ/kg} \times 16 \text{ kg}) + (2,628 \text{ kJ})}{15.4 \text{ kg}} \\ &= 19 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap.} \end{aligned}$$

ดังนั้นการใช้พลังงานจำเพาะ เท่ากับ 19 MJ/kg H₂O evap.

ง 3.2 ออบแห้งเมล็ดหมาก**ง 3.2.1 ออบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์**

จากผลการทดลอง และเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00—17.00 น. ของวันที่ 3 มีนาคม 2553 รวมเวลา 9 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิที่ทางเข้าแผงรับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 33.6 °C อุณหภูมิของอากาศตรงทางออกแผงรับรังสีดวงแสงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 50.9 °C เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 477.7 W/m²

(1) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_t A_c}$$

$$Q_u = m_a C_p (T_o - T_i)$$

โดยที่

G_t คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี
เท่ากับ 477.7 w/m² x 9 hr x 3,600 s = 15,477.5 kJ/ m²

A_c คือ พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ = 4 m²

Q_u คือ พลังงานความร้อนที่ห้องอบแห้งได้รับ

- m_a คือ ปริมาณอากาศที่เข้าสู่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (kg)
 C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (kJ/kg °C)
 T_i คือ อุณหภูมิของอากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)
 T_o คือ อุณหภูมิของอากาศไหลออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (°C)

ค่า m_a หาได้จากสูตร $m_a = \rho V A t$

โดยที่

- A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางอากาศไหลเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)
 V คือ ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m/s)
 t คือ เวลาทำการอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์คือ 8.00–17.00 น. มีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= 0.6 \text{ m/s} \\
 A &= 0.04 \text{ m} \times 1.18 \text{ m} = 0.047 \text{ m}^2 \\
 T_{ci} &= 33.6 \text{ }^\circ\text{C} \\
 T_{co} &= 50.9 \text{ }^\circ\text{C} \\
 C_p &= 1.006 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} \\
 \rho &= 1.092 \text{ kg/m}^3 \\
 t &= 9 \text{ hr} = 32,400 \text{ s}
 \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 m_a &= (1.092 \text{ kg/m}^3) \times (0.6 \text{ m/s}) \times (0.047 \text{ m}^2) \times (32,400 \text{ s}) \\
 &= 998 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_i , และ T_o ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$Q_u = 998 \times 1.006 \times (50.9 - 33.6) = 17,369 \text{ kJ}$$

ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ห้องอบแห้งได้รับเท่ากับ 17,369 kJ

แทนค่าลงในสมการเพื่อหาประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
 \eta_c &= \frac{17,369 \text{ kJ}}{(15,477.5 \text{ kJ/m}^2)(4 \text{ m}^2)} = 0.280 \\
 &= 28 \%
 \end{aligned}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 28 %

ง 3.2.2 ออบแห้งด้วยพลังงานจากชีวมวล

จากการทดลองใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 16 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง 66.5°C อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.18 kg/h อุณหภูมิของก๊าซร้อนไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ย 194.5°C และ 114.6°C ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศเย็นไหล เข้า-ออก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ย 25.6°C และ 74.4°C ตามลำดับ

(1) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

การคำนวณประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\Delta T(\text{Minimum fluid})}{\text{Maximum temperature difference in heat exchanger}} \times 100 \\ &= \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}}\end{aligned}$$

โดยที่ ε คือ ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (%)

$T_{hi} - T_{ho}$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของก๊าซร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{hi} - T_{ci}$ คือ ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

ช่วงเวลาทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากชีวมวล 18.00-09.00 น.

มีค่าต่างๆดังนี้ $T_{hi} = 194.5^{\circ}\text{C}$, $T_{ho} = 114.6^{\circ}\text{C}$, $T_{ci} = 25.6$ แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\varepsilon = \frac{194.5 - 114.6}{194.5 - 25.6} = 0.473$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 47.3 %

(2) ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\eta = \frac{m_a C_p (T_{co} - T_{ci}) \times 100}{m_f q_f}$$

โดยที่

- m_a คือ มวลของอากาศ (kg)
 C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (kJ/kg °C)
 T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
 T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)
 m_f คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
 q_f คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

ค่า m_a หาได้จากสูตร

$$m_a = \rho V A t$$

โดยที่

- A คือ พื้นที่หน้าตัดช่องทางอากาศไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (m²)
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)
 V คือ ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m/s)
 t คือ เวลาอบแห้ง (s)

ช่วงเวลาที่ใช้ออบแห้งด้วยชีวมวลคือ 18.00-9.00 น. รวม 16 ชั่วโมง มีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} V &= 3.7 \text{ m/s} \\ A &= \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (0.14)^2}{4} = 0.01538 \text{ m}^2 \\ T_{ci} &= 25.6 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_{co} &= 74.4 \text{ }^\circ\text{C} \\ C_p &= 1.007 \text{ kJ/kg }^\circ\text{C} \\ \rho &= 1.015 \text{ kg/m}^3 \\ t &= 16 \text{ hr} = 57,600 \text{ s} \end{aligned}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} m_a &= (1.015 \text{ kg/m}^3) \times (3.7 \text{ m/s}) \times (0.01538 \text{ m}^2) \times (57,600 \text{ s}) \\ &= 3,327 \text{ kg} \end{aligned}$$

แทนค่า m_a , C_p , T_{ci} , m_f , T_{co} และ q_f ลงในสมการข้างต้น จะได้

$$\eta = \frac{3,327 \text{ kg} \times 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} (74.4 - 25.6)^\circ\text{C} \times 100}{35 \text{ kg} \times 14,140 \text{ kJ/kg}} = 35.0$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาเท่ากับ 35 %

(3) ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล

ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{\text{all}} = \frac{m_w h_{fg}}{G_t A_c + q_f m_f + E_c} \times 100$$

โดยที่

η_{all}	คือ	ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งโดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล (%)
m_w	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
E_c	คือ	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)
G_t	คือ	ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m ²)
A_c	คือ	พื้นที่แผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (m ²)

ใช้เวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ 25 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบแห้งตลอดการทดลอง 59.4°C ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $h_{fg} = 2358.5 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)} &= \text{มวลเมล็ดหมากก่อนอบ (kg)} - \text{มวลเมล็ดหมากหลังอบ (kg)} \\ &= 11.3 \text{ kg} - 8.6 \text{ kg} = 2.7 \text{ kg} \end{aligned}$$

ปริมาณเชื้อเพลิงไม้ฟืนที่ใช้ 35 kg เชื้อเพลิงมีความชื้นเทียบฐานแห้ง 25.0 % ให้ค่าความร้อนเท่ากับ 14,140 kJ/kg

$$\begin{aligned} \text{ช่วงเวลาอบแห้ง 8.00–17.00 น. (9 ชั่วโมง) พื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์} &= 4 \text{ m}^2 \\ \text{วัดปริมาณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี} &= 477.7 \text{ w/m}^2 \times 9 \text{ hr} \times 3,600 \text{ s} \\ &= 15,477.5 \text{ kJ/m}^2 \\ \text{ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ} &= 1.490 \text{ kW-h} = 5,364 \text{ kJ} \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned} \eta_{\text{all}} &= \frac{2.7 \text{ kg} \times 2358.5 \text{ kJ/kg}}{(15,477.5 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2) + (14,140 \text{ kJ/kg} \times 35 \text{ kg}) + (5,364 \text{ kJ})} \times 100 \\ &= 1.13 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล เท่ากับ 1.13 %

(4) การใช้พลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption: SEC)

การใช้พลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_m = \frac{G_t A_c + q_f m_f + E_e}{m_w}$$

โดยที่

E_m คือ การใช้พลังงานจำเพาะ (MJ/kg H₂O evap.)

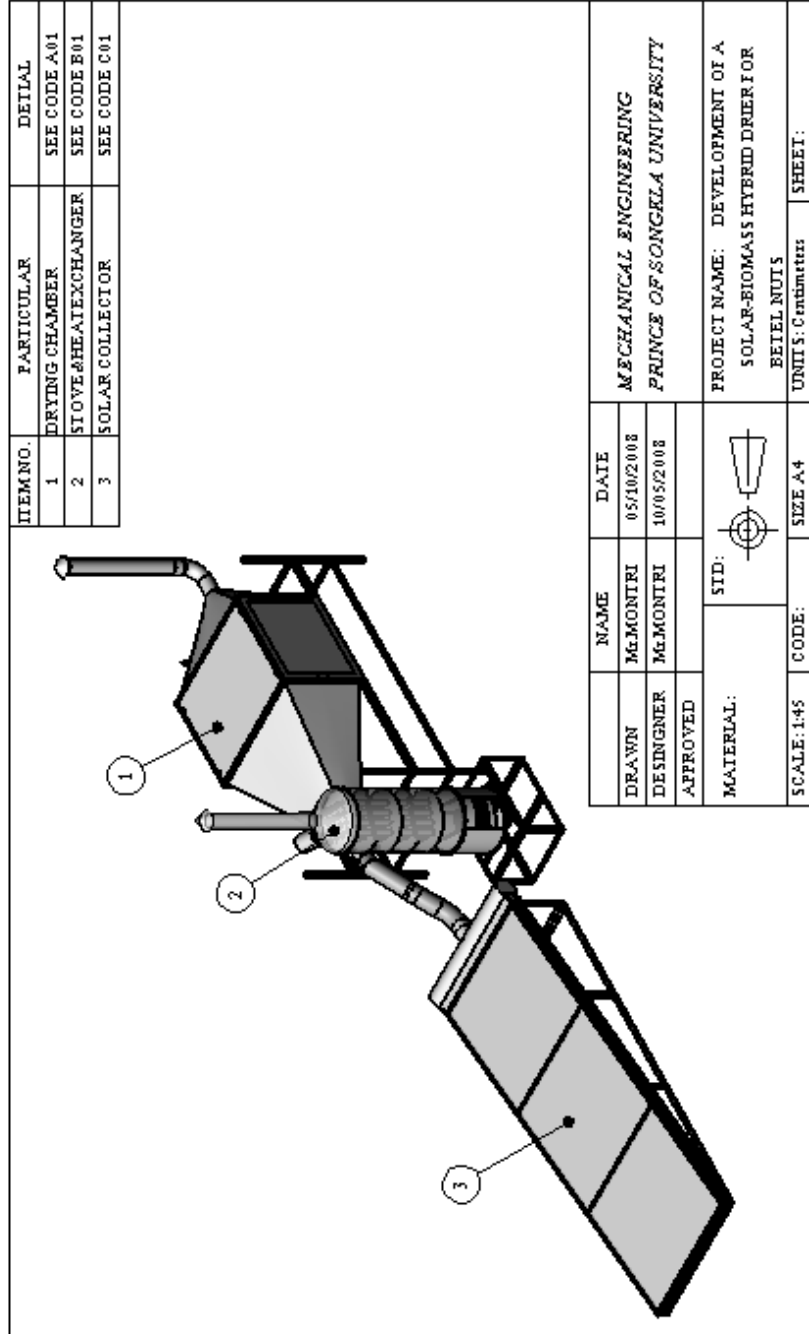
m_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ = 2.7 kg

แทนค่าลงในสมการ

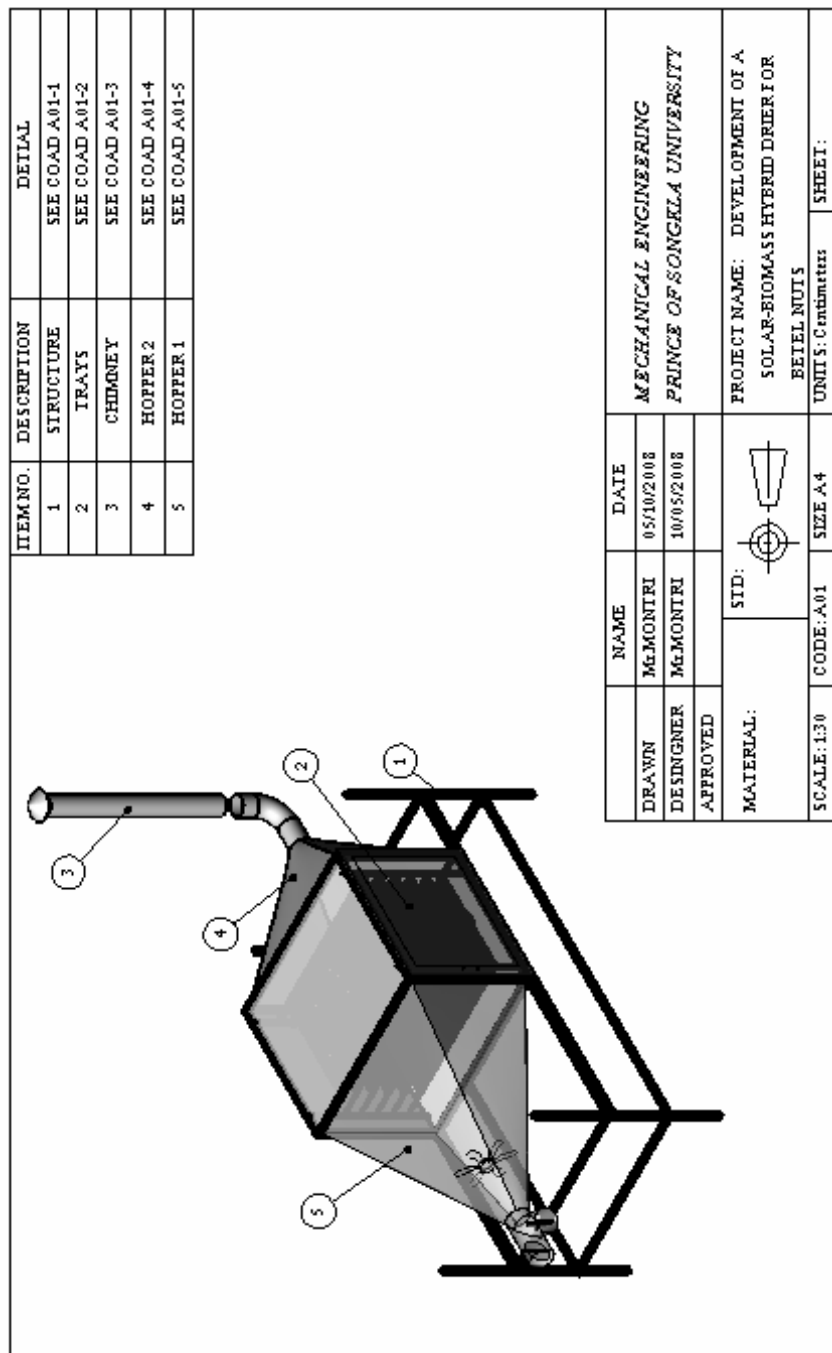
$$\begin{aligned} E_m &= \frac{(15,477.5 \text{ kJ/m}^2 \times 4 \text{ m}^2) + (14,140 \text{ kJ/kg} \times 35 \text{ kg}) + (5,364 \text{ kJ})}{2.7 \text{ kg}} \\ &= 208.21 \text{ MJ/kg H}_2\text{O evap.} \end{aligned}$$

ดังนั้นการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 208.21 MJ/kg H₂O evap.

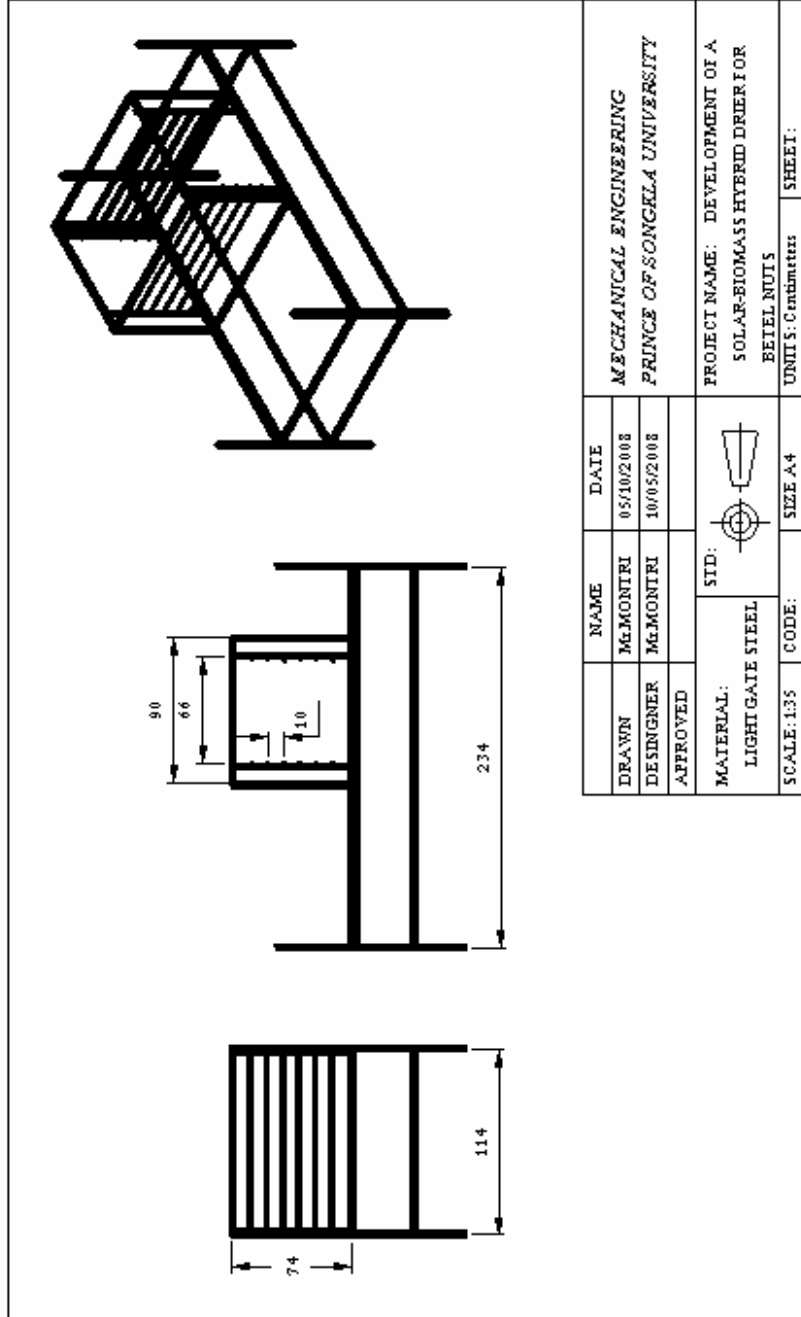
ภาคผนวก จ
แบบเครื่องอบแห้ง



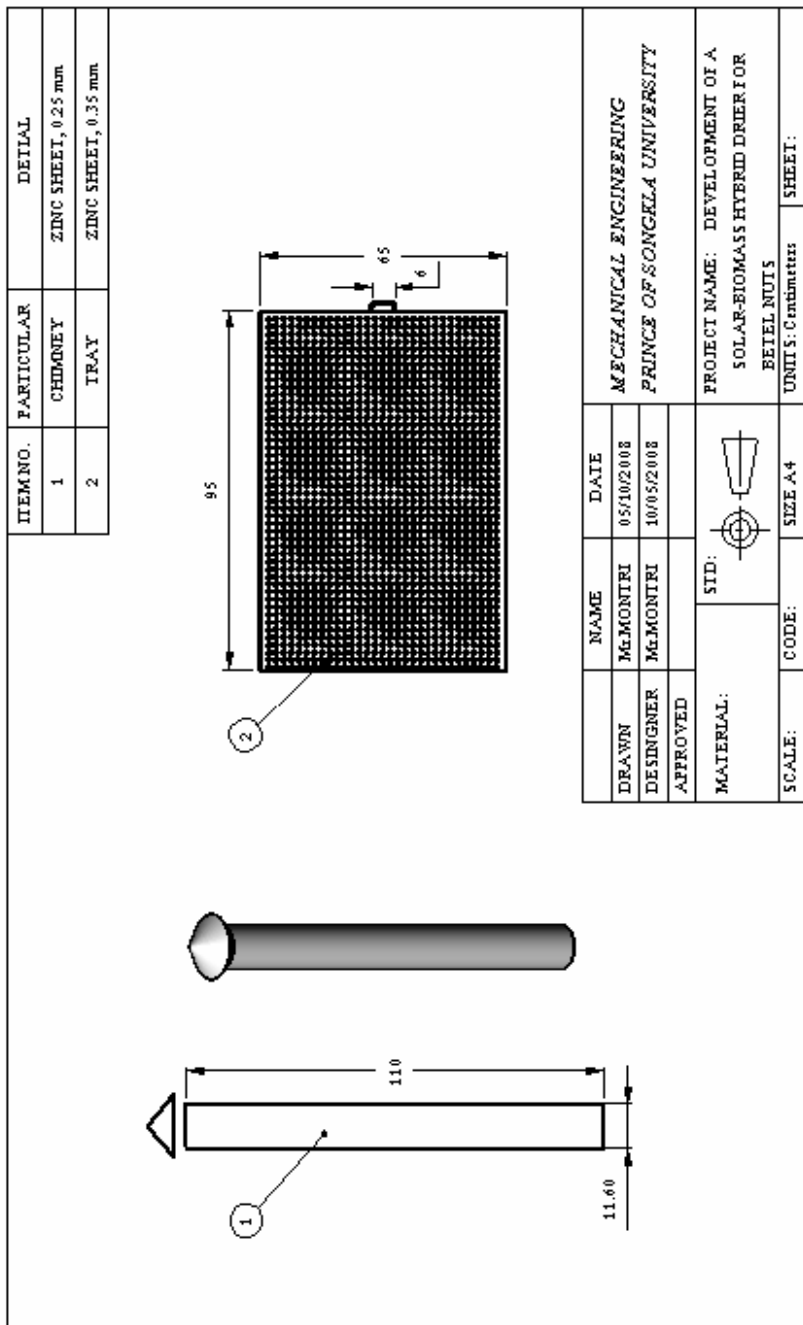
รูปที่ จ 1 ชุดอุปกรณ์ของเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล



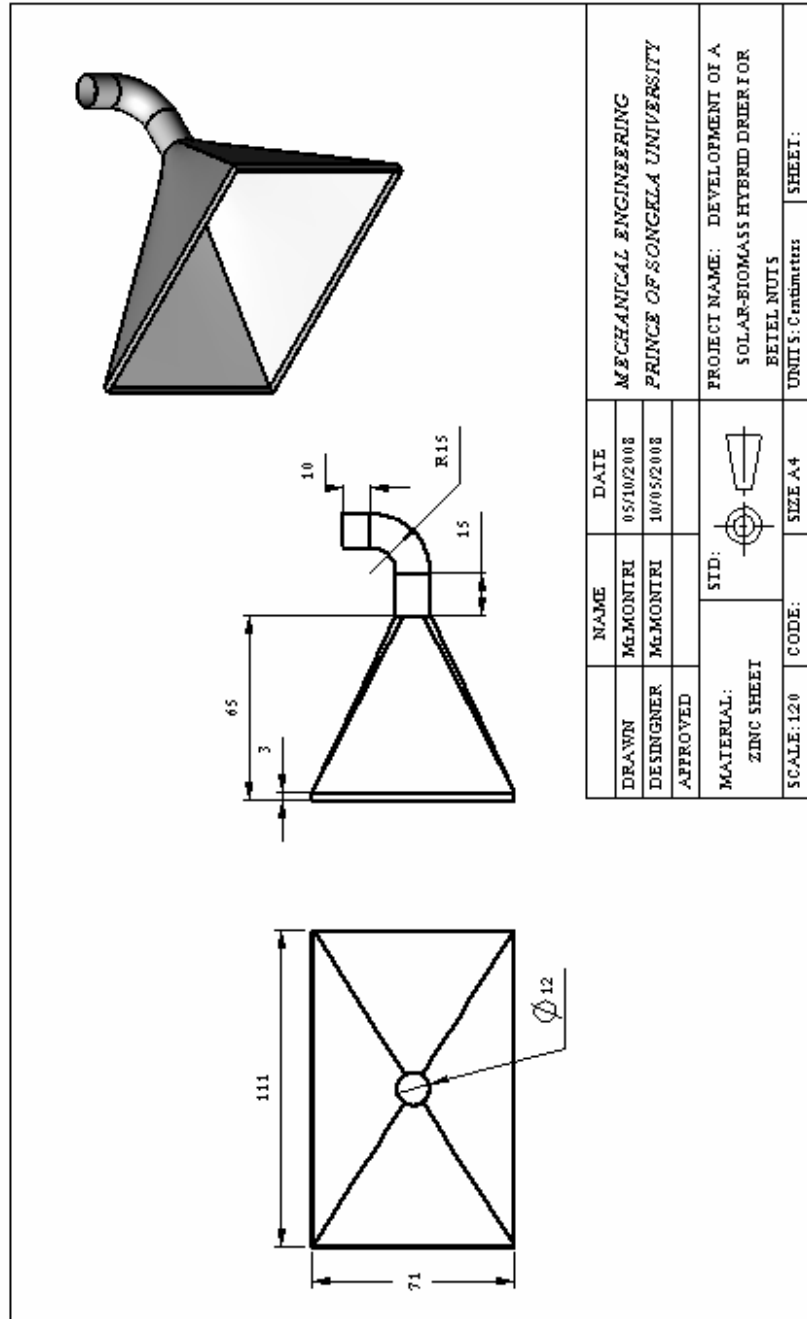
รูปที่ จ 2 ชุดอุปกรณ์ของห้องอบแห้ง



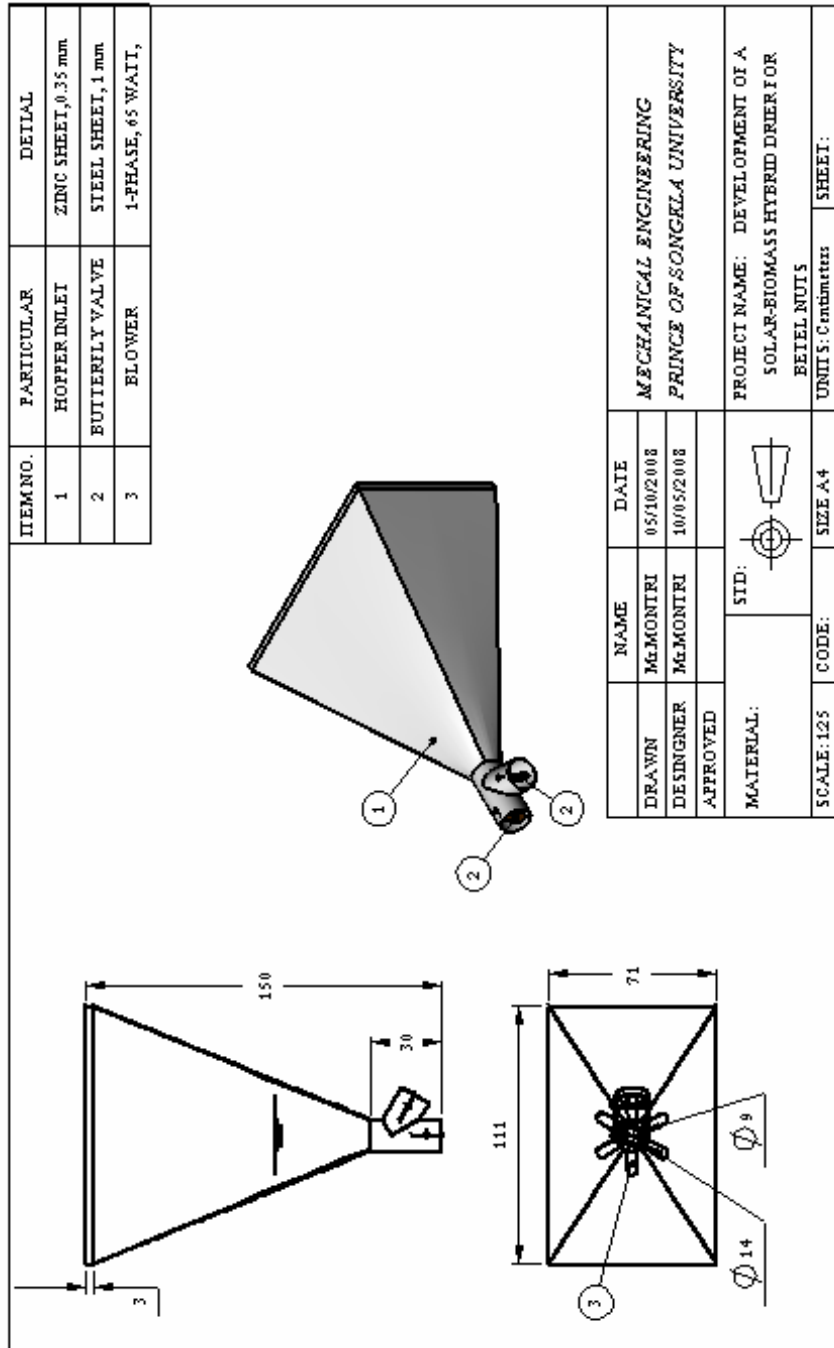
รูปที่ จ 3 รายละเอียดของ โครงสร้างเครื่องอบแห้ง



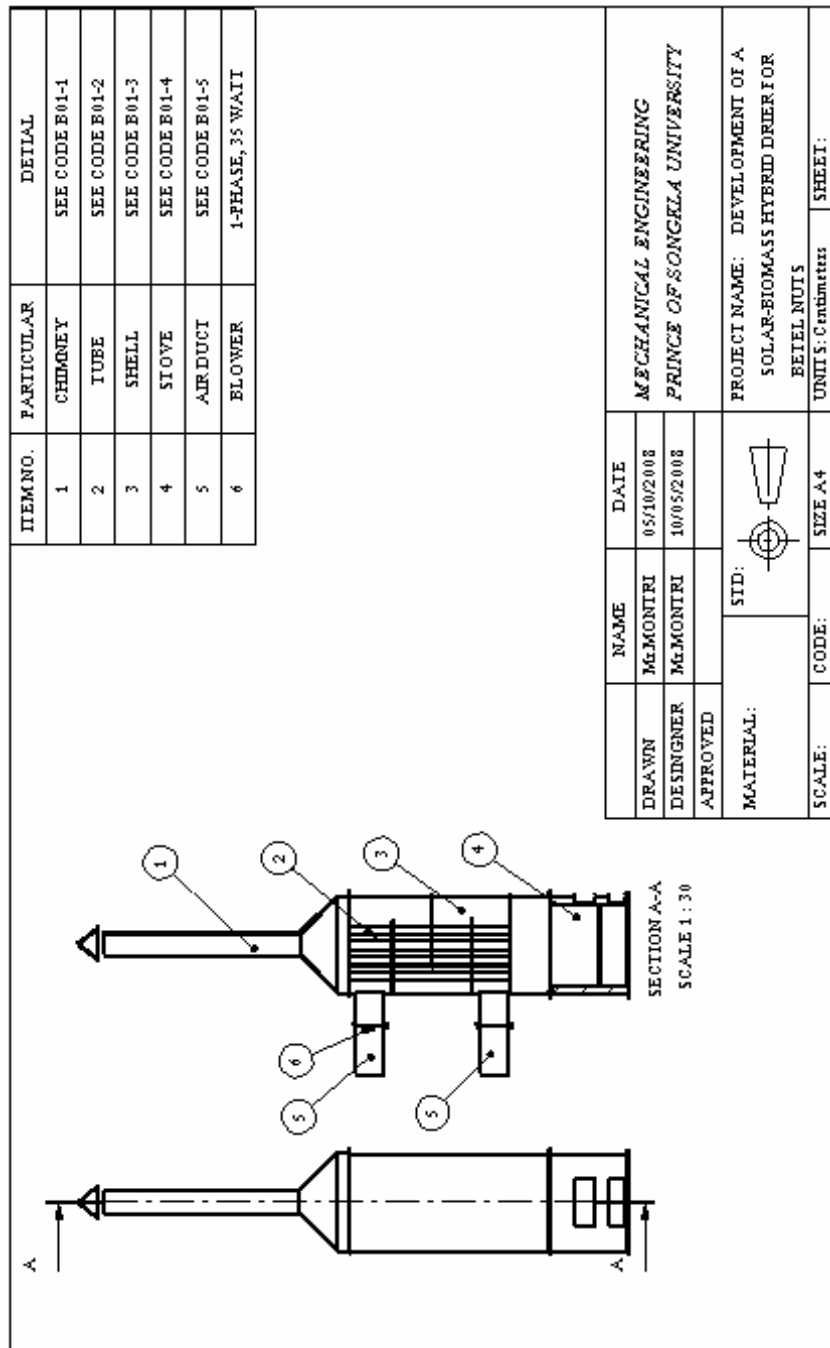
รูปที่ ๑ 4 รายละเอียดของ CHIMNEY และ TRAY



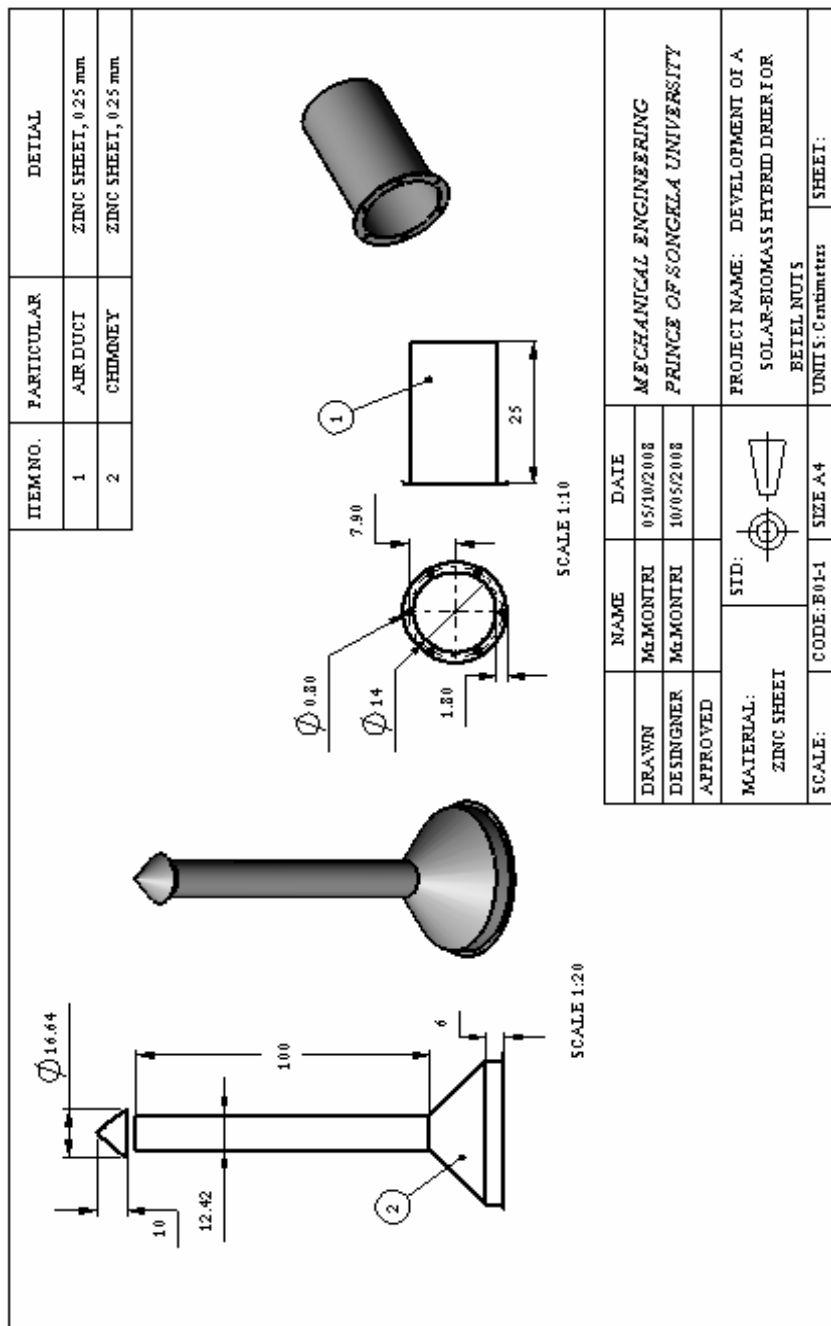
รูปที่ 5 รายละเอียดของสอปแบบรีดน้ำตาลจากอากาศออกจากห้องอบแห้ง



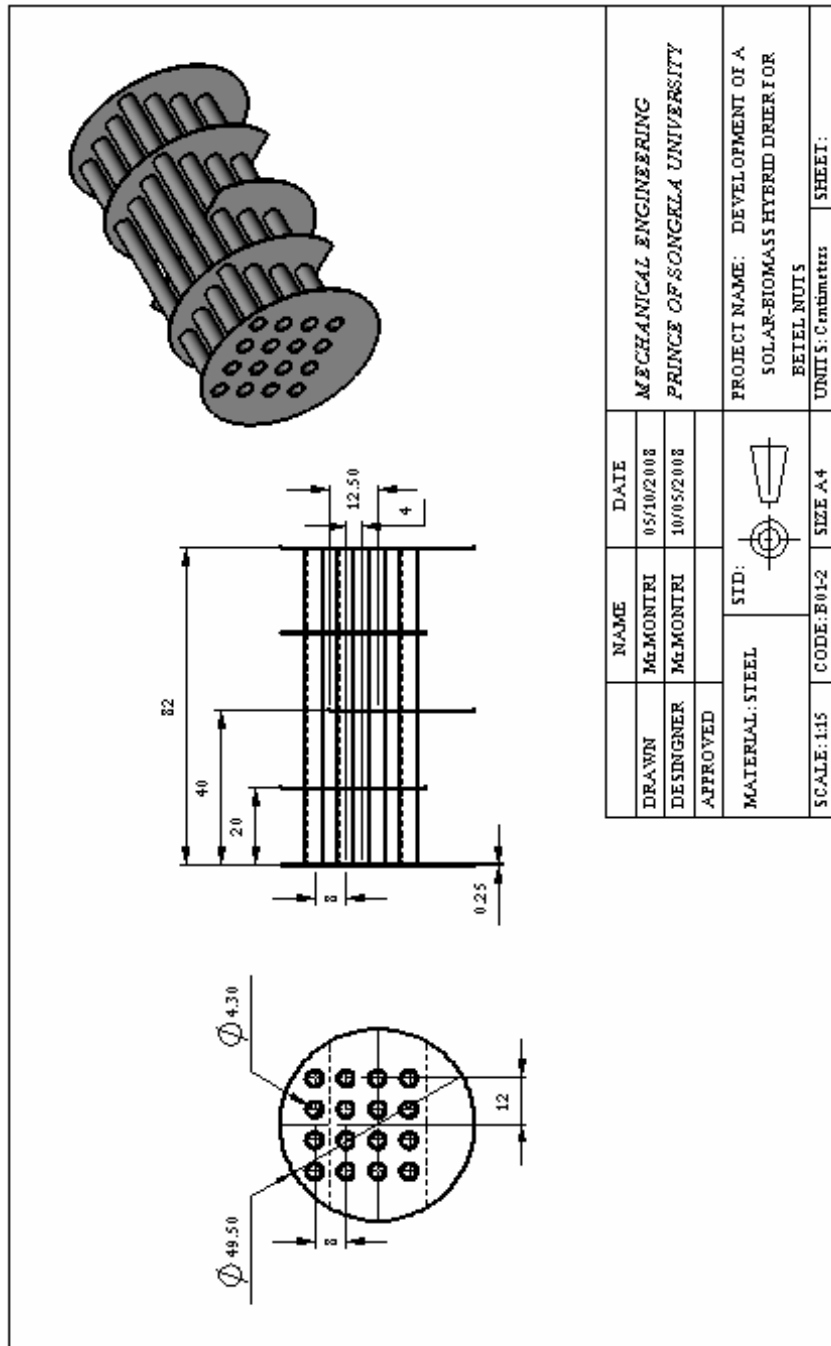
รูปที่ ๖ รายละเอียดของฮอปเปอร์ด้านอากาศเข้าห้องอบแห้ง



รูปที่ ๗ ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเตาเผาชีวมวล

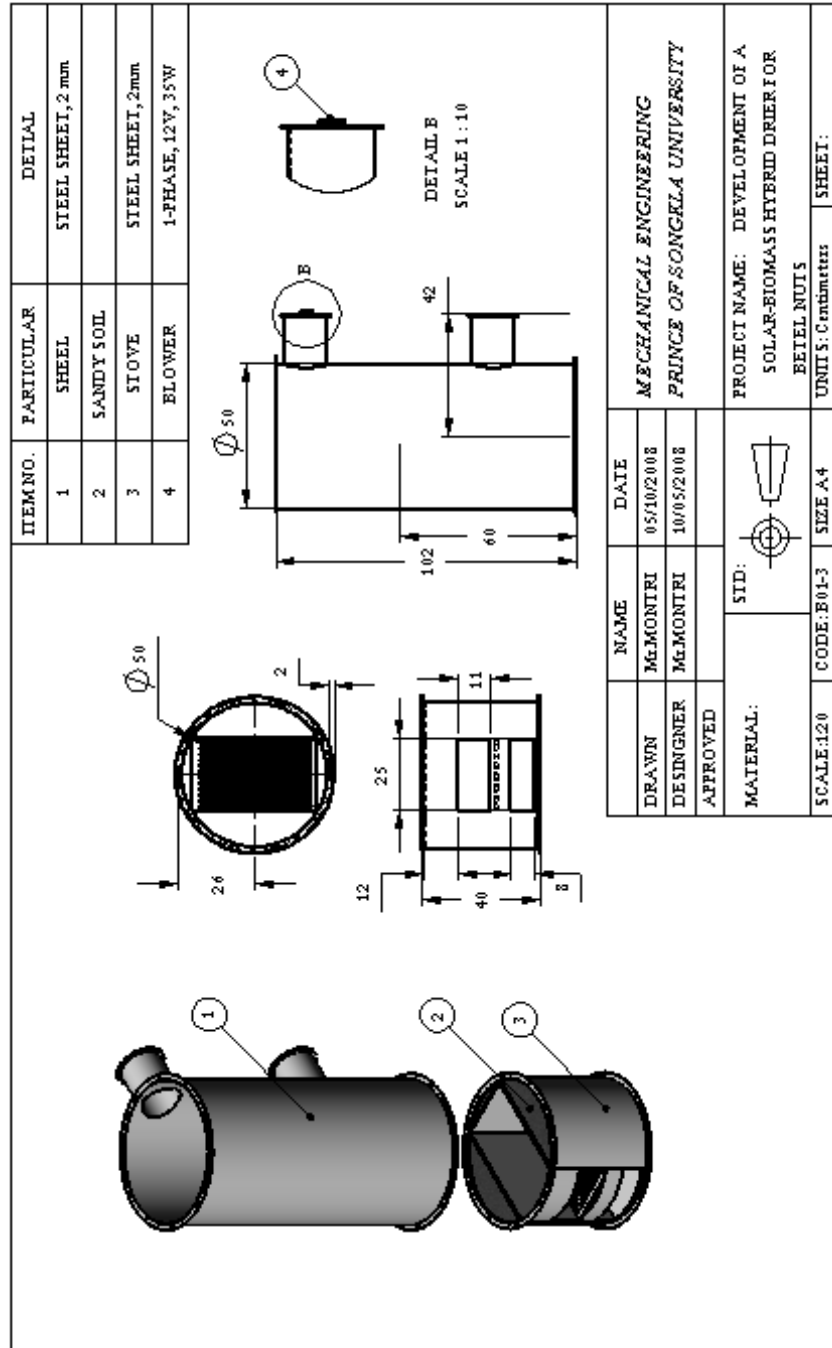


รูปที่ ๑๘ รายละเอียดของปล่องระเหยแห้งและท่ออากาศ

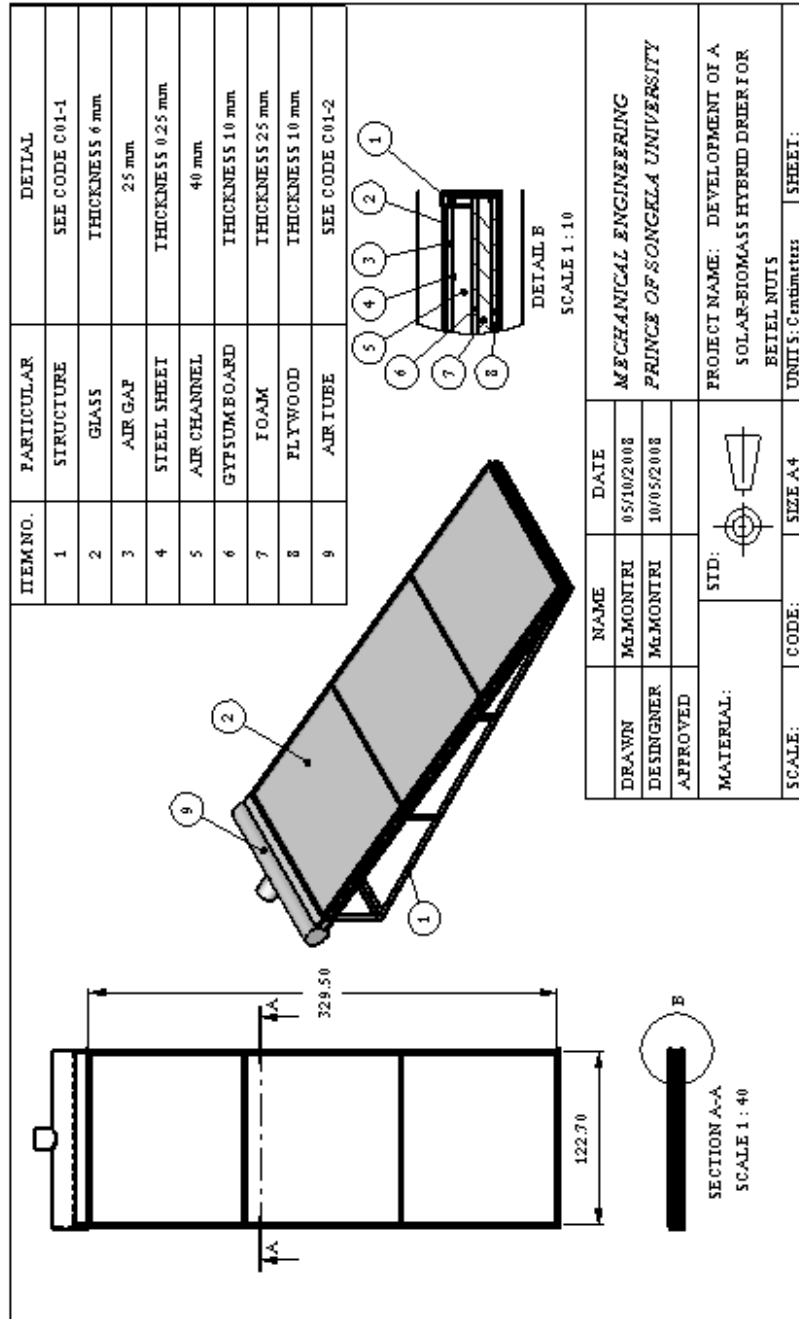


DRAWN	ME	DATE	
DESIGNER	ME		
APPROVED			
MATERIAL: STEEL	STD:		
SCALE: 1:15	CODE: B01-2		
MECHANICAL ENGINEERING PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY		PROJECT NAME: DEVELOPMENT OF A SOLAR-BIOMASS HYBRID DRIER FOR BETEL NUTS UNIT 5: Cendamas SHEET:	

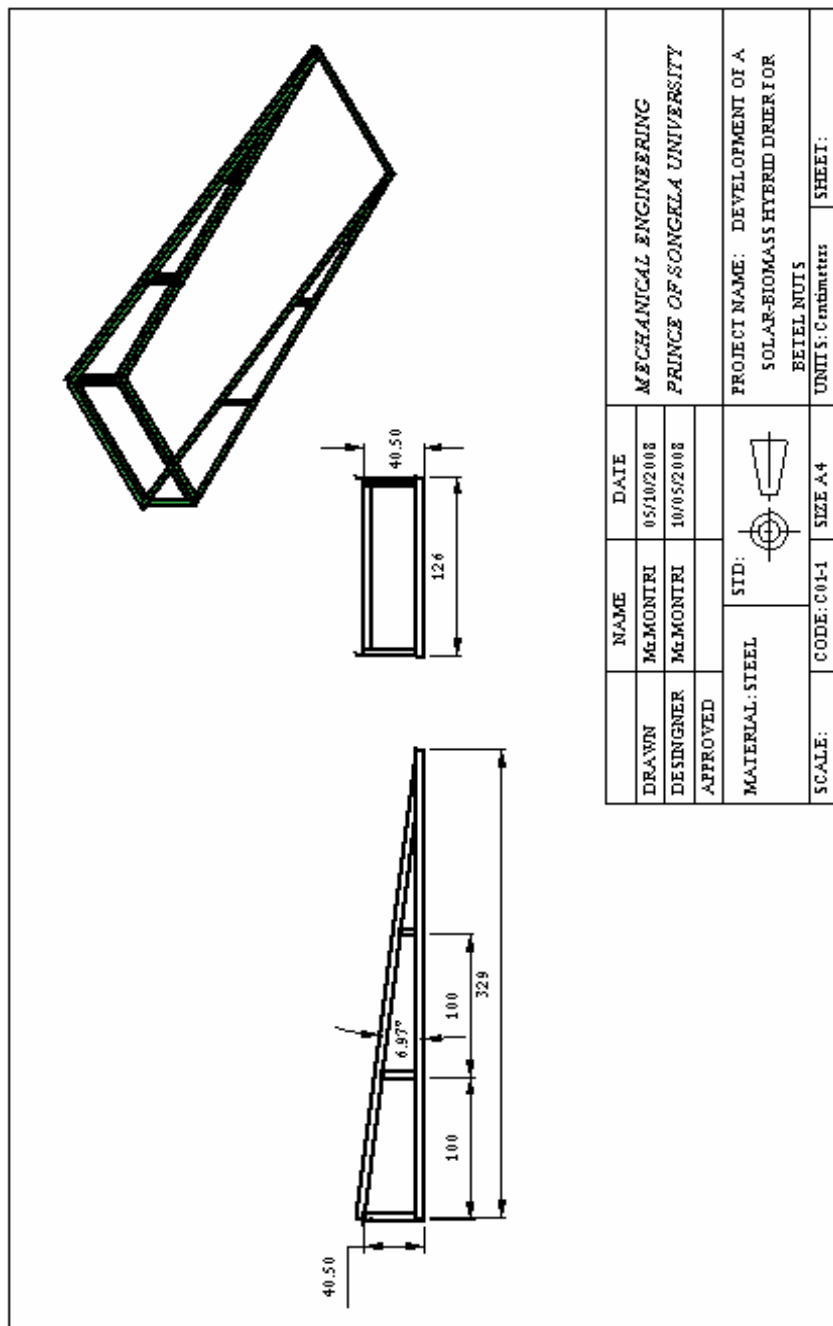
รูปที่ 9 รายละเอียดของ TUBE



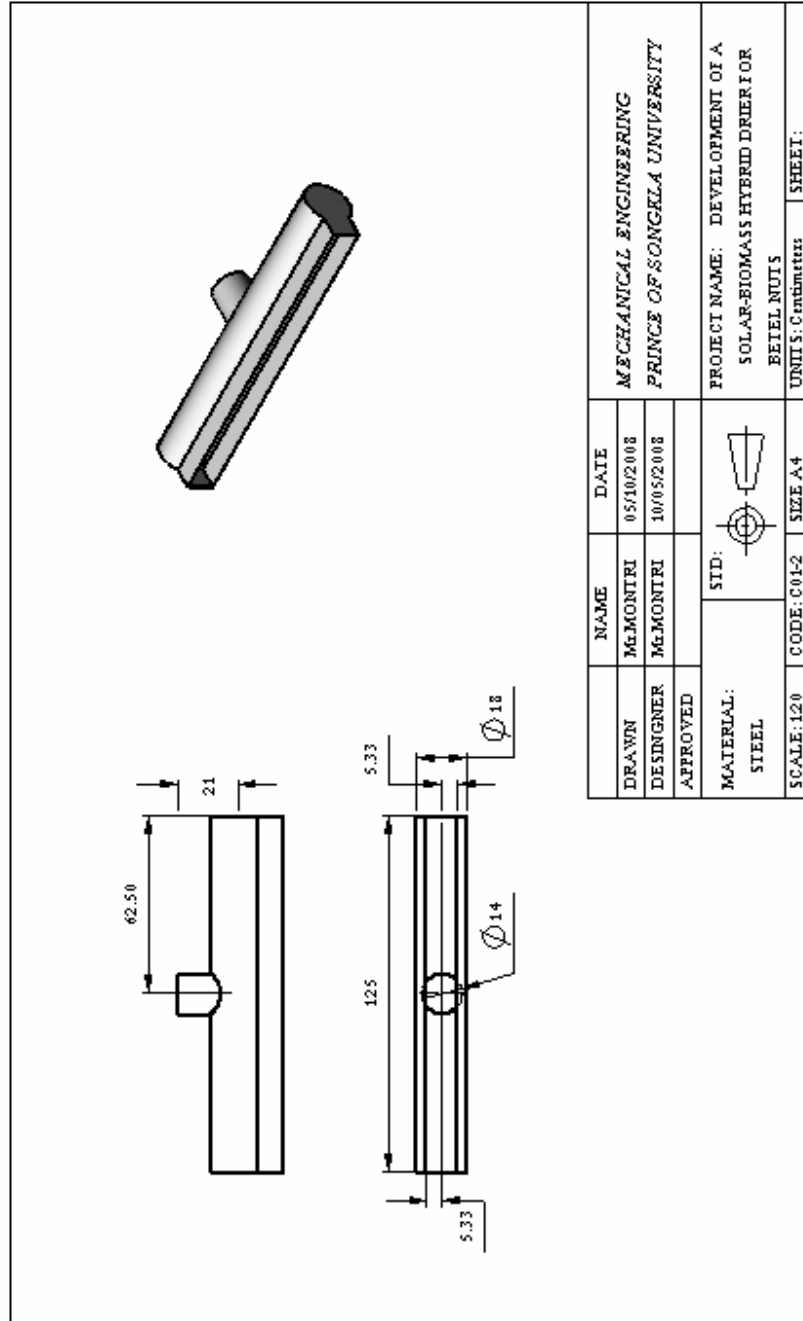
รูปที่ 10 รายละเอียดของ SHEEL และ เตาเผาชีวมวล



รูปที่ 11 ส่วนประกอบของแผงรังสีดวงอาทิตย์



รูปที่ 12 รายละเอียดของโครงสร้างรองรับแผงรับรังสีดวงอาทิตย์



รูปที่ จ 13 รายละเอียดของท่อนอากาศของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

ภาคผนวก ฉ
ภาพถ่ายการทำวิจัย



รูปที่ ๑ แสดงภาพถ่ายผลหมากพันธุ์ผลกลมรี อายุ 8-9 เดือน ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ ๒ แสดงภาพถ่ายผลหมากผ่าซีกที่บรรจุในห้องอบแห้งขณะทำการทดลอง



รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียว



รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมากโดยใช้พลังงานชีวมวลอย่างเดียว



รูปที่ ๕ แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล



รูปที่ ๖ แสดงภาพถ่ายขณะทดลองอบแห้งหมาก โดยใช้พลังงานร่วมแสงอาทิตย์และชีวมวล



รูปที่ ๗ แสดงภาพถ่ายผลหมากที่ผ่านการอบแห้ง ความชื้นประมาณ 48-49 %(wb)



รูปที่ ๘ แสดงภาพถ่ายขณะแกะเมล็ดหมากออกจากเปลือก เพื่อเตรียมอบแห้งในขั้นต่อไป



รูปที่ ๙ แสดงภาพถ่ายขณะอบแห้งเมล็ดหมาก



รูปที่ ๑๐ แสดงภาพถ่ายเมล็ดหมากที่ผ่านการอบแห้ง ความชื้นสุดท้าย 12%(wb)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายมนตรี เรืองประดับ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812105		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร	2542	

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ตำบลท่าจิว อำเภอเมือง
จังหวัดนครศรีธรรมราช

งานตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

มนตรี เรืองประดับ, ชูเกียรติ คุปตานนท์, จันทกานต์ ทวีกุล และ ปัญญรักษ์ งามศรีตระกูล. 2551
“การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผลหมากด้วยเครื่องอบลมร้อน”, การประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6, วันที่ 8-9 พฤษภาคม 2551, คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.