

การอบกั้วยเลืบมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

Drying of Musa Nana Linn. Using Solar and Biomass Energy

อรรถ อากาศสุวรรณ

Auk Arkasuwan

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

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบถ้วยเก็บมีอนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล
 ผู้เขียน นายอรรถ อากาศสุวรรณ
 สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ ทิมสกุล)

.....ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.สุภวรณ์ ภูริระวณิชย์กุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ ทิมสกุล)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ไพโรจน์ คีรีรัตน์)

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ไพโรจน์ คีรีรัตน์)

.....กรรมการ
 (ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ ทิมสกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายอรรถ อากาศสุวรรณ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายอรรถ อากาศสุวรรณ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล
ผู้เขียน	นายอรรถ อากาศสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล มีอากาศเป็นสื่อกลางพาความร้อนซึ่งรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และความร้อนจากไม้ฟืนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์กักเก็บความร้อน เลือกใช้พาราฟินเป็นสารสะสมความร้อนเนื่องจากพาราฟินสะสมความร้อนได้มากและระยะเวลาสำหรับคายความร้อนนานกว่าน้ำและอิฐ โดยสะสมความร้อนในพาราฟินจากพลังงานชีวมวลในช่วงเวลากลางคืนและปลดปล่อยในช่วงเวลากลางวัน สำหรับการเผาไม้ฟืนพบว่าไม้ฟืนที่มีความยาวยาวมากจะยากต่อการควบคุมอัตราส่วนของอากาศและเชื้อเพลิงที่เหมาะสม เพื่อไม่ให้เชื้อเพลิงดับหรือความร้อนไม่สูงเกินไป การเผาไม้ฟืนสั้นจึงช่วยลดความร้อนให้สามารถอบกล้วยในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C การอบกล้วย 30 kg กรณีเผาไม้ฟืนยาว 1 m สามารถผลิตลมร้อนอุณหภูมิ 40-80°C ซึ่งอุณหภูมิสูงทำให้ผิวกล้วยแห้ง ความชื้นในกล้วยหลังจาก 30 ชั่วโมงสูงประมาณ 40% d.b. กรณีเผาไม้ฟืนยาว 35 cm สามารถผลิตลมร้อน 40-60°C ความชื้นของกล้วยภายในห้องอบต่างกัน 10% d.b. การสลับถาดกล้วยในชั่วโมงที่ 10 ช่วยให้การแห้งตัวของกล้วยสม่ำเสมอ ความชื้นสุดท้ายของกล้วยหลังการอบ 34 ชั่วโมงมีค่าประมาณ 30% d.b. ผลต่างความชื้นของกล้วยภายในตู้ประมาณ 3.8%d.b. และเครื่องอบแห้งสามารถอบกล้วยได้สูงสุด 60 kg มีประสิทธิภาพ 6.33% เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการซึ่งมีประสิทธิภาพ 42.8% พบว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งที่ออกแบบต่ำกว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการ เนื่องจากเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการใช้ความร้อนจากการห้องเผาไหม้ก๊าซหุงต้มโดยตรงจึงมีประสิทธิภาพสูง แต่เครื่องอบแห้งที่ออกแบบใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์และไม้ฟืนจากสวนของเกษตรกรจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานแก่เกษตรกรได้

Thesis Title	Drying of Musa Nana <i>Linn.</i> Using Solar and Biomass Energy
Author	Mr.Auk Arkasuwan
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2012

ABSTRACT

The purpose of this research is to build a dryer of Musa Nana *Linn.* banana using solar and biomass energy. Air is heated by solar energy through a solar collector, and hot gas from wood combustion through a heat exchanger and a heat storage. Paraffin is selected as a heat storage medium because of its higher heat storage capacity and longer heat emission period than water and brick. Heat is collected in paraffin during night time and is used during day time. Burning long-sized wood (1m) is more difficult to control the ratio of air and fuel than the shorter (35 cm). This also results in a suitable drying temperature in the range of 40-60°C. When drying 30 kg of banana using 1-meter-long wood, the temperature is in the range of 40-80°C which is too high. The banana skin is too dry for moisture inside the banana to evaporate. This results in a high moisture content of 40% d.b after 30 hours of drying. When using 35-cm-long wood, the temperature can be controlled in the range of 40-60°C. Difference of banana moisture content in the chamber is 10% d.b. Switching trays after 10 hours of drying reduces the difference to 3.8% d.b. Increasing the capacity of the banana to 60 kg, thermal efficiency is 6.33% which is lower than the commercial LPG dryer at 42.8%. The low efficiency of the designed dryer is because of the indirect heat transfer compared with the direct heat transfer from the gas burning to the product. However, the designed dryer of employs renewable energy of solar and biomass which reduces energy cost for the entrepreneurs.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลสำคัญหลายท่านด้วยกันจึงถือโอกาสขอขอบคุณบุคคลดังกล่าวคือ รองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงศ์ ทัพสกุล และ รองศาสตราจารย์ ไพโรจน์ คีรีรัตน์ ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำปรึกษาและข้อคิดอันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุภวรรณ ภูระวณิชย์กุล ผู้ให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนางแบบสดิต ขอขอบคุณนายอนุสรณ์ แอบไชสงที่อำนวยความสะดวกในการทดลองเพื่อเลือกสารตัวกลางสำหรับเก็บกักความร้อน

ขอขอบคุณกลุ่มกล้วยเล็บมือนางท่ามะปริง และวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรีซึ่งอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สถานที่ และคอยอำนวยความสะดวกให้สามารถทำงานลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งอนุเคราะห์ทุนศึกษากันกุฎิ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พีระพงศ์ ทัพสกุล และรองศาสตราจารย์กำพล ประทีปชัยกูรสำหรับการจัดสรรเงินทุนสนับสนุนการทำวิจัย ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ซึ่งอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนเพิ่มเติมในงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ สถานที่ และคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำชี้แนะในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณความดีทั้งหมดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้แต่ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัว ที่ให้การดูแลเลี้ยงดูเป็นอย่างดี ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และปลูกฝังคุณธรรม เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาเอก และปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ตลอดจนทุกท่านที่มีได้กล่าวมา ณ ที่นี้ที่คอยให้กำลังใจและมีส่วนช่วยในการทำวิจัยและให้คำแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

อรรถ อากาศสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์	8
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.5 ขอบเขตงาน	8
2 ทฤษฎี	
2.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง	10
2.2 การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์	11
2.3 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์	12
2.4 ระบบกักเก็บความร้อน	13
2.5 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง	13
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	17
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	18
3.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการ	19
3.4 การทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนางแบบสด	23
3.5 การทดลองเพื่อเลือกสารตัวกลางสำหรับกักเก็บความร้อน	24
3.6 จำลองห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ	25
3.7 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล	26
4 คุณลักษณะการแห้งตัวของกล้วยและการออกแบบเครื่องอบแห้ง	
4.1 การอบแห้งกล้วยเล็บมือนางในปัจจุบัน	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนาง	35
4.3 สารตัวกลางสำหรับกักเก็บความร้อน	37
4.4 การจำลองห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ	44
4.5 การออกแบบเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล	48
5 ผลและวิจารณ์ผล	52
5.1 การทดสอบห้องเปล่า (No-load condition)	53
5.2 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนางด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการพาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืน	66
5.3 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ และประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล	98
5.4 การคำนวณประสิทธิภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	99
5.5 ผลการทดสอบคุณภาพของกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง	104
6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผล	106
6.2 ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารอ้างอิง	109
ภาคผนวก	
ก การคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล	112
ข แบบเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล	148
ค ข้อมูลการทดลองเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล	155
ง การคำนวณสมรรถนะ	180
จ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกล้วยอบ	204
ฉ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง	211
ช ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	214
ประวัติผู้เขียน	222

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงค่าที่คำนวณได้จากสมการความชื้นสมดุลแบบต่าง ๆ	36
5.1	แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ และประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล	99
5.2	แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพ	102
5.3	แสดงผลการคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	103
5.4	ความชื้นสุดท้าย ค่า Water activity สี ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด เอสเชอริเชีย โคลิไลสตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส และยีสต์และรา	104
ค 1	ข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555	156
ค 2	ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555	158
ค 3	ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555	160
ค 4	ความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555	161
ค 5	ข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555	162
ค 6	ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555	164
ค 7	ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555	166
ค 8	ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555	167
ค 9	ข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555	168

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค 10	ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555	170
ค 11	ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555	172
ค 12	ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555	173
ค 13	ข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556	174
ค 14	ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556	176
ค 15	ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556	178
ค 16	ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่าง ๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้พินยาว 35 cm (สลัปดาห์) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556	179

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1.1	(a) องค์ประกอบเตาเผาไหม้ (b) แสดงการไหลของอากาศในเตาเผาไหม้	4
1.2	แสดงองค์ประกอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และความร้อนจากชีวมวล	5
1.3	แสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	
	(a) ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จากการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ	
	(b) ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการควบคุมการไหลของอากาศ	7
2.1	เส้นโค้งการแห้งของผลิตภัณฑ์	11
2.2	ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ	13
3.1	แผนผังชุดการทดลอง	18
3.2	เครื่องอบกล้วยเล็บมือนางของกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง	20
3.3	เครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้มของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี	21
3.4	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี	22
3.5	ชุดทดลองระบบกักเก็บความร้อน	24
3.6	แสดงตำแหน่งชั้นวางกล้วยเล็บมือนาง	26
3.7	ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มแสงอาทิตย์	28
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในตู้อบ อุณหภูมิช่องระบาย ความชื้นและอุณหภูมิภายนอกห้องอบกับเวลา	30
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์บริเวณช่องระบายความชื้นและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกกับเวลา	30
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา	31
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา	32
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกกับเวลา	33
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกกับเวลา	33
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา	34

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา	34
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 50°C	35
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 60°C	35
4.11	ระบบกักเก็บความร้อน	37
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา	40
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนสะสมกับเวลา	42
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา กรณีดึงความร้อน	43
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนดึงออกของ น้ำ อีฐและ พาราฟินกับเวลา	44
4.16	อุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้ง	46
4.17	การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง	48
4.18	เครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล	51
4.19	ภาพถ่ายของเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล	51
5.1	การเคลื่อนที่ของลมร้อนและก๊าซร้อนของเครื่องอบแห้ง	52
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา	54
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา	55
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	56
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา	57
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	58
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา	59

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	60
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิจาราลินกับเวลา	61
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิจาราลินกับเวลา	62
5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	63
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิจาราลินกับเวลา	64
5.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	65
5.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา	66
5.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไม้พินสะสมกับเวลา	67
5.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	68
5.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิจาราลินกับเวลา	69
5.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่ง ต่าง ๆ กับเวลา	70
5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา	71
5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา	72
5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา	73
5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา	74
5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไม้พินสะสมกับเวลา	75
5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	76
5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิ จาราลินกับเวลา	77
5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่ง ต่าง ๆ กับเวลา	78
5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา	79

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา	80
5.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา	81
5.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา	82
5.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไอน้ำกับเวลา	83
5.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	84
5.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา	85
5.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่ง ต่าง ๆ กับเวลา	86
5.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา	87
5.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ กับเวลา	88
5.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา	89
5.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา	90
5.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไอน้ำกับเวลา	91
5.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา	92
5.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา	93
5.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่ง ต่าง ๆ กับเวลา	94
5.43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา	95
5.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา	96
5.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา	97
ก 1	แสดงพื้นที่หน้าตัดส่วนต่าง ๆ ในห้องอบแห้ง	115
ก 2	Recommended segmental baffle cut values B_c as a function of L_{bc}/D_s ratio. SBC, segmental baffle cuts in no-phase change flow; CV, baffle cuts applicable to condensing vapors	118
ก 3	Ideal tube bank j_i and f_i factors for 90 in-line layout	130

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก 4	transfer correction factor J_b for shell-to-bundle bypass as a function of F_{sbp} . With effect of sealing strips per tube rows crossed, r_{ss}	134
ข 1	อุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล	149
ข 2	แผงรับรังสีแสงอาทิตย์	149
ข 3	อุปกรณ์กักเก็บความร้อน	150
ข 4	กลุ่มท่อภายในอุปกรณ์กักเก็บความร้อน	150
ข 5	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	151
ข 6	กลุ่มท่อภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	151
ข 7	ปล่องระบายไอเสียของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	152
ข 8	เตาเผาไม้พิน	152
ข 9	ห้องอบแห้ง	153
ข 10	โครงสร้างภายในของห้องอบแห้ง	153
ข 11	ถาดวางกล้วยเล็บมือนาง	154

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

A	พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (m^2)
c_p	ความร้อนจำเพาะของอากาศ ($kJ/kg^\circ C$)
E_e	ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)
$(HV)_{wood}$	ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg)
I	ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m^2)
L	ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
MC	ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ (%d.b.)
MC,s1	ความชื้นของกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1 (%d.b.)
MC,s3	ความชื้นของกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 3 (%d.b.)
MC,s5	ความชื้นของกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (%d.b.)
MCave	ความชื้นของกล้วยเล็บมือนางเฉลี่ย (%d.b.)
m_a	ปริมาณอากาศที่เข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (kg)
m_L	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
m_{wood}	ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
RH	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
SEC	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($kJ/kg_{water\ removed}$)
T1	อุณหภูมิอากาศภายนอก ($^\circ C$)
T2	อุณหภูมิมลร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ($^\circ C$)
T3	อุณหภูมิมลร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน ($^\circ C$)
T4	อุณหภูมิมลร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^\circ C$)
T5	อุณหภูมิมลร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง ($^\circ C$)
Tch,ave	อุณหภูมิมลร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง ($^\circ C$)
T13	อุณหภูมิมลร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง ($^\circ C$)
T14	อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน ($^\circ C$)
T15	อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน ($^\circ C$)
T16	อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^\circ C$)
T17	อุณหภูมิพาราฟิน ($^\circ C$)
$T_{h,i} - T_{c,i}$	ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($^\circ C$)

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

$T_{h,i} - T_{h,o}$	ผลต่างอุณหภูมิก่อนเข้าระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและหลังผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)
t	เวลา (s)
V	ความเร็วลม (m/s)
ε	ประสิทธิผลของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล
$\eta_{biomass}$	ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนด้วยชีวมวล
η_{dryer}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยรวมของเครื่องอบแห้ง
η_{solar}	ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

กล้วยเล็บมือนางมีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Musa Nana Linn.* และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Musa* (AA group) “Kluai Leb Mu Nang” เป็นกล้วยในสายพันธุ์ *Acuminata Cultivars* เป็นพืชที่ขึ้นในพื้นที่ที่มีอากาศร้อนชื้น ปลูกกันมากในบางท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศไทย เช่น จังหวัดชุมพร จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดพัทลุง เป็นต้น กล้วยเล็บมือนางสามารถปลูกแซมในสวนยางพาราและสวนผลไม้เพราะต้องการแสงรำไร ปลูก 8 เดือนจึงสามารถเก็บผลผลิตครั้งแรกได้ จากนั้นสามารถเก็บผลผลิตต่อเนื่องได้ทุกเดือนในช่วงระยะเวลา 3 ปี

กล้วยเล็บมือนางเป็นผลไม้เสื่อมคุณภาพเร็ว สุกง่าย เก็บรักษาไว้ได้ไม่นาน เมื่อถึงฤดูจะมีกล้วยออกมาเป็นจำนวนมาก ทำให้เวลาจำหน่ายจำกัด และราคาถูก ถ้าจำหน่ายไม่หมดจะเน่าเสีย จึงแก้ปัญหาโดยนำกล้วยมาถนอมอาหารด้วยการอบแห้ง โดยนำกล้วยที่สุกงอมเต็มที่มาปอกเปลือกและดึงเส้นใยออก กล้วยที่ปอกแล้วถูกจัดวางเรียงในถาดและนำเข้าตู้อบ การอบแห้งจะอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50-60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะนำกล้วยออกมาพลิก 1 ครั้งเมื่ออบไปได้ 12 ชั่วโมง กล้วยที่แห้งแล้วจะถูกนำมาบรรจุลงกล่อง เพื่อรอส่งขายต่อไป

ปัจจุบันมีการอบแห้งกล้วยเล็บมือนางโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซหุงต้ม หรือใช้ร่วมกันระหว่างความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าและความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซหุงต้ม ซึ่งไฟฟ้าและก๊าซหุงต้มมีราคาแพงและมีแนวโน้มสูงขึ้นตามราคาน้ำมัน จึงจำเป็นต้องหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ทดแทน เช่น ไม้ฟืนและแสงอาทิตย์ เนื่องจากไม้ฟืนมีมากในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย และแสงอาทิตย์มีไม่จำกัดและสะอาด โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลก จะมีปริมาณความเข้มของแสงอาทิตย์ค่อนข้างมากตลอดทั้งปี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาการใช้พลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์แลกเปลี่ยนความร้อนผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนจากการเผาไม้ฟืนแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับผลิตลมร้อนเพื่ออบแห้งกล้วยเล็บมือนาง

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณลักษณะการแห้งตัวและความชื้นสมดุลของกล้วยมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเครื่องอบกล้วย โดยมีรายละเอียดดังนี้

Milton (2004) ศึกษาเส้นโค้งการอบแห้งและค่า water activity สำหรับกล้วยอบแห้ง โดยอบกล้วยชนิด passa ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C ความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity และความชื้นในผลิตภัณฑ์ และ isotherms ของกล้วยที่ 25°C พบว่าน้ำในผลิตภัณฑ์จะลดลงตามเวลาในการอบและน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำในอากาศเข้าสู่ผลิตภัณฑ์เมื่ออุณหภูมิลดลง

Nguyen et al. (2007) ศึกษาการแห้งตัวของกล้วยหอมซึ่งมีอิทธิพลมาจากตัวแปรของการทดลอง ความหนา การเจริญเติบโตเต็มที่ของกล้วย และฤดูเก็บเกี่ยว จากการทดลองอบกล้วยที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, และ 70°C พบว่าอบที่อุณหภูมิสูงคือ 60 และ 70°C อัตราการอบแห้งเร็ว ใช้เวลาอบแห้งน้อย จากการทดลองอบกล้วยสุกความหนา 1 cm และ 2 cm ที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C พบว่าอัตราการแห้งตัวมีความแตกต่างกันมากในระยะเวลาเริ่มต้นของการอบแห้ง (3 ชั่วโมง) ความแตกต่างนี้จะลดลงทีละน้อยจนเท่ากัน เนื่องจากระยะเวลาอบแห้งเริ่มต้น กล้วยมีความชื้นสูง การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในกล้วยออกสู่ผิวขึ้นอยู่กับความหนาและการอบที่อุณหภูมิสูงพื้นผิวของกล้วยแผ่นบางจะแข็งเร็วกว่ากล้วยแผ่นหนาเพราะอัตราการระเหยของความชื้นเริ่มต้นจากผิวรวดเร็ว การแข็งตัวนี้มีผลทำให้อัตราการแห้งตัวของแผ่นบางช้าลง จากการทดลองอบกล้วยแต่ละเดือนพบว่าฤดูเก็บเกี่ยวมีผลต่อความชื้นเริ่มต้นและมีอิทธิพลต่ออัตราการแห้งตัวและระยะเวลาอบแห้งและจากการทดลองอบกล้วยดิบและกล้วยสุกที่อุณหภูมิและความหนาต่าง ๆ พบว่าความแตกต่างของการเจริญเติบโตเต็มที่ของกล้วย (ความสุกงอม) มีอิทธิพลเล็กน้อยต่ออัตราการแห้งตัวและระยะเวลาอบแห้ง

ณัฐพล รุ่งประแสง (2547) ศึกษาการอบกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้รางพาราโบลิกร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนสถานะ พบว่าในการคำนวณเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของเครื่องอบแห้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งคือ อุณหภูมิในการอบแห้งกล้วยอยู่ในช่วง 55–60°C ในช่วงเวลากลางวันพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์อบแห้งสามารถละลายพาราฟินในถังเก็บกักพลังงานความร้อนได้หมดพอดี และในช่วงเวลากลางคืนความร้อนจากพาราฟินในถังเก็บกักพลังงานความร้อนสามารถดึงมาใช้ได้หมดพอดี พบว่าขนาดของเครื่องอบแห้งที่เหมาะสมคือขนาดถังเก็บพลังงานความร้อนขนาด 100 kg พื้นที่รางรับแสงพาราโบลิกขนาด 2 x 2.31 m² จำนวน 2 ราง พื้นที่ของท่อในการ

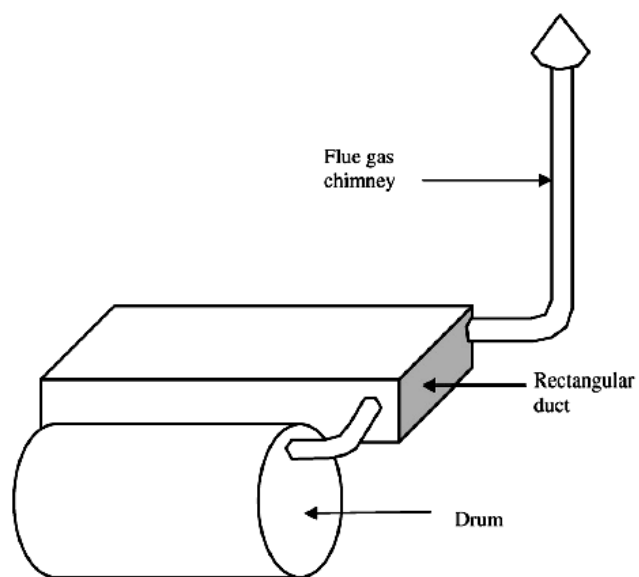
แลกเปลี่ยนความร้อนในถังพาราฟินมีพื้นที่ขนาด 4 m² อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสม 0.13 kg/s อบได้ครั้งละ 45 kg

จากรูวรรณ กุลวิศ (2550) ศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพ โดยใช้กล้วยหอมทองตัดตามขวางหนา 3 mm อบที่อุณหภูมิ 70, 80, 90 และ 100°C เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้าย 4%d.b. พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (effective diffusion coefficient) ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นขณะอบแห้ง กล้วยแผ่นมีการหดตัวน้อย กรอบมากและแข็งน้อยลงเมื่ออบที่อุณหภูมิสูง

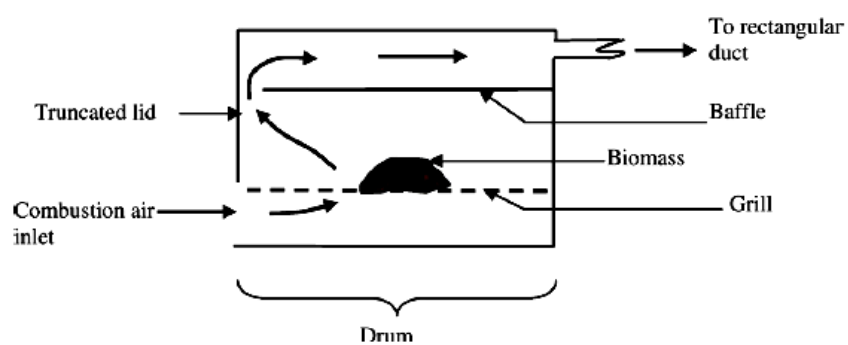
จากการทบทวนเอกสารข้างต้นพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการแห้งตัวของกล้วย ควรเลือกอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 50-60°C โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า water activity และความชื้นในกล้วยเล็บมือนาง สำหรับความสูงของกล้วยส่งผลเล็กน้อยจึงเลือกใช้กล้วยเล็บมือนางสุกอบสำหรับอบแห้ง

ระบบกักเก็บความร้อน และสารตัวกลางในการกักเก็บความร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถรักษาความร้อนในการอบแห้งได้นานขึ้น ในที่นี้จะทบทวนบทความที่เกี่ยวข้องกับสารกักเก็บความร้อนและระบบกักเก็บความร้อนจากพลังงานชีวมวลดังนี้

Madhlopa et al. (2007) ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับแสงโดยอ้อมร่วมกับการให้ความร้อนด้วยชีวมวล โดยเตาเผาชีวมวลมีองค์ประกอบดังรูปที่ 1.1 (a) และมีอัตราการไหลของอากาศดังรูปที่ 1.1 (b) ซึ่งอากาศออกจาก Drum พาความร้อนเข้าช่องรูปสี่เหลี่ยมแล้วระบายออกทางปล่องระบายแก๊ส ใช้หิน กรวดและซีเมนต์ในการกักเก็บความร้อนเป็นตัวดูดซับความร้อนจากช่องสี่เหลี่ยมจากเตาเผาและแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 1.2 ทดลองอบแห้งสับประรดแผ่นบาง ลดความชื้นจาก 669 ถึง 11 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้งซึ่งทดลอง 3 กระบวนการคือ อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าเท่ากับ 15% 11% และ 13% ตามลำดับ

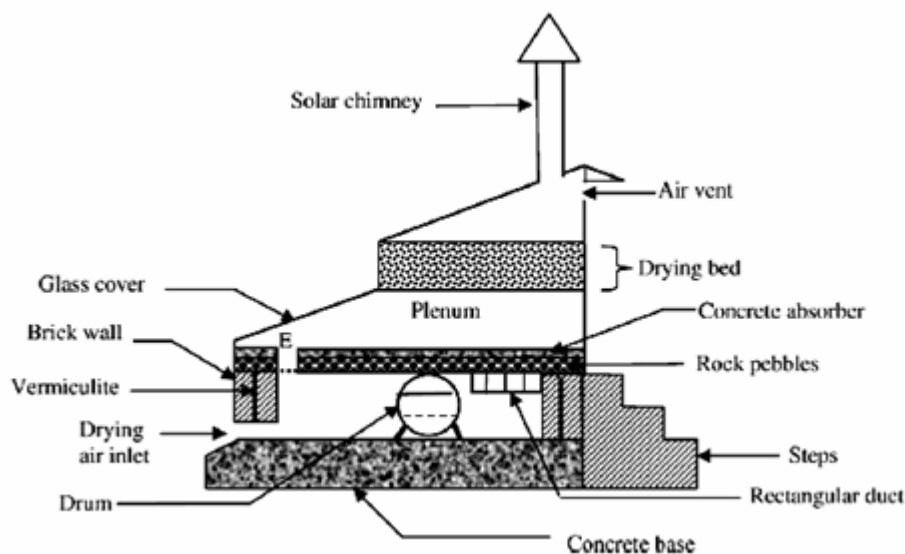


(a)



(b)

รูปที่ 1.1 (a) องค์ประกอบเตเผาไหม้ (b) แสดงการไหลของอากาศในเตเผาไหม้
ที่มา: Madhlopa et al. (2007)



รูปที่ 1.2 แสดงองค์ประกอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และความร้อนจากชีวมวล
ที่มา: Madhlopa et al. (2007)

ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง (2548) จำลองระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบไม่เปลี่ยนแปลงสถานะในช่วงอุณหภูมิ 50-150°C โดยใช้ไขมันที่ผ่านการใช้งานแล้วร่วมกับก้อนหินเป็นตัวกลางสะสมความร้อน แหล่งให้พลังงานความร้อนคือฮีตเตอร์ไฟฟ้า การทดลองประกอบด้วยกรณีป้อนความร้อนเข้าและกรณีดึงความร้อนออก พบว่าระบบเก็บสะสมความร้อนด้วยสารตัวกลางชนิดไม่เปลี่ยนแปลงสถานะควรเลือกสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนที่มีค่าความจุความร้อน (C_p) หรือค่าความหนาแน่น (ρ) สูง ๆ เนื่องจากอัตราส่วนโดยปริมาตรก้อนหินกับน้ำมันภายในระบบมีผลต่อการเก็บสะสมความร้อน การเพิ่มปริมาตรก้อนหินจะทำให้ความสามารถในการเก็บสะสมความร้อนในระบบสูง ระยะเวลาป้อนความร้อนเข้าสั้นขึ้น

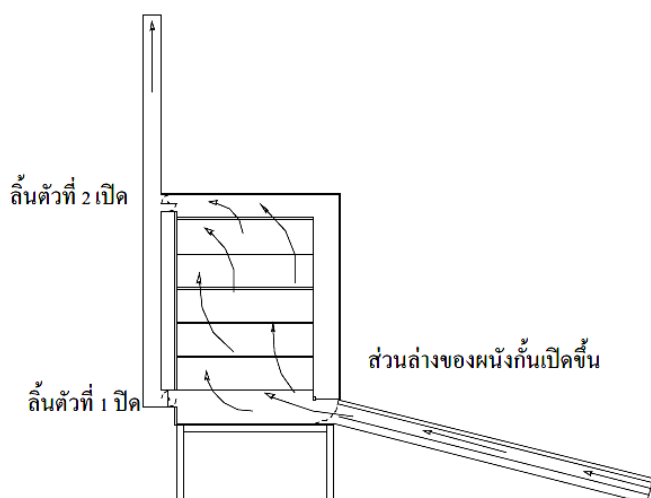
การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล ต้องใช้การป้อนพลังงานความร้อนจากไม้ฟืนเป็นเวลานาน อิฐจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับตัวกลางในระบบเก็บกักความร้อนสำหรับเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส นอกจากนี้การกระจายความร้อนในห้องอบเป็นอีกปัจจัยส่งผลต่ออัตราการแห้งตัวซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์แห้งไม่สม่ำเสมอ โดยทบทวนการกระจายตัวของอากาศในห้องอบแห้งจากเอกสารการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ

Mathioulakis et al. (1998) จำลองการเคลื่อนที่ของอากาศในห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ โดยประยุกต์ใช้สำหรับการอบแห้งลูกเกดจำนวน 9 กิโลกรัม ด้วยเตาอบสูญญากาศ ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อบเพื่อให้ความชื้นสุดท้ายเหลือ 15% w.b.

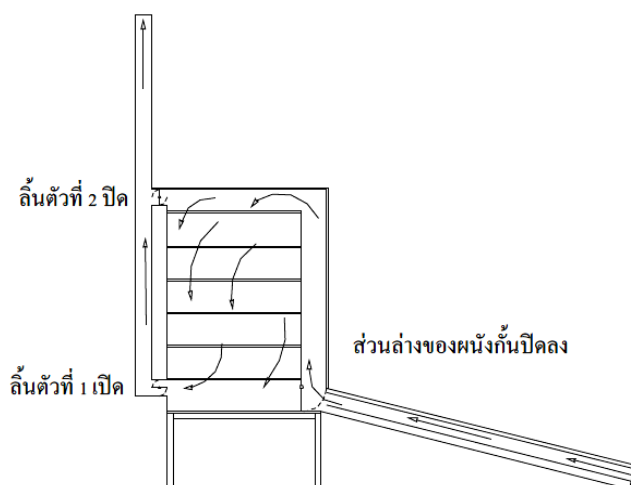
ลดลง 71% จากน้ำหนักริมแรก จากการศึกษาการกระจายตัวของความดันและความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งตัวและความเร็วลม โดยที่ความเร็วลมมากกว่า 1.2 m/s ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มของอัตราการแห้งตัวของผลิตภัณฑ์ และความเร็วลมจะสัมพันธ์กับความดันภายในห้องอบแห้ง

อากาศรณ์ ศรีสระคู (2549) ศึกษาการจำลองการอบแห้งผลลำไยโดยใช้การคำนวณทาง พลศาสตร์ของไหลแบบ 2 มิติ เพื่อทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องปล่อยอากาศทิ้ง และอุณหภูมิในการอบต่อการกระจายอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งลำไยและปริมาณพลังงานที่ใช้ของการอบ พบว่าที่อุณหภูมิในการอบที่ 75°C และเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องปล่อยอากาศทิ้ง 95 เปอร์เซ็นต์ จะให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

ปิยรัตน์ เขียวรวีวงศ์ (2550) ศึกษาการพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการควบคุมการไหลของอากาศดังรูปที่ 1.3 พบว่าตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการควบคุมการไหลของอากาศภายในตู้ ทำให้ค่าการกระจายของอุณหภูมิภายในตู้ดีกว่าตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ



(a)



(b)

รูปที่ 1.3 แสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

(a) ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จากการไหลของอากาศเป็นแบบธรรมชาติ

(b) ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการควบคุมการไหลของอากาศ

ที่มา: ปิยรัตน์ เชียรรวังศ์ (2550)

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาคุณลักษณะการแห้งตัว ความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนาง เนื่องจากไม่พบว่ามีงานวิจัยในด้านนี้มาก่อนจากการทบทวนเอกสารและจำลองการไหลของอากาศในตู้อบพร้อมวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ รวมทั้งศึกษาระบบกักเก็บความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบกล้วยเล็บมือนาง โดยสร้างเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดผสมผสาน (combined solar energy drying system) คือระบบ

อบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ควบคู่กับพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งในที่นี้ใช้พลังงานจากชีวมวล โดยเฉพาะไม้พินยางพาราซึ่งมีมากในภาคใต้

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการแห้งตัวของกล้วยเล็บมือนาง
2. ศึกษาการป้อนความร้อนจากการเผาไม้พินที่เหมาะสมสำหรับการอบกล้วยเล็บมือนาง
3. พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ผสมความร้อนจากไม้พินสำหรับการอบกล้วยเล็บมือนาง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้คุณสมบัติการแห้งตัวของกล้วยเล็บมือนางที่สภาวะต่างๆ
2. ได้เครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางที่เหมาะสม ซึ่งประกอบไปด้วยระบบผลิตและกักเก็บความร้อนจากไม้พินและแสงอาทิตย์

1.5 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในปัจจุบันของผู้ประกอบการ
2. ศึกษาความชื้นสัมพัทธ์และคุณลักษณะการแห้งตัวของกล้วยเล็บมือนาง
3. จำลองระบบผลิตลมร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และการเผาไม้พิน
4. ทดลองหาประสิทธิภาพระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง โดยใช้น้ำและอิฐเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส ใช้พาราฟินเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง กรณีป้อนความร้อนน้ำและอิฐป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C สำหรับพาราฟินป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C อย่างเดียว กรณีดึงความร้อนจะ

ป้อนความร้อนให้สารก็เก็บความร้อนมีอุณหภูมิ 70°C จากนั้นดึงความร้อนด้วยอุณหภูมิ
สิ่งแวดล้อม

5. ออกแบบ สร้าง และทดลองเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงาน
ชีวมวลสำหรับอบกล้วยเล็บมือนาง

บทที่ 2

ทฤษฎี

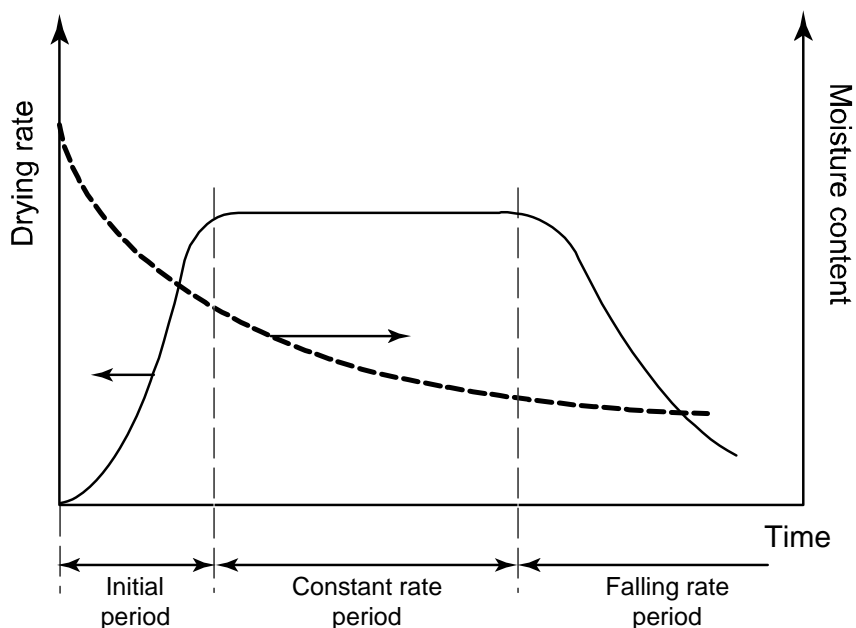
2.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้งคือการไล่ความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ โดยการระเหยน้ำด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อน ซึ่งความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ โดยทั่วไปการอบแห้งมักใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลาง ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความชื้นเมื่อสัมผัสกับอากาศร้อน จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดการพาความร้อนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ระยะเวลาของการแห้งแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วงดังนี้

1. ระยะเริ่มต้นของการอบแห้ง (initial period) ในระยะนี้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ใช้ทำแห้ง ซึ่งผลิตภัณฑ์อบแห้งจะเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน น้ำที่ระเหยในระยะนี้จะเป็นน้ำอิสระคือไม่จับกับโมเลกุลของสารอื่น การระเหยของความชื้นเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุ อัตราการแห้งตัวของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงในระยะนี้ค่อนข้างยากเนื่องจากเกิดขึ้นเร็วมาก

2. ระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่ (constant rate period) เป็นระยะที่ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงแบบเส้นตรงเทียบกับเวลา อุณหภูมิพื้นผิวของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะมีค่าคงที่และความชื้นที่บริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์มีค่าสม่ำเสมอ โดยที่อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในผลิตภัณฑ์อบแห้งมายังพื้นผิวของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับอัตราการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์ อัตราการแห้งตัวจะมีค่าคงที่ และขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่พื้นผิวของผลิตภัณฑ์

3. ระยะอัตราการระเหยของไอลดลง (falling rate period) เมื่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ถึงจุดหนึ่งซึ่งการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในออกมาสู่ผิวเป็นไปได้ยากขึ้นจึงไม่สามารถทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวได้ ทำให้ความชื้นบนพื้นผิวไม่อิมตัว ระยะนี้อัตราการแห้งตัวลดลง ตัวแปรที่ควบคุมอัตราเร็วในการแห้งตัวไม่ใช่ลักษณะของอากาศภายนอกอีกต่อไปแล้ว แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์เอง จุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการระเหยที่คงที่มาเป็นช่วงที่มีอัตราการระเหยลดลง เรียกว่า จุดความชื้นวิกฤต (critical moisture content)



รูปที่ 2.1 เส้นโค้งการแห้งของผลิตภัณฑ์

2.2 การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์

การวัดความชื้นของผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 วิธีด้วยกัน คือ

1. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก (Wet Basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ชื้นเป็นหลักซึ่งนิยมใช้ในทางการค้าดังนี้

$$\text{MC (\% w.b.)} = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ m_w คือ น้ำหนักของน้ำภายในเนื้อของวัสดุ (kg) และ m_d คือ น้ำหนักของเนื้อวัสดุแห้ง (kg)

2. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง (Dry Basis) เป็นการวัดโดยใช้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์แห้งเป็นหลักซึ่งนิยมใช้ในงานด้านวิจัยเป็นส่วนใหญ่ดังนี้

$$\text{MC (\% d.b.)} = \frac{m_w}{m_d} \times 100 \quad (2)$$

2.3 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์

ดวงอาทิตย์ให้พลังงานในรูปของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยตรง เพื่อใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร สิ่งสำคัญสำหรับการอบแห้งคือ การลดปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ เพื่อป้องกันการเน่าเสียในช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการคือ การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนสู่ผลิตภัณฑ์และถ่ายเทความชื้นออกจากภายในผลิตภัณฑ์มาที่ผิวออกสู่อากาศภายนอก

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Ekechukwu and Norton, 1999; Sharma et al., 2009; Sopian et al., 2009) ปัจจุบันใช้งาน 3 ลักษณะ คือ

1. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแอคทีฟ (active solar energy drying systems) คือระบบอบแห้งที่มีเครื่องช่วยให้อากาศไหลเวียนในทิศทางที่ต้องการ เช่นติดตั้งพัดลมในระบบเพื่อบังคับให้มีการไหลของอากาศผ่านระบบ พัดลมจะดูดหรือผลักอากาศเข้าสู่เครื่องอบอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอบจะได้รับความร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ เมื่ออากาศได้รับความร้อนจะถูกบังคับให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ซึ่งวางอยู่ในเครื่องอบ อากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์แล้วจะถูกระบายออกจากห้องอบดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข้อดีของระบบนี้ คืออากาศจะมีอุณหภูมิสูงช่วยให้การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความชื้นมีค่าสูง แต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มสำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนพัดลม

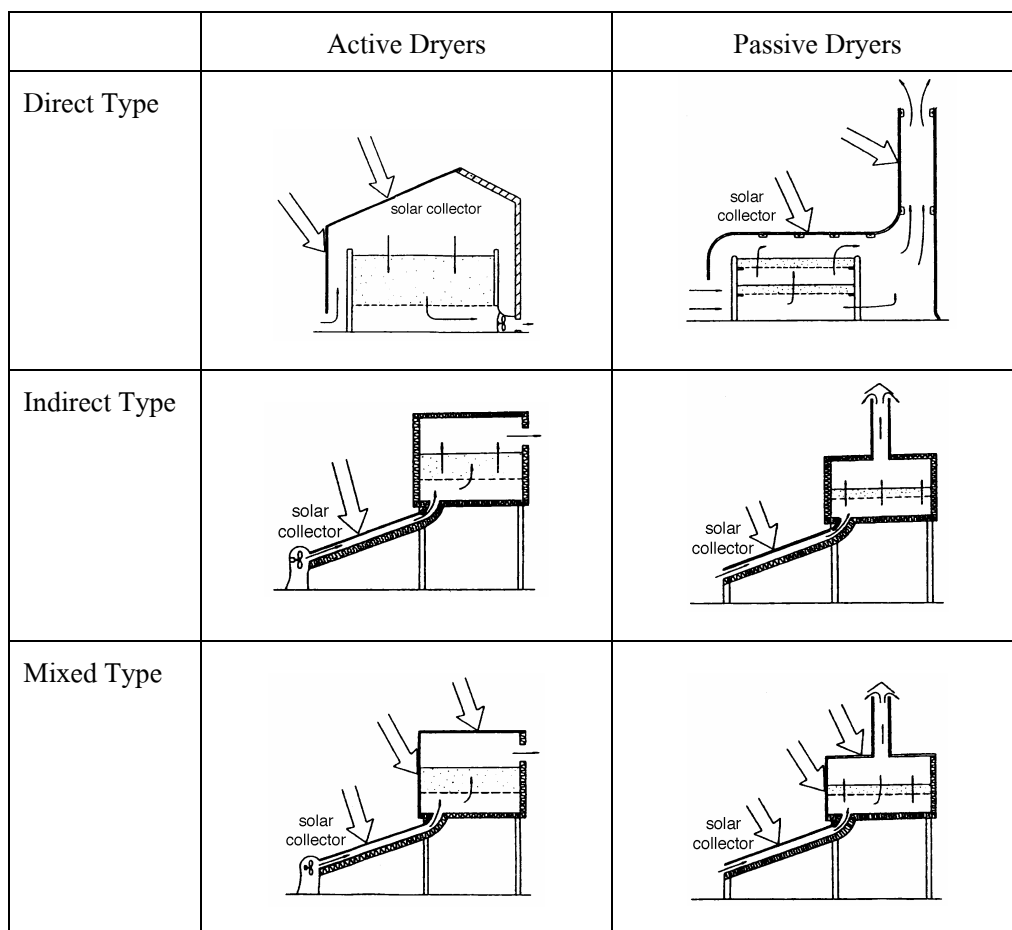
2. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาสซีฟ (passive solar energy drying systems) คือระบบอบแห้งที่อาศัยหลักการขยายตัวของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งและกระแสลม ทำให้เกิดการหมุนเวียน เพื่อช่วยถ่ายเทความชื้นดังแสดงในรูปที่ 2.2 ข้อดีของระบบนี้ คือไม่สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า แต่การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความชื้นจะต่ำกว่าชนิดแอคทีฟ

3. ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไฮบริด (hybrid solar energy drying systems) คือระบบอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และยังต้องอาศัยพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ช่วยในเวลาที่มีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอหรือต้องการให้ผลผลิตทางการเกษตรแห้งเร็วขึ้น เช่น ใช้ร่วมกับพลังงานเชื้อเพลิงจากชีวมวล พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแยกย่อยได้อีก 3 แบบตามลักษณะการออกแบบของระบบ ดังนี้

- แบบรับความร้อนโดยตรง (direct type) ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะตกกระทบโดยตรงบนผลิตภัณฑ์ ซึ่งวางอยู่ในเครื่องอบ

- แบบรับความร้อนโดยอ้อม (Indirect type) ความร้อนจะไม่ตกกระทบบนผลิตภัณฑ์ แต่จะตกกระทบบนชุดรับความร้อนจากนั้นอากาศร้อนจะไหลผ่านผลิตภัณฑ์ในตู้อบ
- แบบผสม (Mixed type) เป็นการผสมกันของแบบความร้อนโดยตรงและโดยอ้อม



รูปที่ 2.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ

ที่มา: Ekechukwu and Norton (1999)

2.4 ระบบกักเก็บความร้อน

ระบบกักเก็บความร้อนทำหน้าที่ในการเก็บกักความร้อนไว้ในระหว่างที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงและถ่ายโอนความร้อนที่เก็บกักไว้ออกมาในช่วงที่ไม่มีมีการเผาไหม้ พลังงานจะสะสมในรูปความร้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสะสมพลังงานในวัสดุ ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละครั้งจ่าย

ความร้อนที่มีปริมาณไม่สูงและง่ายได้นานขึ้น ซึ่งช่วยลดภาระงานการเติมไม้ฟืนในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นไม้ฟืน

การกักเก็บความร้อน (Heat energy storage) เป็นการเก็บรักษาพลังงานความร้อนไว้ในสารตัวกลาง เพื่อการรับและถ่ายโอนความร้อน โดยที่พลังงานความร้อนที่ถูกเก็บมีการสูญเสียเนื่องจากการพาความร้อน หรือการขาดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ ทำให้พลังงานรวมที่คายออกมาภายหลังมีค่าน้อยกว่าพลังงานที่สะสมรวม รูปแบบของการเก็บสะสมพลังงานความร้อนอาจอยู่ในรูปของการสะสมความร้อนด้วยความร้อนแฝง (latent heat storage system) หรือความร้อนสัมผัส (sensible heat storage system)

การกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนแฝง พลังงานจำนวนหนึ่งจะถูกกักเก็บในวัสดุสะสมความร้อน แล้วทำให้วัสดุนั้นเปลี่ยนสถานะภายใต้อุณหภูมิคงที่ การปลดปล่อยพลังงานทำได้โดยการย้อนกลับกระบวนการ ซึ่งปริมาณความร้อนแฝงหาได้จาก

$$Q_L = mL \quad (3)$$

โดยที่ Q_L คือ ปริมาณความร้อนแฝง (kJ) m คือ มวลของวัสดุสะสมความร้อน (kg) และ L คือ ความร้อนแฝงจำเพาะ (kJ/kg)

การกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส เป็นระบบเก็บสะสมพลังงานแบบอุณหภูมิ โดยระบบสามารถทำงานได้ที่หลายระดับอุณหภูมิขึ้นกับการเลือกระบบและวัสดุสะสมความร้อน เป็นวิธีที่ใช้มากในระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ของแข็งเช่น หิน เป็นวัสดุกักเก็บความร้อน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 150°C และน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C โดยสร้างเป็นแพคเกจ (packed bed) ซึ่งยอมให้อากาศไหลผ่านได้สะดวก ปริมาณความร้อนสัมผัสหาได้จาก

$$Q_S = mc_p \Delta T \quad (4)$$

โดยที่ Q_S คือ ปริมาณความร้อนสัมผัส (kJ) m คือ มวลของวัสดุสะสมความร้อน (kg) c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$) และ T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

ความสามารถในการกักเก็บความร้อน ขึ้นอยู่กับความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้เป็นตัวกักเก็บความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของวัสดุ (coefficient of thermal expansion) และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุ ในการเลือกใช้วัสดุจะพิจารณาจาก

ต้นทุนที่ต่ำ วัสดุหาได้ง่าย สะดวกในการใช้งานและมีความสามารถในการกักเก็บความร้อนต่อหน่วยปริมาตรสูง

2.5 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

2.5.1 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลสามารถหาได้จากสัดส่วนของพลังงานที่ใช้อบแห้งต่อพลังงานที่ป้อนเข้าระบบ ซึ่งพลังงานที่ป้อนเข้าระบบประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล และพลังงานไฟฟ้า สามารถหาได้จาก

$$\eta_{dryer} = \frac{m_L L}{IA + m_{wood} (HV)_{wood} + E_e} \quad (5)$$

โดยที่ η_{dryer} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องอบแห้ง m_L คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg) L คือ ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg) I คือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m²) A คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ m_{wood} คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg) $(HV)_{wood}$ คือ ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg) และ E_e คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

2.5.2 ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถหาได้จาก

$$\eta_{solar} = \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA} \quad (6)$$

โดยที่ η_{solar} คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ m_a คือ ปริมาณอากาศที่เข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (kg) c_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg°C) I คือ ปริมาณรังสี

แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m^2) A คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ T_2 คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$) และ T_1 คือ อุณหภูมิอากาศที่เข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.3 ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณหาประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล (เตาเผา, อุปกรณ์เก็บกักความร้อน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน)สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\eta_{biomass\ system} = \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \quad (7)$$

โดยที่ $\eta_{biomass\ system}$ คือ ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนด้วยชีวมวล m_a คือ ปริมาณอากาศที่เข้าสู่ระบบแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนด้วยชีวมวล (kg) c_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$) m_{wood} คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg) $(HV)_{wood}$ คือ ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg) T_2 คือ อุณหภูมิอากาศที่เข้าอุปกรณ์เก็บกักความร้อน ($^{\circ}\text{C}$) และ T_4 คือ อุณหภูมิอากาศที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

2.5.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เป็นตัวบอกประสิทธิภาพของการผลิต โดยเปรียบเทียบพลังงานที่ป้อนเข้าระบบเทียบกับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์คำนวณได้จาก

$$SEC = \frac{IA + m_{wood} (HV)_{wood} + E_e}{m_L} \quad (8)$$

โดยที่ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ $\text{kJ/kg}_{\text{water removed}}$ I คือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m^2) A คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ m^2 m_{wood} คือ ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg) $(HV)_{wood}$ คือ ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg) E_e คือ ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ) และ m_L คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ ($\text{kg}_{\text{water removed}}$)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล สำหรับการอบแห้งกล้วยเล็บมือนาง มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

เลือกทดสอบตู้อบแห้งของผู้ประกอบการ เพื่อใช้ทดสอบหาประสิทธิภาพของตู้อบแห้งที่ใช้กันอยู่

ขั้นตอนที่ 2

ทดลองหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนางแบบสดิต รวมทั้งศึกษาความชื้นฐานแห้งของผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด

ขั้นตอนที่ 3

สร้างแบบจำลองห้องอบแห้ง และศึกษาการเคลื่อนที่ของลมร้อนด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT

ขั้นตอนที่ 4

ศึกษาระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat) เพื่อลดภาระการใส่ไม้ฟืน เลือกใช้น้ำและอิฐเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส และพาราฟินเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนแฝง โดยจำลองระบบกักเก็บความร้อนในห้องปฏิบัติการ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยปริมาณความร้อนถ่ายโอนภายในระบบกักเก็บความร้อน อัตราการไหลของน้ำ อุณหภูมิทางเข้าและออก ทั้งในกรณีป้อนความร้อนเข้าและดึงความร้อนออก และอุณหภูมิสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อน

ขั้นตอนที่ 5

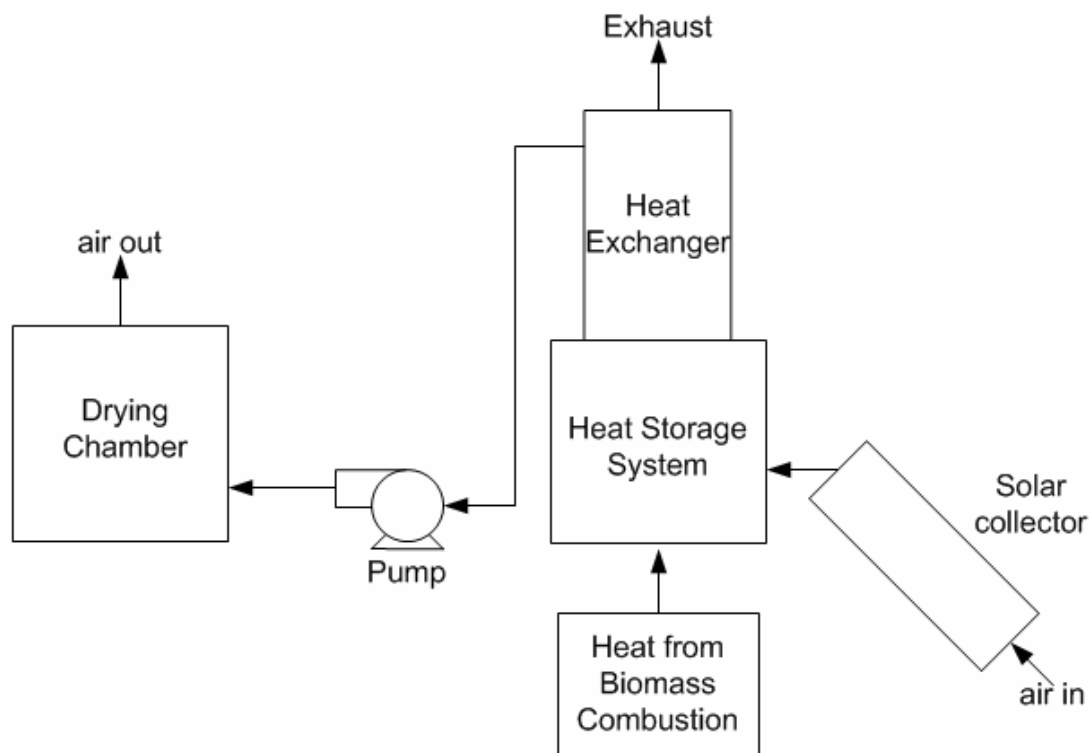
นำข้อมูลจากขั้นตอนที่ 1 – 4 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลในการอบแห้งกล้วยเล็บมือนาง โดยมีองค์ประกอบดังรูปที่ 3.1

ขั้นตอนที่ 6

ทดลอง วิเคราะห์ และเก็บข้อมูล เพื่อศึกษาคูณลักษณะการแห้งตัวของกล้วยเล็บมือนาง

ขั้นตอนที่ 7

สรุปผลและเขียนรายงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังชุดการทดลอง

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องวัดความเร็วลม (anemometer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 405 – V1 0560,4051 วัดความเร็วลมได้สูงสุด 5 m/s ความละเอียด 0.01 m/s
2. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 51/52II วัดอุณหภูมิได้สูงสุด 700 องศาเซลเซียส ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก (balance) ยี่ห้อ SHIMADZU TYPE ELB 3000 ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 3 กิโลกรัม ความละเอียด 0.01 กรัม
4. เครื่องวัดความชื้น ยี่ห้อ FLUKE ใช้วัดความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงสุด 100 RH % ความละเอียด 0.1 RH %

5. ตู้อบไฟฟ้า

6. สารละลายเกลือ LiCl ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 11.5% สารละลายเกลือ LiCl ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 11.3% สารละลายเกลือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 31.5% สารละลายเกลือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 30.8% สารละลายเกลือ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 47% สารละลายเกลือ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 44.4% สารละลายเกลือ NaCl ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 74.7% สารละลายเกลือ NaCl ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 73.9% สารละลายเกลือ KNO_3 ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 84.9% สารละลายเกลือ KNO_3 ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 81.1%

7. ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 51/52II หัววัด thermometer type K วัดอุณหภูมิได้สูงสุด 700 องศาเซลเซียส

8. เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (pyranometer) ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM3

9. ชุดทดลองระบบกักเก็บความร้อน

10. เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Wisco รุ่น DL2200

3.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการ

เลือกเยี่ยมชมสถานประกอบการ เพื่อศึกษากรรมวิธีผลิตกล้วยเล็บมือนางในปัจจุบันของผู้ประกอบการ

3.3.1 การเยี่ยมชมสถานประกอบการกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง

เดินทางเยี่ยมชมสถานประกอบการกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง ในจังหวัดชุมพร และ นครศรีธรรมราช ระหว่างวันที่ 21-22 กุมภาพันธ์ 2553 ซึ่งมีสถานประกอบการดังต่อไปนี้

3.3.1.1 กลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง

สถานที่ตั้ง : 13 หมู่ 3 ตำบลแหลมทราย อำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร

กลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงบ่มกล้วยกล้วยดิบจนกล้วยเหลืองเริ่มนุ่มจึงนำไปอบ โดยซื้อกล้วยกิโลกรัมละ 4 บาท เมื่ออบจนแห้งแล้วขายกิโลกรัมละ 90 บาท กลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงใช้เครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้มดังรูปที่ 3.2 กลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงมีจำนวน 7 เครื่อง อบวันละ 3 เครื่อง ซึ่งอบกล้วยประมาณวันละ 600-700 kg โดยที่เครื่องอบแห้ง 1 เครื่อง มีทั้งหมด 20 ถาดอบกล้วยได้ประมาณ 250 kg ซึ่งใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถังประมาณ 15 kg ราคาถังละ 300 บาท อบกล้วยด้วยอุณหภูมิ 50°C ใช้เวลาอบ 48 ชั่วโมง จะได้กล้วยอบแห้งจำนวน 70 kg



รูปที่ 3.2 เครื่องอบกล้วยเล็บมือนางของกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง

กลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงมีกำลังผลิตสูงซึ่งมีตู้อบแห้ง 7 ตู้ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบสะอาดและปลอดภัย เขตพื้นที่ที่ตั้งของกลุ่มหาไม้ยากจึงไม่เหมาะสำหรับเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากไม้ฟืน แต่กลุ่มมีกำลังการผลิตผลิตภัณฑ์สูงซึ่งอบกล้วยเล็บมือนางประมาณ

600 kg/day จะมีขยะจากเปลือกกล้วยเหลือประมาณ 200 kg/day ซึ่งน่าจะนำไปผลิตเป็นก๊าซชีววมวล เพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอบกล้วยเล็บมือนางต่อไป

3.3.1.2 วิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี

สถานที่ตั้ง : 40/2 หมู่ 2 ตำบลบ้านเกาะ อำเภอพรหมคีรี จังหวัดนครศรีธรรมราช

เครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้มดังรูปที่ 3.3 และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.4 ถูกร้อนอบกล้วยเล็บมือนางด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงกลางวัน แล้วย้ายไปในตู้อบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้มในช่วงกลางคืน และฤดูฝนจะอบกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้มใช้แก๊สหุงต้ม 2 ถัง ประมาณ 30 kg โดยอบกล้วยครั้งละประมาณ 30 kg อุณหภูมิ 50°C ใช้เวลาอบ 6-7 วัน ได้กล้วยเล็บมือนางอบแห้งประมาณ 10 kg



รูปที่ 3.3 เครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้มของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี



รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี

วิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรีใช้กล้วยเล็บมือนางอบต่างจากกล้วยเล็บมือนางจากชุมพรคือ กล้วยเล็บมือนางจากนครศรีธรรมราชผิวของเปลือกกล้วยจะมีลักษณะเป็นขน ไม่ลื่นเหมือนกล้วยเล็บมือนางจากจังหวัดชุมพร ซึ่งชาวบ้านเรียก “กล้วยกินดิบ” พื้นที่ตั้งของกลุ่มมีผลผลิตกล้วยเล็บมือนางน้อยจึงอบกล้วยเล็บมือนางแบบพอเพียง อบกล้วยแต่ละครั้งไม่มากซึ่งอบครั้งละประมาณ 30 kg ใช้เวลาอบแห้งนานถึง 7 วัน ใช้ปริมาณเชื้อเพลิงคือแก๊สหุงต้ม 2 ถัง/ครั้ง ซึ่งใช้เชื้อเพลิงเป็นจำนวนมาก แต่ได้ผลผลิตน้อยคือเมื่ออบจนแห้งแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์กล้วยเล็บมือนางอบแห้งประมาณ 10 kg เครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้ม ไม่มีช่องระบายความชื้นและอากาศเข้า ผนังของตู้อบไม่มีฉนวนกันความร้อนจึงใช้เชื้อเพลิงสูงและระยะเวลาอบแห้งนานซึ่งใช้ต้นทุนในกระบวนการอบแห้งสูง ส่วนเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีช่องอากาศเข้า แต่ไม่มีช่องระบายความชื้นออกจึงใช้เวลาในการอบแห้งนาน ซึ่งเห็นได้ว่าเครื่องอบแห้งทั้งสองเครื่องขาดความรู้ด้านวิศวกรรมจึงใช้พลังงานสูง ซึ่งควรปรับปรุงเครื่องอบ โดยอาศัยความรู้ด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้ เช่น ควรเพิ่มฉนวนกันความร้อนที่ผนัง สร้างช่องอากาศเข้า ช่องระบายความชื้นออกสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานจากแก๊สหุงต้ม และสร้างช่องระบายความชื้นออก ทาสีดำภายในเครื่องอบสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชมีทรัพยากรป่าไม้มากจึงเหมาะสำหรับนำมาเป็นพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อลดปริมาณต้นทุนจากแก๊สหุงต้ม

3.3.2 ทดสอบเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการ

การทดสอบตู้อบแห้งของผู้ประกอบการกลุ่มกล้วยอบเล็บบ่มือนางท่ามะปริง และ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี โดยเตรียมเครื่องมือสำหรับทดลอง ประกอบด้วย เครื่องมือวัดความเร็วลม เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ และเครื่องชั่งน้ำหนัก จะเตรียมกล้วยเล็บบ่มือนาง ปอกเปลือก ลอกเส้นใยออก โดยกลุ่มอบเล็บบ่มือนางท่ามะปริงจะเตรียมกล้วยจำนวน 245.5 กิโลกรัม จัดเรียงในตู้อบ ภาชนะประมาณ 12 กิโลกรัม จำนวน 20 ภาชนะ น้ำหนักกล้วยเล็บบ่มือนางตัวอย่าง ทุก 2 ชั่วโมง วัดความชื้นสัมพัทธ์ก่อนเข้าตู้อบและบริเวณช่องระบายความชื้นทุก 2 ชั่วโมง วัดค่าอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าตู้อบ ค่าอุณหภูมิของอากาศภายในตู้อบ และค่าอุณหภูมิของอากาศที่ช่องระบายความชื้น ทุก 2 ชั่วโมงวัดความเร็วลมที่ทางออกช่องระบายความชื้น ทุก 2 ชั่วโมง วัดอัตราการไหลของแก๊สหุงต้มโดยการชั่งน้ำหนัก จากนั้นชั่งน้ำหนักกล้วยเล็บบ่มือนางทั้งหมดและนำกล้วยเล็บบ่มือนางตัวอย่างไปอบด้วยเตาไฟฟ้าจนแห้งเพื่อใช้คำนวณหาค่าความชื้น เนื่องจากผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี มีกล้วยเล็บบ่มือนางในพื้นที่น้อย จึงเตรียมกล้วยจำนวน 5.05 กิโลกรัม ปอกเปลือก ลอกเส้นใยออก จัดเรียงในตู้อบ จำนวน 1 ภาชนะและเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี เป็นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่มีช่องระบายอากาศ จึงไม่ได้วัดความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์บริเวณช่องระบายอากาศ จึงวัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบแห้ง และบันทึกความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ทุกนาที ซึ่งผลการทดลองแสดงดังข้อที่ 4.1 ของบทที่ 4

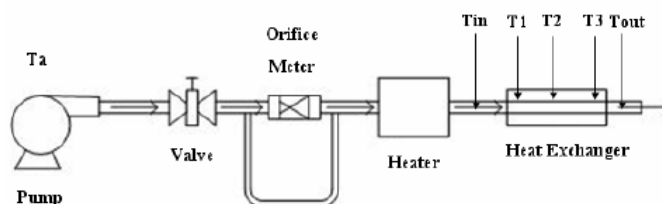
3.4 การทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บบ่มือนางแบบสดิต

การหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บบ่มือนางที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ในห้องปฏิบัติการเตรียมปอกเปลือกกล้วยเล็บบ่มือนาง แล้วหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำกล้วยเล็บบ่มือนางใส่ในขวดโหลที่มี สารละลายเกลือ LiCl, NaCl, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, KNO_3 โดยกล้วยเล็บบ่มือนางไม่แตะสัมผัสเกลือจำนวน 2 ชุด นำขวดโหลอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ซึ่งสารละลายเกลือชนิดต่างๆ สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในขวดโหลดังนี้ สารละลายเกลือ LiCl ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 11.5% สารละลายเกลือ LiCl ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 11.3% สารละลายเกลือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 50°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 31.5% สารละลายเกลือ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ 60°C มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 30.8%

สารละลายเกลือ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 47% สารละลายเกลือ $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 44.4% สารละลายเกลือ $NaCl$ ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 74.7% สารละลายเกลือ $NaCl$ ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 73.9% สารละลายเกลือ KNO_3 ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 84.9% สารละลายเกลือ KNO_3 ที่อุณหภูมิ $60^\circ C$ มีความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 81.1% ซึ่งน้ำหนักกล้วยเล็บมือนางจมน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำกล้วยเล็บมือนางแต่ละขวดโหลบให้แห้งสนิทที่อุณหภูมิ $103^\circ C$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นสมดุล

3.5 การทดลองเพื่อเลือกสารตัวกลางสำหรับกักเก็บความร้อน

จำลองระบบกักเก็บความร้อนในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat) โดยเลือกใช้น้ำและอิฐเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส และพาราฟินเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนแฝง ซึ่งมีขั้นตอนเตรียมการในแต่ละครั้งที่ทดลองเหมือนกันคือเตรียมเครื่องมือวัดต่าง ๆ ประกอบด้วย Data logger สารเก็บกักความร้อน พร้อมปรับอัตราการไหลโดยชุดออริฟิซ (orifice) ที่อัตราการไหลประมาณ 0.001992 kg/s บรรจุมารกักเก็บความร้อนในชุดกระบอกลูกกักความร้อน โดยเลือกใช้น้ำ อิฐ และพาราฟินตามลำดับ วัดค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิทางเข้า อุณหภูมิทางออก อุณหภูมิในสารกักเก็บความร้อน ดังรูปที่ 3.5 โดยบันทึกข้อมูลด้วย Data logger เตรียมสารกักเก็บความร้อนโดยบรรจุมารเต็มกระบอกลูกกักเก็บความร้อน ทดลองในกรณีป้อนความร้อนซึ่งใช้อากาศเป็นสื่อพาความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารกักเก็บความร้อน โดยทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 70, 80 และ $90^\circ C$ สำหรับน้ำและอิฐ ส่วนพาราฟินทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า $90^\circ C$ สำหรับกรณีดึงความร้อน ซึ่งป้อนความร้อนสารกักเก็บความร้อนให้มีอุณหภูมิ $70^\circ C$ จากนั้นดึงความร้อนสารกักเก็บความร้อนด้วยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ทั้งน้ำ อิฐ และพาราฟิน



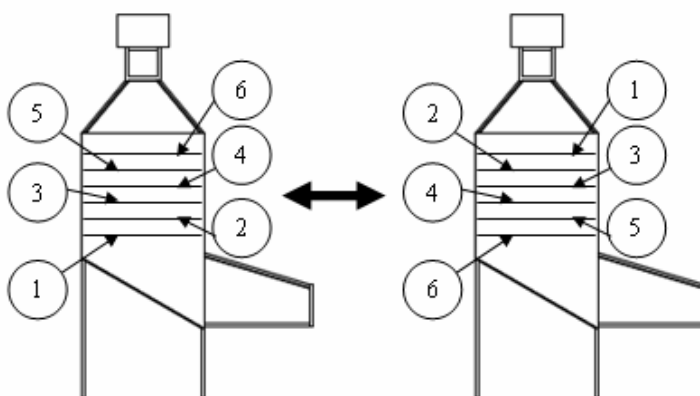
รูปที่ 3.5 ชุดทดลองระบบกักเก็บความร้อน

3.6 จำลองห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ

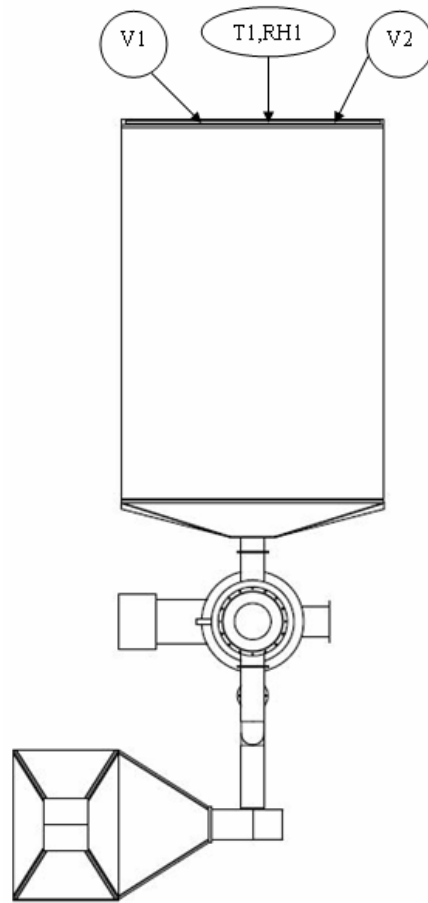
แบบจำลองห้องอบแห้ง สร้างด้วยโปรแกรม GAMBIT โดยแบบจำลองสร้างเป็น 2 มิติ ซึ่งจะแบ่งห้องอบแห้งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกกว้าง 0.7 เมตร สูง 0.7 เป็นส่วนที่วางกล้วยเล็บมือนาง โดยจำลองกล้วยเล็บมือนางวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm โดยแต่ละลูกห่างกัน 1 cm จำนวน 6 ชั้น แต่ละชั้นห่างกัน 10 cm ส่วนที่ 2 คือส่วนทางลมเข้าส่วนนี้จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ความยาวด้านคู่ขนานเท่ากับ 0.2 เมตร 0.4 เมตร และสูง 0.6 เมตร ทั้ง 2 ส่วนจะควบคุมให้คงที่ ส่วนที่ 3 คือส่วนพื้นเอียงก่อนจะถึงชั้นวางกล้วยเล็บมือนาง ซึ่งส่วนนี้ กว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.7 เมตร ซึ่งจะปรับรูปแบบพื้นเอียงให้เหมาะสม แบบจำลองมีกริด 13,448 หน่วย ใช้ Scheme Element แบบ Quad บริเวณชั้นวางกล้วย ใช้ Scheme Type แบบ Pave ส่วนทางลมเข้าใช้ Scheme Type แบบ Map สำหรับบริเวณพื้นเอียงใช้ Scheme Type แบบ Tri Primitive ซึ่งทั้ง 3 วิธี คือการสร้างกริดด้วยรูปสี่เหลี่ยม การจำลองการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งภายใต้สมมติฐาน การไหลของอากาศคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาซึ่งคุณสมบัติและตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็วลม หรือความดัน จุดใด ๆ ของการไหลมีค่าคงที่ตลอดเวลา อากาศไม่สามารถอัดตัวได้ การไหลของอากาศเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากบริเวณทางเข้าตัวเลขเรย์โนลด์ เท่ากับ 35,864 ซึ่งมากกว่า 10,000 เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้เป็นแบบ standard $k - \epsilon$ Model ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน การคำนวณเป็นที่น่าพอใจ ใช้เวลาคำนวณไม่นาน การแก้ระบบสมการแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Link Equation) เป็นวิธีการแก้ระบบสมการหลายสมการไปพร้อมกัน คือ สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม สมการพลังงาน การคำนวณจะเริ่มจากการสมมุติค่าความเร็วและความดันแล้วแก้ตามปกติเมื่อได้คำตอบจะเปรียบเทียบกับค่าจากการสมมุติแล้วปรับแก้จนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะกำหนดการลู่ออกของคำตอบให้มีค่าเท่ากับ 1×10^{-3} และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง ทางเข้าเป็น Velocity inlet มีความเร็วเท่ากับ 3.4 m/s และอุณหภูมิเท่ากับ 333 K ทางออกกำหนด Pressure outlet ที่ความดันบรรยากาศ heat flux ของผนังห้องอบแห้ง เท่ากับ 20.26 W/m^2 ผนังหนา 0.026 m ส่วนพื้นผิวกล้วยกำหนดเป็น Wall ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะศึกษาการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งให้สมำเสมอ

3.7 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

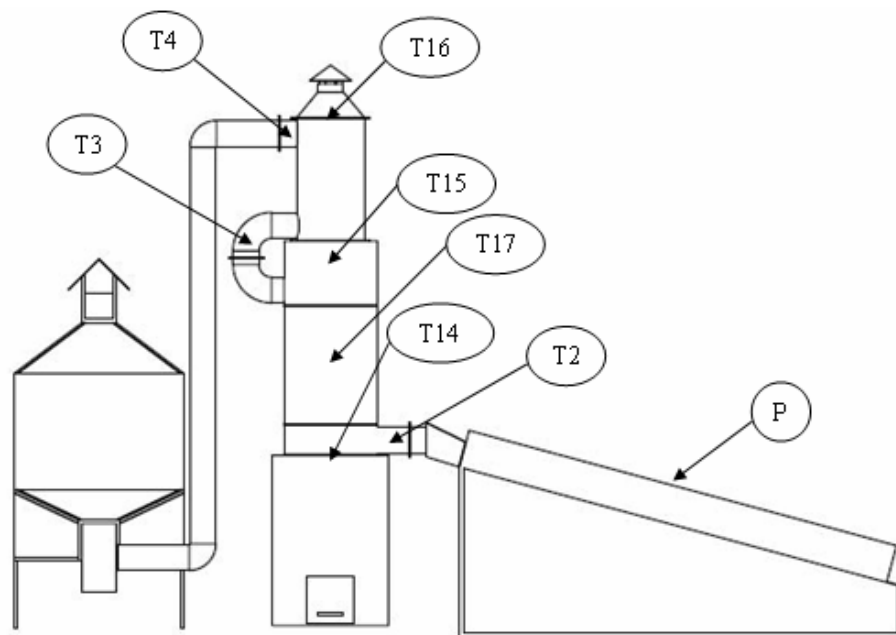
การอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล มีขั้นตอนเตรียมการในแต่ละครั้งที่ทดลองเหมือนคือ บ่มกล้วยเล็บมือนาง 4 วัน 4 คืน จนกล้วยเล็บมือนางสุกหอม เตรียมเครื่องวัดต่าง ๆ ประกอบด้วย เครื่องมือวัดความเร็วลม เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ และเครื่องชั่งน้ำหนัก เตรียมไม้พิน ก่อเตาไฟ เตรียมกล้วยเล็บมือนางปอกเปลือก จำนวน 30 กิโลกรัม นำกล้วยเล็บมือนางจัดเรียงในห้องอบแห้งชั้นละประมาณ 5 กิโลกรัม จำนวน 6 ชั้นดังรูปที่ 3.6 (ก) และสลับถาดตามชั้นวางกล้วยดังรูปที่ 3.6 (ข) กรณีอบแห้งกล้วยเล็บมือนาง 60 kg จัดเรียงในห้องอบแห้ง ชั้นละประมาณ 10 กิโลกรัม ชั่งน้ำหนักกล้วยเล็บมือนางตัวอย่างที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งชั่งทุก 2 ชั่วโมง วัดค่าอุณหภูมิลมร้อน อุณหภูมิก๊าซร้อน ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์ โดยบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้ โดยวัดความชื้นสัมพัทธ์ก่อนเข้าสู่อบและบริเวณช่องระบายความชื้นดังรูปที่ 3.7 ทุก 2 ชั่วโมง วัดค่าอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิก่อนเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง อุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้ง และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้งดังรูปที่ 3.7 ทุก ๆ นาที วัดค่าอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 3.7 ทุก ๆ นาที วัดความเร็วลมก่อนเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.7 ทุก 2 ชั่วโมง วัดความเข้มแสงอาทิตย์ ทุกนาที ชั่งน้ำหนักกล้วยเล็บมือนางทั้งหมดและนำกล้วยเล็บมือนางตัวอย่างไปอบด้วยเตาไฟฟ้าจนแห้งเพื่อใช้คำนวณหาค่าความชื้น



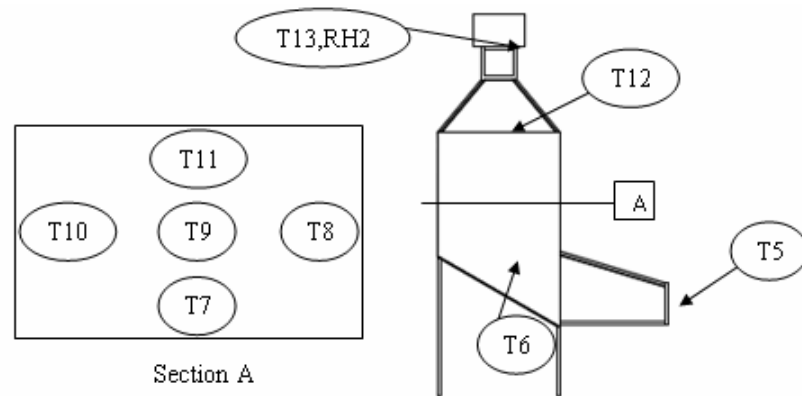
(ก) ตำแหน่งชั้นวางกล้วยก่อนสลับถาด (ข) ตำแหน่งชั้นวางกล้วยหลังสลับถาด
รูปที่ 3.6 แสดงตำแหน่งชั้นวางกล้วยเล็บมือนาง



(ก) แสดงตำแหน่งจุดวัดก่อนเข้าระบบบอบแห้ง



(ข) แสดงตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิภายในระบบบอบแห้ง



(ค) แสดงตำแหน่งจุดวัดภายในห้องอบแห้ง

รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งวัดอุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์

บทที่ 4

คุณลักษณะการแห้งตัวของกล้วยและการออกแบบเครื่องอบแห้ง

บทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการ ผลการทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนางแบบสดดิบ ผลการทดลองเพื่อเลือกสารตัวกลางสำหรับเก็บกักความร้อน ผลการจำลองห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้ง และกล่าวถึงหลักการทำงานของเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

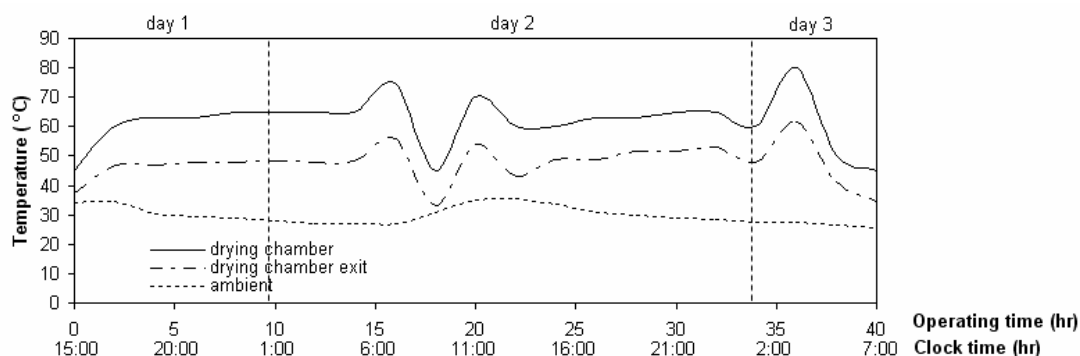
การออกแบบห้องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล จะนำผลการทดลองซึ่งประกอบด้วย ผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการ ผลการทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนางแบบสดดิบ ผลการทดลองเพื่อเลือกสารตัวกลางสำหรับเก็บกักความร้อน ผลการจำลองห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT สำหรับเลือกรูปแบบการสร้างเครื่องอบแห้ง

4.1 การอบแห้งกล้วยเล็บมือนางในปัจจุบัน

4.1.1 กลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง

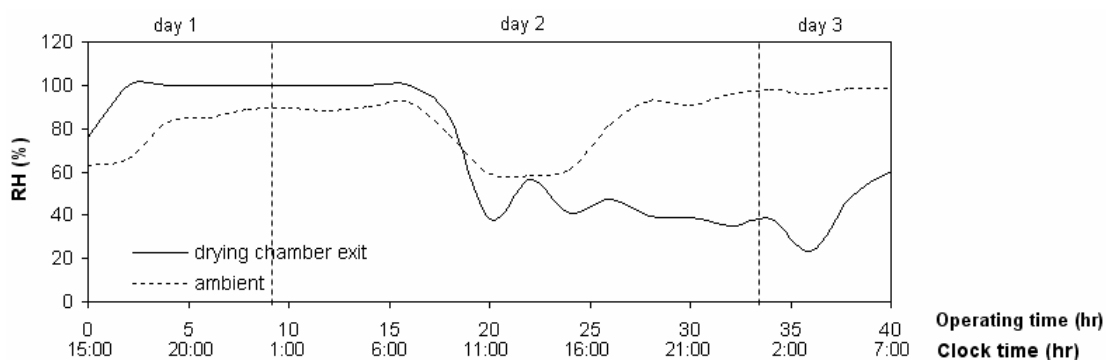
การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้ก๊าซหุงต้ม ทดลองวันที่ 31 มีนาคม 2553 ถึง 2 เมษายน 2553 ใช้ก๊าซหุงต้ม 16.6 kg เวลาอบแห้ง 40 ชั่วโมง โดยป้อนอุณหภูมิเข้าสู่อบแห้ง 60°C ในช่วง 2 ชั่วโมงแรกดังรูปที่ 4.1 อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งค่อย ๆ ขึ้นอย่างช้า เนื่องจากต้องป้อนความร้อนให้กล้วยจำนวน 245.5 กิโลกรัมในห้องอบแห้ง ให้ค่อย ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อรักษาความชุ่มชื้นที่ผิวของกล้วยเล็บมือนาง จากนั้นอบด้วยอุณหภูมิ 60°C ในชั่วโมงที่ 16 จะป้อนความร้อน 70°C ประมาณครึ่งชั่วโมง ภายได้ความชื้นสัมพัทธ์ 100 % เพื่อให้กล้วยสุก หลังจากนั้นปล่อยให้กล้วยเย็นสักครู่ แล้วจัดเรียงกล้วยพร้อมตัดตกแต่งกล้วยให้มีขนาดใกล้เคียงกัน ช่วงเวลาพลิกกล้วยได้เปิดประตูระบายความชื้นของอากาศภายในตู้อบแห้งเพื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ ดังรูปที่ 4.2 เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจะป้อนอุณหภูมิ 70°C เพื่อเร่งให้กล้วยมีอุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 60°C ในชั่วโมงที่ 36 จะป้อนอุณหภูมิ 70°C จากนั้นหยุดการป้อนเชื้อเพลิง อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งมี

ค่าเท่ากับ 61.5°C อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 29.9°C อุณหภูมิช่องระบายความชื้นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 47.5°C อุณหภูมิช่องระบายความชื้นมีแนวโน้มตามอุณหภูมิภายในตู้อบดังรูปที่ 4.1



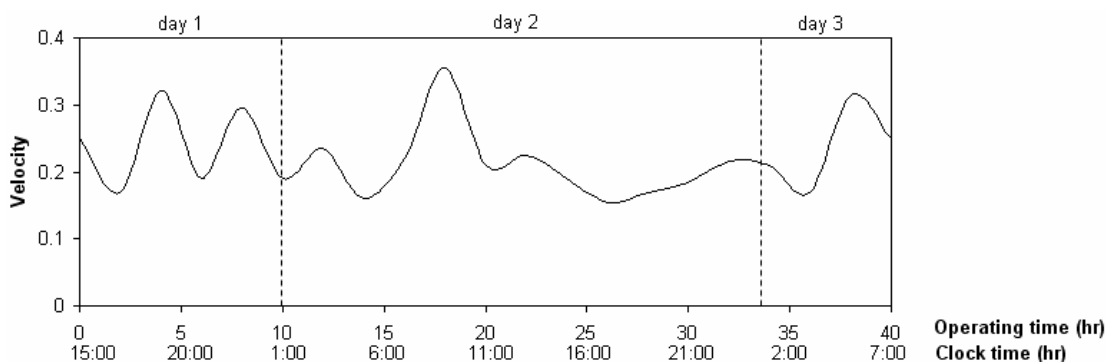
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในตู้อบ อุณหภูมิช่องระบายความชื้น และอุณหภูมิภายนอกห้องอบกับเวลา

ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณช่องระบายความชื้นในช่วงเวลาก่อนพลิกกล้วยจะมีค่าสูงเท่ากับ 100 % เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบายความชื้นน้อยเพื่อรักษาความร้อนภายในห้องอบลดการใช้พลังงาน และหลังจากพลิกกล้วยแล้วความชื้นสัมพัทธ์บริเวณช่องระบายความชื้นจะค่าน้อยกว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกดังรูปที่ 4.2



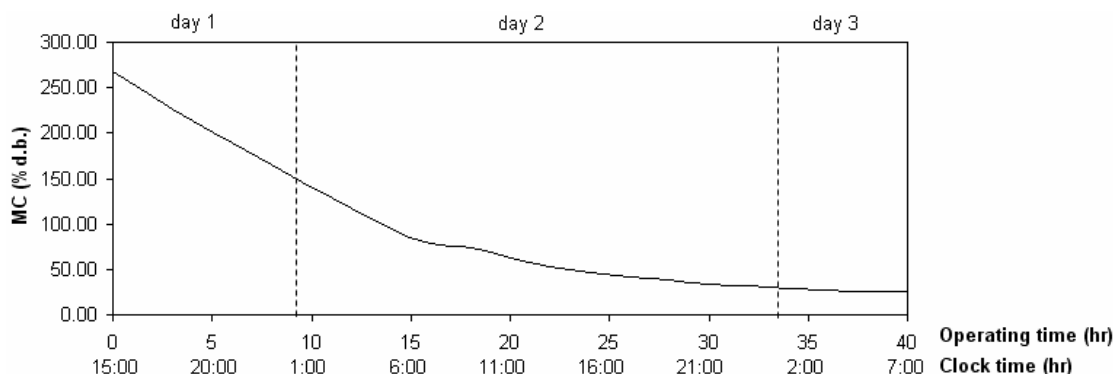
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์บริเวณช่องระบายความชื้น และความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกกับเวลา

ความเร็วลมของอากาศบริเวณช่องระบายความชื้น ณ เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.22 m/s



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา

กล้วยเล็บมือนางมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 267.4 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เมื่ออบแห้งเป็นเวลา 40 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 26.0 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้งดังรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.1 พบว่า 30 ชั่วโมงแรกเป็นระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่ โดยระยะที่ความชื้นของกล้วยลดลงแบบเส้นตรงเทียบกับเวลา แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 16 ชั่วโมงแรก ความชื้นของกล้วยลดลงแบบเส้นตรงเทียบกับเวลาในสภาวะอุณหภูมิ 60°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 100% ซึ่งน้ำที่ออกจากกล้วยจะเท่ากับความชื้นของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง จากปล่องระบายความชื้น และประตูดับเมื่อน้ำกล้วยตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก ช่วงที่ 2 คือ ระหว่างชั่วโมงที่ 16 ถึง ชั่วโมงที่ 30 ความชื้นของกล้วยลดลงแบบเส้นตรงเทียบกับเวลาในสภาวะอุณหภูมิ 60°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเท่ากับ 40% สำหรับระหว่างชั่วโมงที่ 30 ถึง ชั่วโมงที่ 40 จะเป็นช่วงระยะอัตราการระเหยของไอลดลง ซึ่งในช่วงนี้ผู้ประกอบการเพิ่มอุณหภูมิก่อนปิดการป้อนเชื้อเพลิง ปล่องให้กล้วยเย็นตัวลงพร้อมกับห้องอบรวม 4 ชั่วโมง ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง มีประสิทธิภาพเท่ากับ 42.8% ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 5.5 MJ/kg_{water removed} เครื่องอบแห้งของกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง ระบายความชื้นของอากาศในห้องอบแห้งไม่ดีทำให้ใช้เวลาอบแห้งนาน ดังนั้นจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของกล้วยกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C

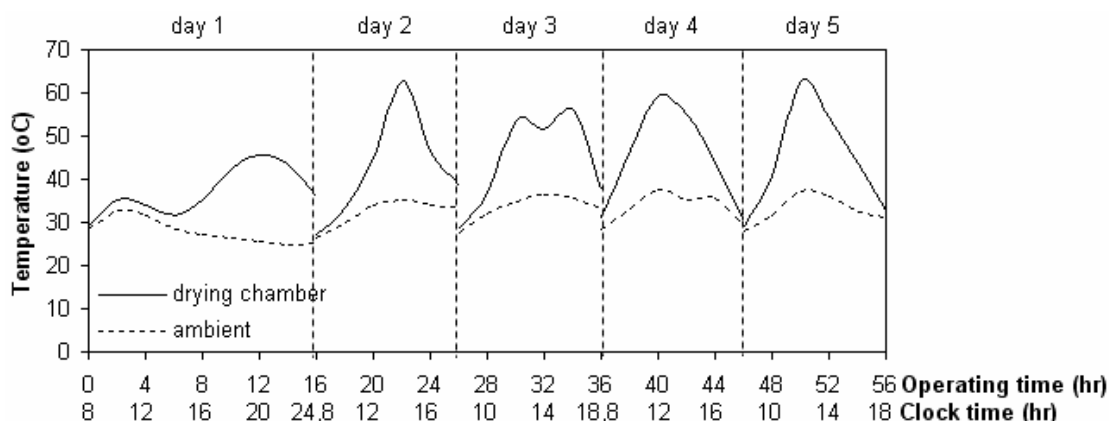


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา

จากการทดลองของผู้ประกอบการรายใหญ่ซึ่งอบกล้วยเล็บมือนางจำนวนมาก ซึ่งการอบกล้วยจำนวนมากการแห้งตัวของกล้วยจะไม่สม่ำเสมอ ผู้ประกอบการแก้ปัญหาโดยการสลับถาดและตัดคอกแต่งกล้วยให้มีขนาดใกล้เคียงกันในช่วงพลิกกล้วย และในช่วงระยะอัตราการระเหยของไอลดลงของกล้วย ผู้ประกอบการบ่มกล้วยโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ห้องอบแห้ง จากนั้นปิดเชื้อเพลิงและพัดลมปล่อยให้กล้วยแห้งตัวพร้อมกับห้องอบซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานด้วย

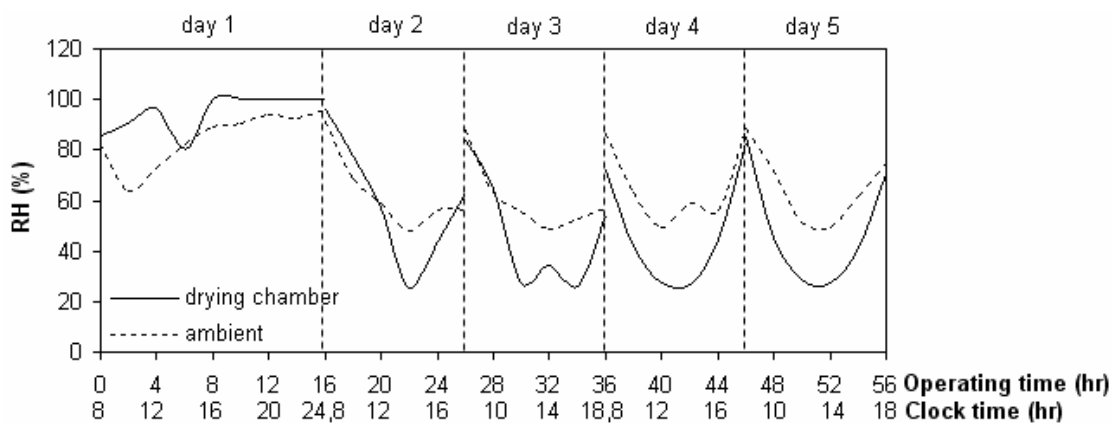
4.1.2 วิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตู้อบแห้งของผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี ทดลองวันที่ 22-26 พฤษภาคม 2553 โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ สภาพอากาศวันที่ 1 ช่วงเช้ามีเมฆมาก อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งค่อนข้างต่ำ ช่วงบ่ายและเย็นมีฝนตก จึงอบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 7 ชั่วโมง โดยนำกล้วยเข้าเครื่องอบแห้งพลังงานก๊าซหุงต้มเวลา 15.30 น. จน ถึงเวลา 24.00 น. ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งอยู่ในช่วง 40-60°C ใช้เวลาในการอบ 56 ชั่วโมง ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งนาน อุณหภูมิภายในตู้อบเฉลี่ย 42.3°C อุณหภูมิภายในตู้อบเฉลี่ยวันที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 37, 42.2, 44.1, 44.4 และ 44.0 °C ตามลำดับ อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยวันที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มีค่าเท่ากับ 27.8, 32.2, 33.4, 31.1, 32.8 °C ตามลำดับ



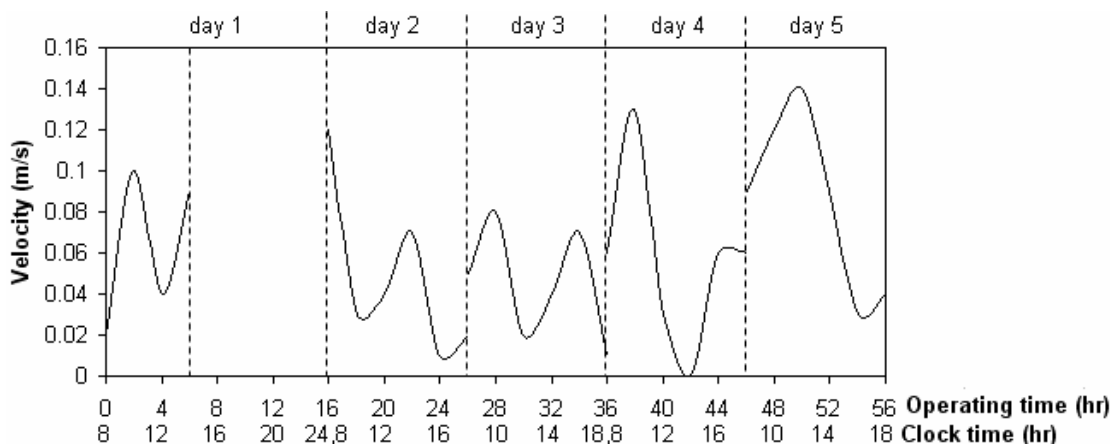
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในตู้อบ อุณหภูมิช่องระบายความชื้น และอุณหภูมิภายนอกห้องอบกับเวลา

ความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่องอบแห้ง ในวันแรกจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูง เนื่องจากกล้วยเล็บมือนางมีความชื้นสูงและวันแรกมีฝนตก วันที่ 2, 3, 4 และ 5 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าน้อยกว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกดังรูปที่ 4.6



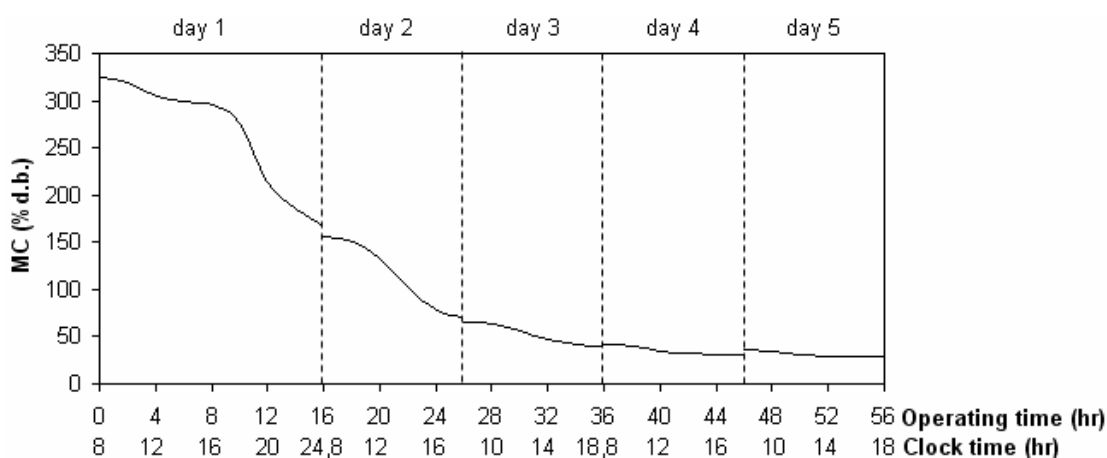
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบ และความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกกับเวลา

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของผู้ประกอบการมีช่องอากาศเข้า ไม่มีปล่องระบายความชื้น ระบายความชื้นออกด้วยระบบรั้วซึม ความเร็วลมบริเวณช่องอากาศเข้า ณ เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.06 m/s ซึ่งมีค่าน้อย



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา

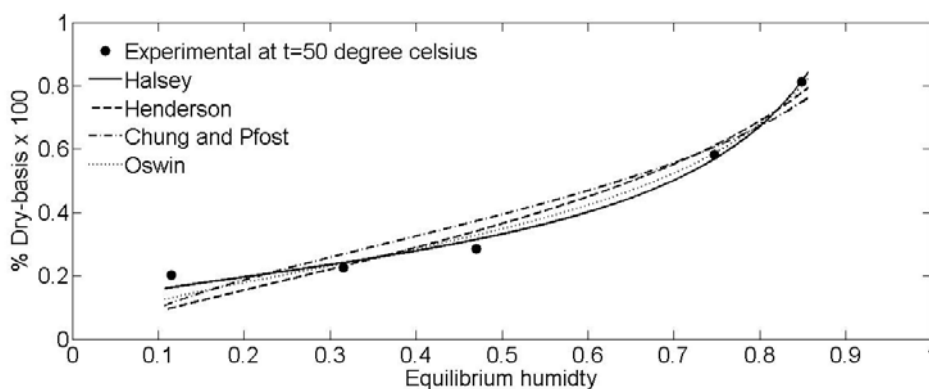
กล้วยเล็บมือนางมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 325.1 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เมื่ออบแห้งเป็นเวลา 56 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 28.8 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้งดังรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 2.1 พบว่า 40 ชั่วโมงแรกเป็นระยะอัตราการระเหยของไอน้ำคงที่ เนื่องจาก 7 ชั่วโมงแรก มีเมฆมาก อุณหภูมิในตู้อบแห้งต่ำ ทำให้อัตราการแห้งตัวช่วงนี้ต่ำ ระหว่างชั่วโมงที่ 40 ถึงชั่วโมงที่ 56 จะเป็นช่วงระยะอัตราการระเหยของไอลดลง ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี เนื่องจากทดลองอบกล้วยไม่เต็มตู้ ประสิทธิภาพซึ่งคำนวณจากการทดลองเท่ากับ 1.5% ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ $159.7 \text{ MJ/kg}_{\text{water removed}}$ เครื่องอบแห้งของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรีใช้พลังงานแสงอาทิตย์จึงใช้เวลาอบ 5 วันซึ่งนาน ดังนั้นจะศึกษาการอบกล้วยเล็บมือนางทั้งกลางวันและกลางคืน โดยช่วงเวลากลางคืนอบด้วยความร้อนจากการเผาไม้ฟืน



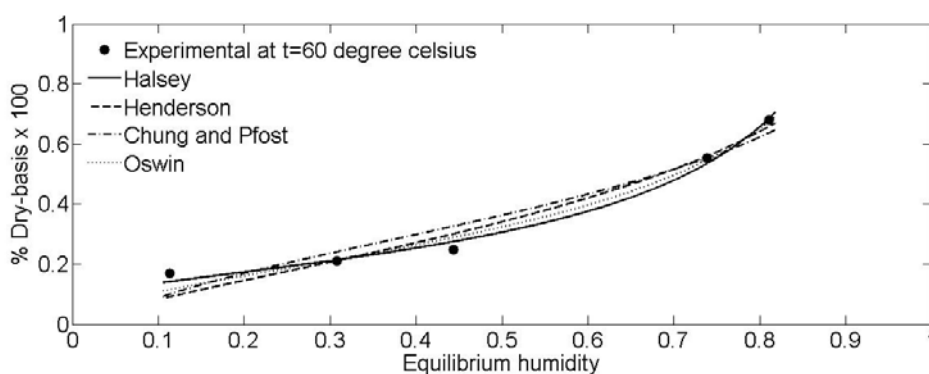
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา

4.2 ความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนาง

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลแบบสถิตของกล้วยเล็บมือนางที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10 – 90% โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์จากสารละลายเกลือซึ่งประกอบด้วย สารละลายเกลือ LiCl , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaCl และ KNO_3 ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบจากสมการความชื้นสมดุลแบบต่างๆ ประกอบด้วย สมการของ Halsey สมการของ Henderson สมการของ Chung and Pfof และสมการของ Oswin ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ และสามารถหาค่าคงที่จากสมการความชื้นสมดุลแบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 50°C



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 60°C

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าที่คำนวณได้จากสมการความชื้นสมดุลแบบต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	สมการ	รูปแบบสมการ	ค่าคงที่		R^2	R^2_{adj}	SSE
			a	b			
50	Halsey	$RH = \exp\left(\frac{-a}{RT}\right) M_{eq}^b$	317	-1.6050	0.9895	0.9860	0.0030
	Henderson	$1 - RH = \exp(-aTM_{eq}^b)$	0.0082	1.3230	0.9419	0.9225	0.0165
	Chung and Pfof	$\ln RH = \frac{-a}{RT} \exp(bM_{eq})$	9242	-4.0670	0.9209	0.8945	0.0225
	Oswin	$M_{eq} = a[RH / (1 - RH)]^b$	0.3480	0.4825	0.9727	0.9636	0.0078
60	Halsey	$RH = \exp\left(\frac{-a}{RT}\right) M_{eq}^b$	331.6	-1.4850	0.9913	0.9885	0.0018
	Henderson	$1 - RH = \exp(-aTM_{eq}^b)$	0.0087	1.3320	0.9554	0.9405	0.0094
	Chung and Pfof	$\ln RH = \frac{-a}{RT} \exp(bM_{eq})$	9322	-4.3550	0.9343	0.9124	0.0138
	Oswin	$M_{eq} = a[RH / (1 - RH)]^b$	0.3237	0.5036	0.9775	0.9700	0.0047

(M_{eq} = ความชื้นสมดุล (%d.b.), RH = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ(%), $R = 8.314$ J/mol-K, T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K), a, b = ค่าคงที่ของสมการ)

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อนำค่าจากการทดลองความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิ 50°C และ 60°C เขียนกราฟเปรียบเทียบสมการความชื้นสมดุลแบบต่าง ๆ สำหรับอุณหภูมิ 50°C สมการของ Halsey มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9895 หมายความว่าความแปรผันของความชื้นสมดุลมีสาเหตุมาจากความชื้นสัมพัทธ์ 98.95% เมื่อได้ปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแล้ว (R^2_{adj}) ความแปรผันของความชื้นสมดุลมีสาเหตุมาจากความชื้นสัมพัทธ์ 98.6% ซึ่งมีค่าสูงที่สุดและมีผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด (SSE) เท่ากับ 0.003 ซึ่งต่ำที่สุด สำหรับอุณหภูมิ 60°C สมการของ Halsey มีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9913 หมายความว่าความแปรผันของความชื้นสมดุลมีสาเหตุมาจากความชื้นสัมพัทธ์ 99.13% เมื่อได้ปรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแล้ว (R^2_{adj}) ความแปรผันของความชื้นสมดุลมีสาเหตุมาจากความชื้นสัมพัทธ์ 98.85% ซึ่งมีค่าสูงที่สุดและมีผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด (SSE) เท่ากับ 0.0018 ซึ่งต่ำที่สุด

สรุปผลการทดลอง

การวิเคราะห์รูปแบบสมการความชื้นสมดุลของกล้วยเล็บมือนางที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10 – 90 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสมการความชื้นสมดุลของ Halsey (1948) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) สูงที่สุดและผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด (SSE) ต่ำที่สุดจึงอธิบายการทดลองได้ดีที่สุด

4.3 สารตัวกลางสำหรับกักเก็บความร้อน

การทดลองเปรียบเทียบสารกักเก็บความร้อน 3 ชนิด คือ น้ำ อีฐ และพาราฟิน ซึ่งภาชนะบรรจุสารกักเก็บความร้อนมีปริมาตร 0.0017 m³ สามารถบรรจุน้ำ อีฐ และพาราฟินจำนวน 1.5, 2.2 และ 1.35 kg ตามลำดับ สารกักเก็บความร้อนมีคุณสมบัติทางกายภาพเชิงความร้อนคือ น้ำมีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 4.2 kJ/kg · K อีฐมีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.79 kJ/kg · K สำหรับพาราฟินมีค่าความจุความร้อนจำเพาะในสถานะของแข็งเท่ากับ 2.0 kJ/kg · K , ค่าความจุความร้อนจำเพาะในสถานะของเหลวเท่ากับ 2.15 kJ/kg · K และพาราฟินมีคุณสมบัติทางกายภาพเชิงความร้อนดังตารางที่ 4.2 ทดลองด้วยชุดทดลองดังรูปที่ 4.11 ในกรณีป้อนความร้อน และดึงความร้อน เพื่อเลือกสารตัวกลางสำหรับนำไปออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



(ก) กรณีป้อนความร้อน



(ข) กรณีดึงความร้อน

รูปที่ 4.11 ทดลองระบบกักเก็บความร้อน

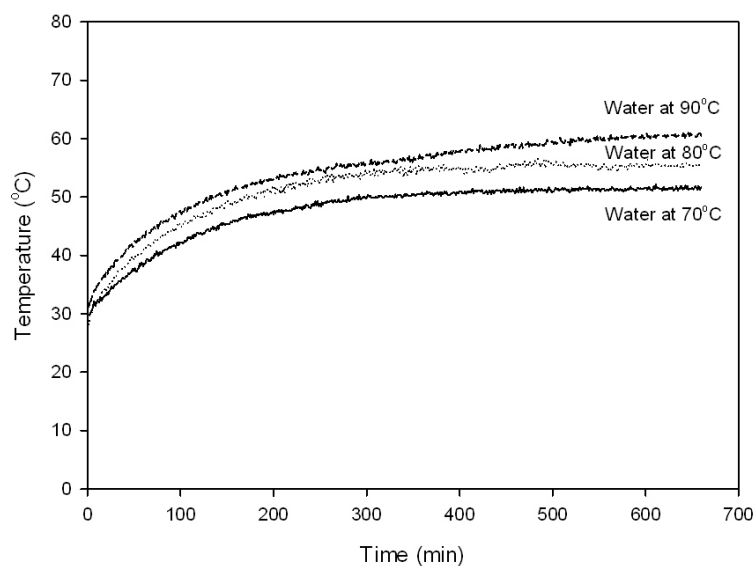
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกายภาพเชิงความร้อนของพาราฟิน (Felix, 2006)

Property	Values
Melting point, T_m	$59.9^\circ C$
Melting range, $(dT)_m$	$8.7^\circ C$
Solid-solid phase change temperature, T_p	$43.9^\circ C$
Solid-solid phase change range, $(dT)_p$	$13.6^\circ C$
Specific heat of Solid, $C_{ps} (< 40^\circ C)$	$2.0 \frac{kJ}{Kg \cdot K}$
Specific heat of Liquid, $C_{pl} (> 60^\circ C)$	$2.15 \frac{kJ}{Kg \cdot K}$
Latent heat of melting, L	$190 \frac{kJ}{kg}$
Latent heat of solid-solid change, L_p	$30 \frac{kJ}{kg}$
Density of solid, $\rho_s (at 15^\circ C)$	$910 \frac{kg}{m^3}$
Density of liquid, $\rho_l (at 70^\circ C)$	$790 \frac{kg}{m^3}$

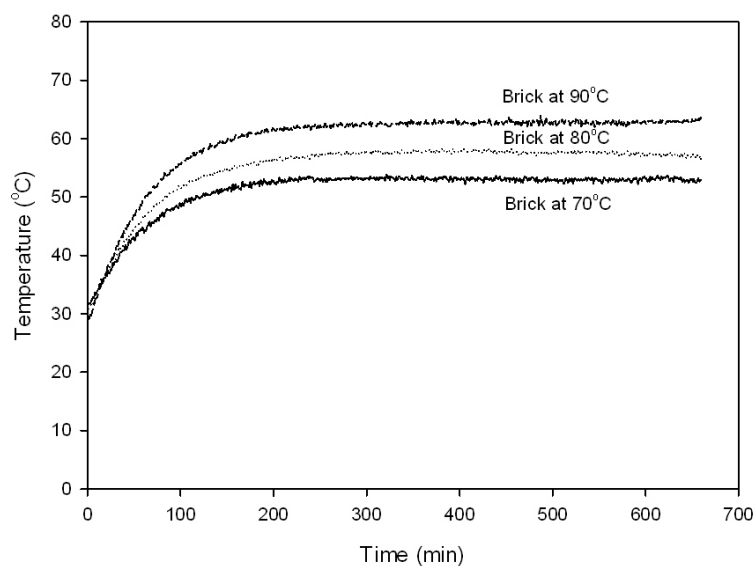
4.3.1 กรณีการป้อนความร้อน

การทดลองกรณีป้อนความร้อนซึ่งใช้อากาศเป็นสื่อพาความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารเก็บกักความร้อน โดยทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 70, 80 และ $90^\circ C$ สำหรับน้ำ และอิฐ ส่วนพาราฟินทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า $90^\circ C$ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในสารกักเก็บความร้อนพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิป้อนเข้าสูงขึ้น อุณหภูมิในสารกักเก็บความร้อนจะเพิ่มสูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบในสารชนิดเดียวกัน น้ำในกรณีป้อนความร้อน $90^\circ C$ จะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำในกรณีป้อนความร้อน 80 และ $70^\circ C$ และอิฐในกรณีป้อนความร้อน $90^\circ C$ จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอิฐในกรณีป้อนความร้อน 80 และ $70^\circ C$ เนื่องจากน้ำและอิฐสะสมความร้อนในรูปความร้อนสัมผัสความร้อนที่สะสมในน้ำ และอิฐจะเก็บสะสมในรูปของอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบกรณีป้อนความร้อน $90^\circ C$ พบว่าอุณหภูมิของอิฐสูงที่สุด ใช้เวลาเก็บสะสมความร้อนเร็ว อุณหภูมิของสารกักเก็บความร้อน

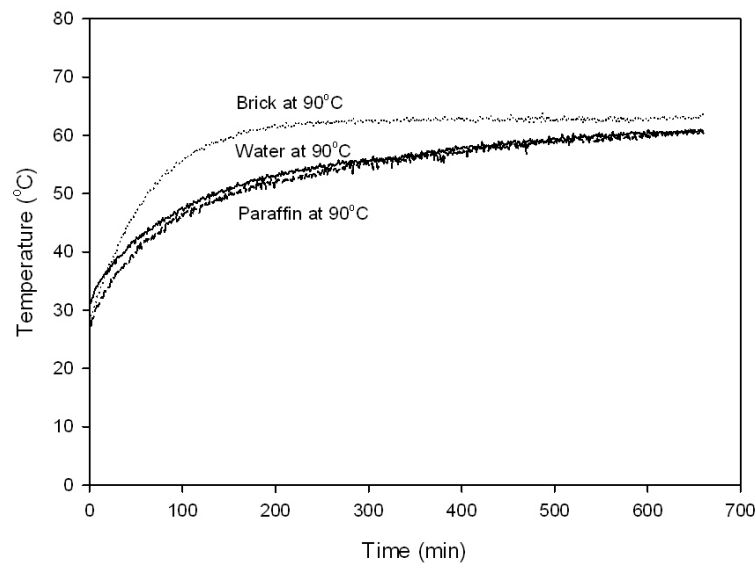
เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่มีความสำคัญเนื่องจากพลังงานที่ต้องการใช้อบแห้งกล้วยอยู่ในรูปของอุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิที่สารกักเก็บความร้อนกักเก็บได้จึงมีความสำคัญ



(ก) อุณหภูมิของน้ำ



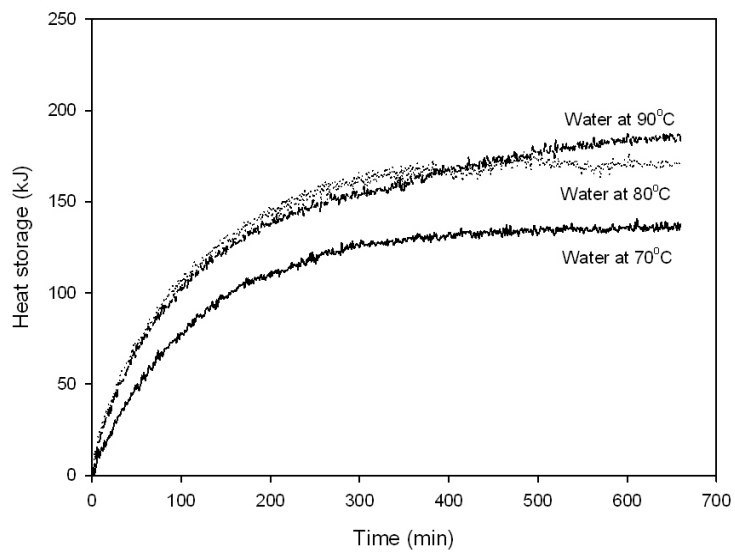
(ข) อุณหภูมิของอิฐ



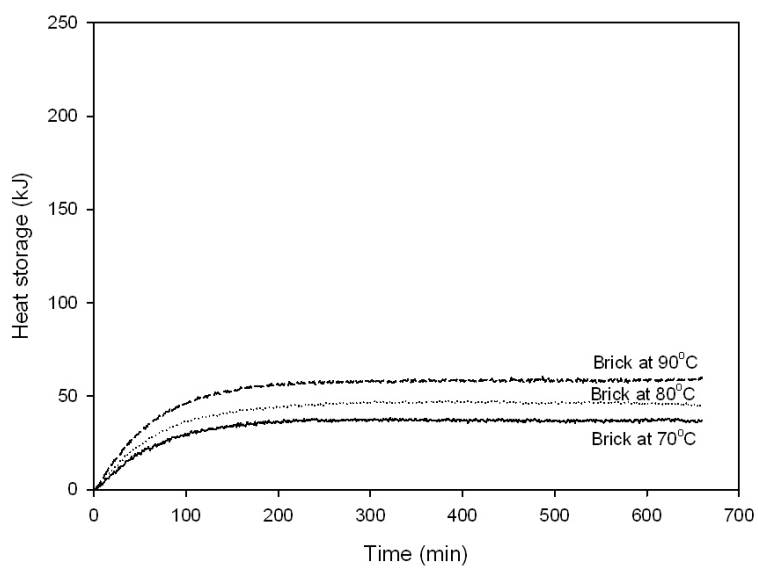
(ค) อุณหภูมิของ น้ำ อิฐ และพาราฟิน ที่ 90°C

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

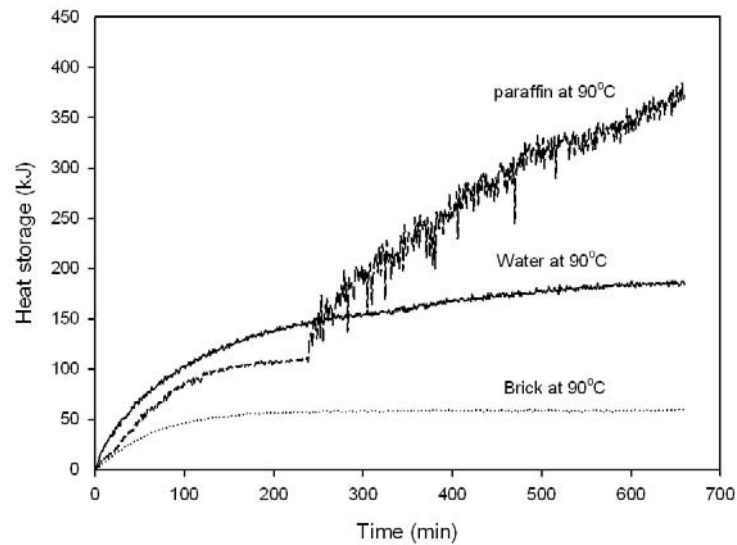
อีกปัจจัยที่มีความสำคัญคือปริมาณความร้อนสะสมในสารกักเก็บความร้อน พิจารณาจากรูปที่ 4.13 กรณีป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C สำหรับน้ำและอิฐ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิป้อนเข้า น้ำและอิฐสามารถสะสมความร้อนได้มากขึ้น อัตราการสะสมความร้อนที่การป้อนความร้อนเข้าอุณหภูมิ 90°C เร็วกว่าการป้อนความเข้าอุณหภูมิ 70 และ 80°C เพราะความชันในกราฟมากกว่าดังรูปที่ 4.13 (ก) และ 4.13 (ข) โดยเฉพาะอิฐจะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน สำหรับพาราฟินซึ่งต้องการศึกษาการสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง กรณีป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 70 และ 80°C ความร้อนที่ป้อนเข้าไม่เพียงพอที่จะศึกษาการสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง พาราฟินจึงศึกษาเฉพาะกรณีป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เมื่อพิจารณาสารทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 90°C พบว่าช่วงระยะเวลา 250 นาทีแรก สารกักเก็บความร้อนทั้ง 3 ชนิดคือ น้ำ อิฐ และพาราฟินสะสมปริมาณความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส ปริมาณความร้อนสะสมของน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ พาราฟิน และอิฐ ซึ่งเป็นผลจากค่าความจุความร้อนของน้ำมากที่สุด หลังจาก 250 นาทีแรก พาราฟินเริ่มดึงความร้อนมาช่วยเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวในนาทีที่ 250 ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ค) ส่งผลให้ความร้อนสะสมของพาราฟินมากกว่าความร้อนสะสมของน้ำ จากกรณีป้อนความร้อนเท่า ๆ กันพาราฟินสามารถกักเก็บความร้อนได้มากที่สุดเหมาะสำหรับใช้เป็นสารกักเก็บความร้อนเพื่อนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ต่อไป



(ก) ปริมาณความร้อนสะสมของน้ำ



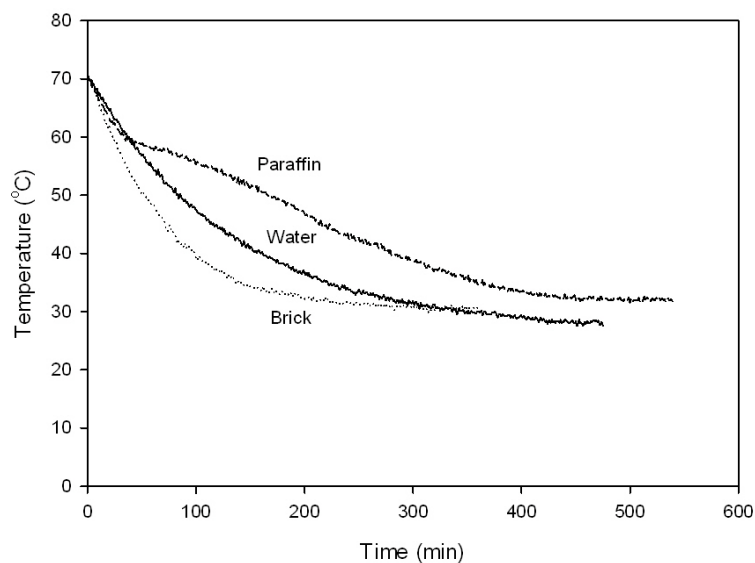
(ข) ปริมาณความร้อนสะสมของอิฐ



(ค) ปริมาณความร้อนสะสมของน้ำ อีฐและพาราฟินที่อุณหภูมิ 90°C
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนสะสมกับเวลา

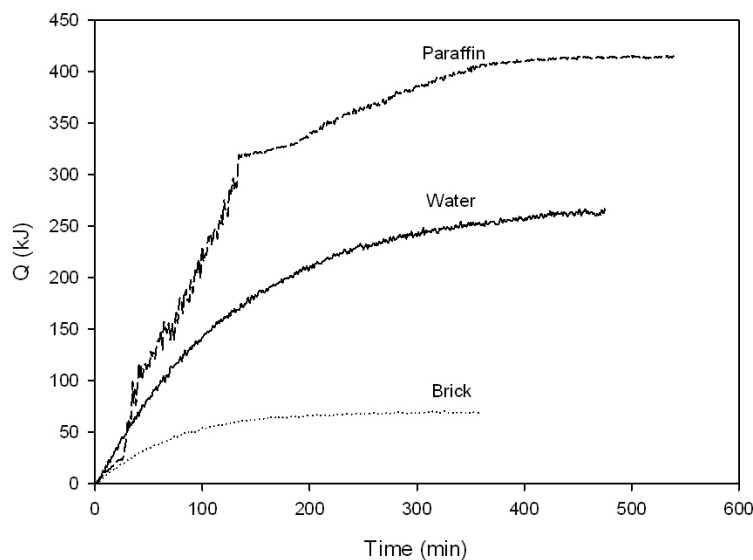
4.3.2 กรณีการดึงความร้อนจากระบบกักเก็บ

ศึกษาการนำพลังงานความร้อนที่สะสมในสารกักเก็บความร้อนไปใช้งาน โดยป้อนความร้อนให้สารกักเก็บความร้อน จนสารกักเก็บความร้อนมีอุณหภูมิ 70°C จากนั้นจะดึงความร้อนออกจากสารกักเก็บความร้อน โดยใช้อากาศที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเป็นสื่อพาความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารกักเก็บความร้อน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของสารกักเก็บความร้อนพบว่า 30 นาทีแรกอุณหภูมิของอีฐลดลงเร็วที่สุด รองลงมาคือพาราฟิน และน้ำตามลำดับ หลังจากนั้นที่ 30 อุณหภูมิของพาราฟินประมาณ 60°C ความร้อนแฝงของพาราฟินถูกดึงออก ส่งผลให้อุณหภูมิของพาราฟินลดลงช้ากว่าอุณหภูมิของน้ำและอีฐดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา กรณีตั้งความร้อน

สำหรับปริมาณความร้อนดึงออกจากสารแต่ละชนิด พบว่าปริมาณความร้อนดึงออกของน้ำมากที่สุดในช่วงเวลา 30 นาทีแรก ดังรูปที่ 4.15 แต่อุณหภูมิน้ำลดลงช้า เนื่องจากค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่ามากที่สุดในช่วงความร้อนสะสมในรูปความร้อนสัมผัส หลังจากนั้น 30 พาราฟินเข้าสู่ช่วงเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ความร้อนสะสมในรูปความร้อนแฝงถูกคายออก ส่งผลให้ปริมาณความร้อนดึงออกของพาราฟินมีค่ามากที่สุด และอุณหภูมิน้ำของพาราฟินลดลงช้าที่สุด



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ออกของ น้ำ อีฐและพาราฟินกับเวลา

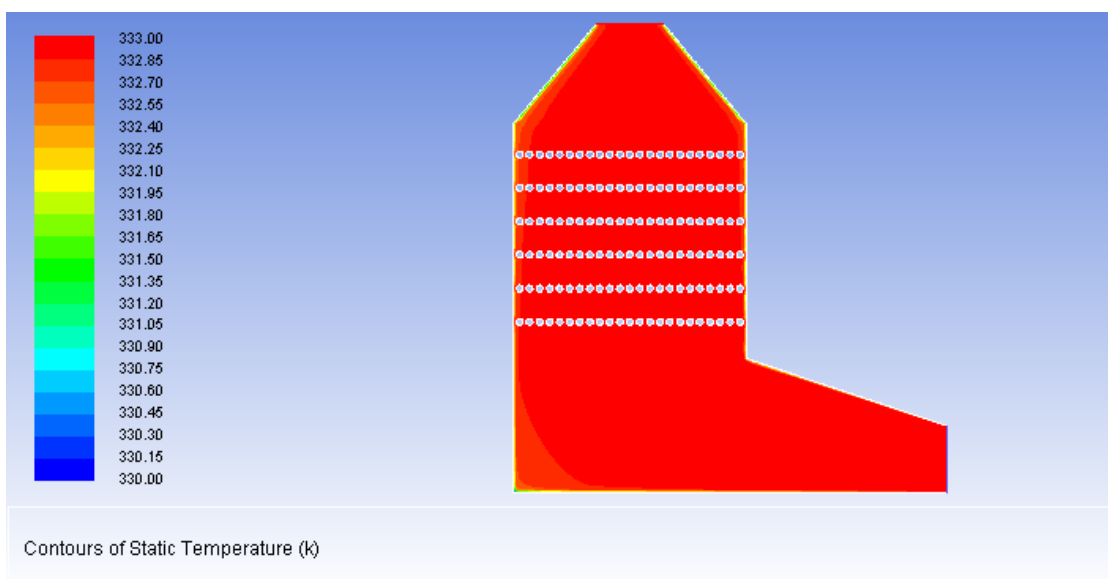
4.3.3. สรุป

พาราฟินสามารถกักเก็บความร้อน ได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำและอีฐ ซึ่งมีระยะเวลาสำหรับการคายความร้อนนานที่สุด พาราฟินซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 60°C เป็นสารสะสมความร้อนในรูปของความร้อนแฝงเหมาะสำหรับนำไปออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่อไป

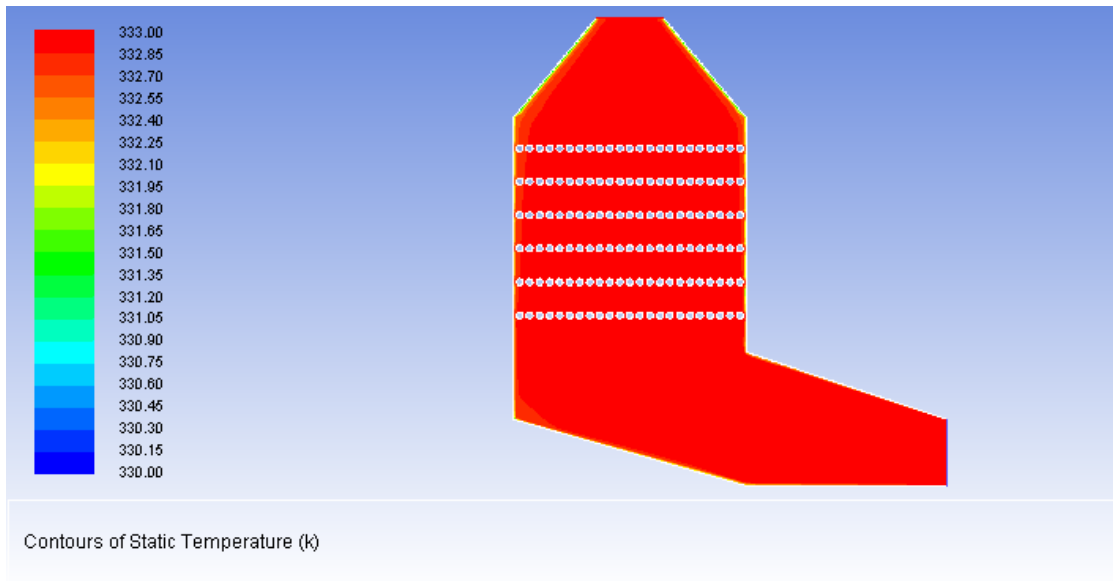
4.4 การจำลองห้องอบแห้งด้วยวิธีพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ

จากการจำลองการไหลของห้องอบแห้งของแบบจำลอง โดยสร้างเป็น 2 มิติ ซึ่งจะแบ่งห้องอบแห้งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกกว้าง 0.7 เมตร สูง 0.7 ส่วนที่ 2 คือส่วนทางลมเข้าส่วนนี้จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู ความยาวด้านคู่ขนานเท่ากับ 0.2 เมตร 0.4 เมตร และสูง 0.6 เมตร ทั้ง 2 ส่วนจะควบคุมให้คงที่ ส่วนที่ 3 คือส่วนพื้นเอียงก่อนจะถึงชั้นวางกล้วยเล็บมือนาง ซึ่งส่วนนี้กว้าง 0.4 เมตร ยาว 0.7 เมตร จะปรับรูปแบบพื้นเอียง เริ่มจำลองจากห้องอบแห้งดังรูปที่ 4.16 (ก) ทางเข้าเป็น Velocity inlet มีความเร็วเท่ากับ 3.4 m/s และอุณหภูมิเท่ากับ 333 K ทางออกกำหนด

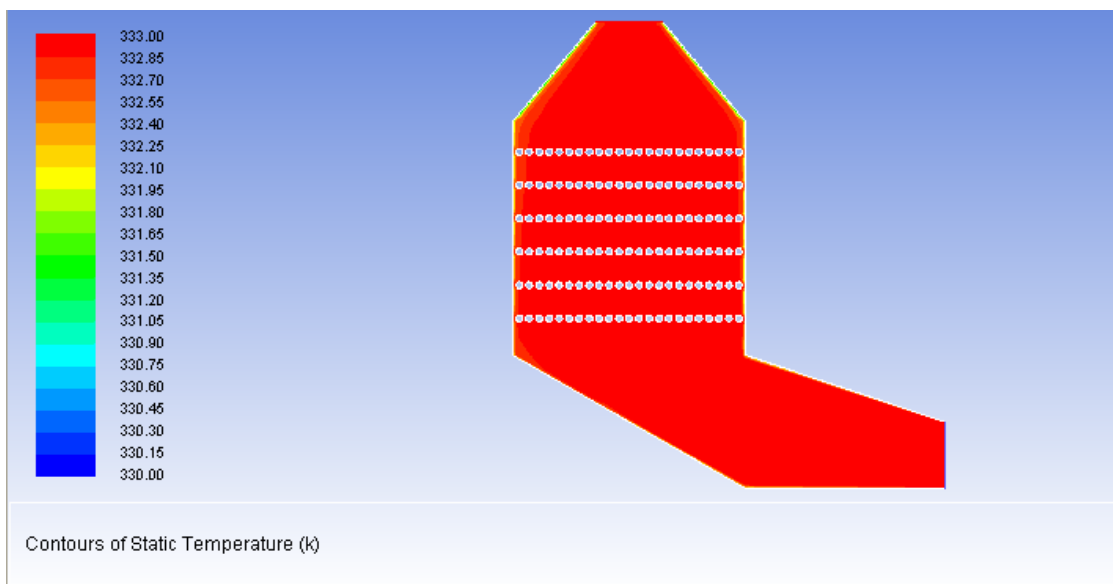
Pressure outlet ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งจะศึกษาเฉพาะการไหลของอากาศในห้องอบแห้ง บริเวณผนังของห้องอบแห้ง กำหนด heat flux เท่ากับ 20.26 W/m^2 พบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งคงที่ บริเวณผนังอุณหภูมิลดลงประมาณ 1°C บริเวณชั้นวางกล้วยอบแห้งไม่มีการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากคำนวณสำหรับออกแบบกล้วยจึงไม่ได้กำหนดการถ่ายเทความร้อนของกล้วยดังรูปที่ 4.16 เมื่อพิจารณาการไหลบริเวณชั้นวางกล้วยอบแห้ง การไหลของอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนบริเวณใต้ชั้นวางกล้วย มีบางส่วนซึ่งไม่มีอากาศไหลผ่าน ในการจำลองห้องครั้งต่อไปจึงลดพื้นที่ในส่วนที่อากาศไม่ไหลออก ดังรูปที่ 4.17 (ข) พบว่าการไหลของอากาศในรูป (ข) บริเวณชั้นวางกล้วยอบแห้ง การไหลเหมือนรูป (ก) คือการไหลของอากาศค่อนข้างสม่ำเสมอ ส่วนบริเวณใต้ชั้นวางกล้วยอบแห้งมีอากาศไม่เคลื่อนที่น้อยกว่ารูป (ก) จากนั้นลดพื้นที่ในส่วนที่อากาศไม่เคลื่อนที่ในรูป (ข) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 (ค) พบว่าบริเวณชั้นวางกล้วยอบแห้งมีลักษณะการไหลเหมือนเดิม บริเวณใต้ชั้นวางมีการไหลค่อนข้างสม่ำเสมอขึ้น จากการทดลองจึงได้แบบของห้องอบแห้งซึ่งมีการไหลบริเวณชั้นวางกล้วยสม่ำเสมอ อากาศในห้องอบแห้งมีการเคลื่อนที่ทุกพื้นที่ ช่วยประหยัดค่าวัสดุ



(ก)

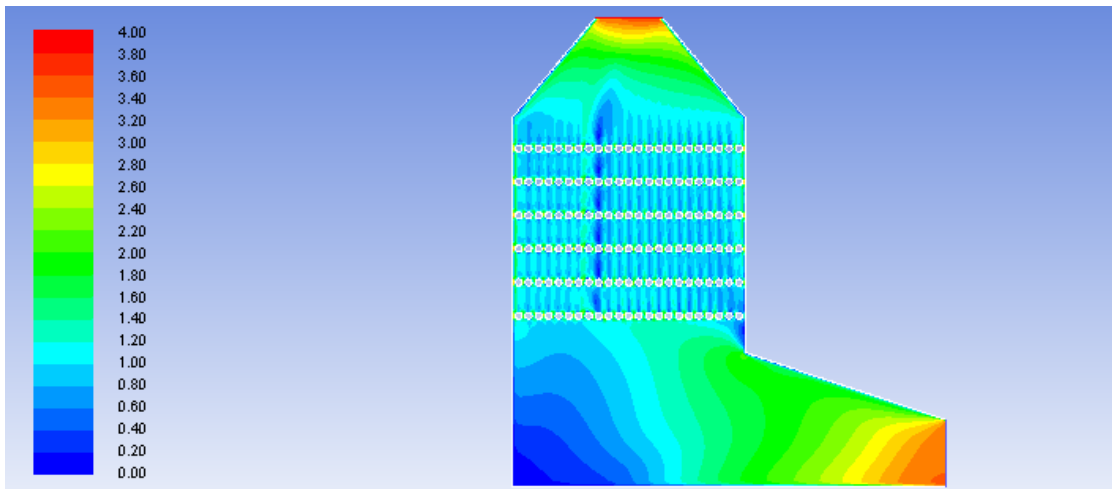


(จ)



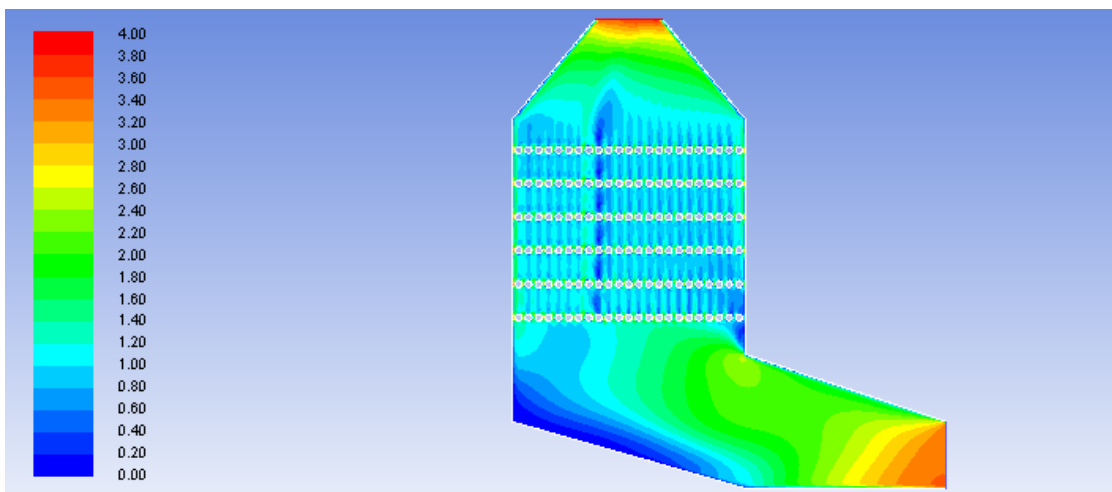
(ค)

รูป 4.16 อุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้ง



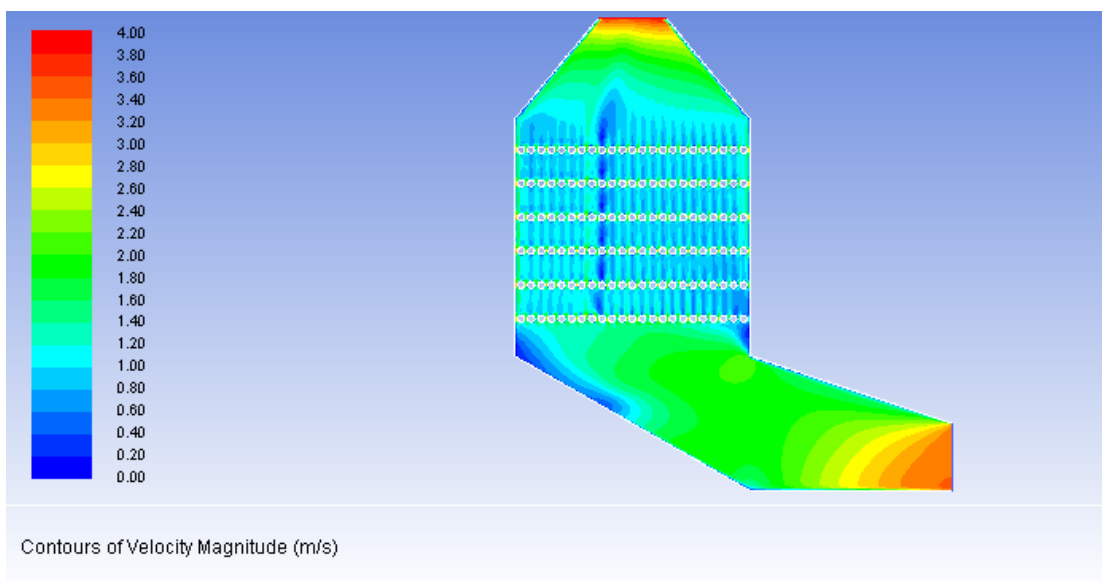
Contours of Velocity Magnitude (m/s)

(n)



Contours of Velocity Magnitude (m/s)

(o)



(ค)

รูป 4.17 การไหลของอากาศภายในห้องอบแห้ง

4.5 การออกแบบเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

งานวิจัยอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล ซึ่งอบกล้วยเล็บมือนางที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 310%d.b. โดยอบอุณหภูมิ 40-60°C ให้เหลือความชื้นประมาณ 35%d.b. เครื่องอบกล้วยเล็บมือนางประกอบด้วย ตู้อบแห้ง แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และระบบแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ซึ่งขนาดตู้อบแห้งหาได้จากพื้นที่สำหรับอบกล้วยเล็บมือนางจำนวน 30 kg กล้วยเล็บมือนางมีความหนาแน่น 1,058.33 kg/m³ จากกล้วยเล็บมือนางหนัก 63.5 g บรรจุในปิ๊กเกอร์ ขนาด 60 ml

$$\text{ปริมาตรของกล้วยเล็บมือนาง 1 kg} = \frac{1\text{kg}}{1058.33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 9.76 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

ขนาดของกล้วยเล็บมือนางโดยเฉลี่ย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ยาว 8 cm

$$\text{ดังนั้นกล้วย 1 ลูกมีปริมาตร} = \frac{\pi D^2 l}{4} = \frac{22}{7} \times 0.02^2 \times 0.08 = 2.51 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\text{เพราะฉะนั้นกล้วย 1 kg มีจำนวน} = \frac{9.76 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{2.51 \times 10^{-5} \text{ m}^3} = 38.9 \approx 40 \text{ ลูก}$$

ต้องการอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg ประมาณ 1200 ลูก ห้องอบแห้งมี 6 ชั้นแต่ละชั้นห่างกัน 10 cm ซึ่งอบชั้นละ 200 ลูก วางตามยาว 10 ลูก ตามขวาง 20 ลูก โดยมีระยะห่างระหว่างกล้วย 1 cm ดังนั้นห้องอบกล้วยเล็บมือนาง จึงมีขนาด กว้าง 0.7 m ยาว 1 m และสูง 0.7 m เครื่องอบแห้งมีแหล่งพลังงานความร้อน 2 แหล่งคือ แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และ เตาเผาไหม้ฟืน จึงสามารถแบ่งการทำงานได้ 2 ช่วง คือ ช่วงมีแสงอาทิตย์ และช่วงไม่มีแสงอาทิตย์ ในช่วงมีแสงอาทิตย์จะใช้แหล่งพลังงานความร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกระจกบนแผงรับรังสีช่วยลดการสูญเสียความร้อนของชั้นอากาศนี้ แผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีจากดวงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน ถ่ายเทให้กับอากาศที่ไหลผ่านให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ไหลเข้าห้องอบเพื่ออบกล้วยเล็บมือนาง แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบคำนวณได้จาก อัตราการไหลของอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้งหาได้จากสมการ

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a C_p (T_f - T_i)}{A_c I}$$

โดยที่ $T_f = 40^\circ C, T_i = 30^\circ C, I = 625 \frac{W}{m^2}, \eta_c = 60\%, c_p = 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C}$

$$\dot{m}_a = 0.15 \frac{kg}{s} \text{ (ภาคผนวก ก ข้อ 1.4)}$$

จะได้

$$A_c = \frac{\dot{m}_a C_p (T_f - T_i)}{\eta_c I} = \frac{(0.15 \frac{kg}{s})(1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C})(40^\circ C - 30^\circ C)}{(0.6)(625 \frac{W}{m^2})} = 4.028 m^2 \approx 4 m^2$$

ดังนั้นพื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีขนาดประมาณ $4 m^2$ ช่วงไม่มีแสงอาทิตย์ใช้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ฟืน ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศที่ไหลผ่าน พลังงานความร้อนที่เหลือของก๊าซร้อนจะถูกกักเก็บในสารกักเก็บความร้อน ความร้อนทั้งหมดสำหรับอบแห้ง (E_{total}) = 0.732 kW (ภาคผนวก ก ข้อ 1) ต้องการเก็บกักความร้อนในเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งเท่ากับเวลาเผาไหม้ของฟืน ที่ประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนเท่ากับ 30% ($\eta = 0.3$) โดยที่พาราฟินมีความหนาแน่นในสถานะของเหลว (ρ_l) = $790 kg/m^3$ พาราฟินมีความหนาแน่นในสถานะของแข็ง (ρ_s) = $910 kg/m^3$ ค่าความร้อนแฝง

ของการหลอมเหลว (L) = 190 kJ/kg (Felix Regin, A., 2006) สามารถหาจำนวนพาราฟินสำหรับ
กักเก็บความร้อนได้จากสมการดังนี้

$$\begin{aligned} m_{\text{paraffin}} &= \frac{E_{\text{storage}}}{\eta_{\text{storage}} L} \\ &= \frac{0.732 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \times (2 \times 60 \times 60) \text{s}}{0.3 \times 190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\ &= 92.5 \text{ kg} \end{aligned}$$

หาปริมาตรบรรจุพาราฟิน

$$\begin{aligned} V_{\text{paraffin}} &= \frac{m_{\text{paraffin}}}{\rho_{\text{paraffin}}} = \frac{92.5 \text{ kg}}{790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.12 \text{ m}^3 \\ V_{\text{paraffin}} &= V_{\text{tank}} - V_{\text{tube}} \\ &= \left(\frac{\pi}{4} \times D_{\text{tank}}^2 \times l_{\text{tank}} \right) - \left(\frac{\pi}{4} \times D_{\text{tube}}^2 \times l_{\text{tube}} \times N_{\text{tube}} \right) \end{aligned}$$

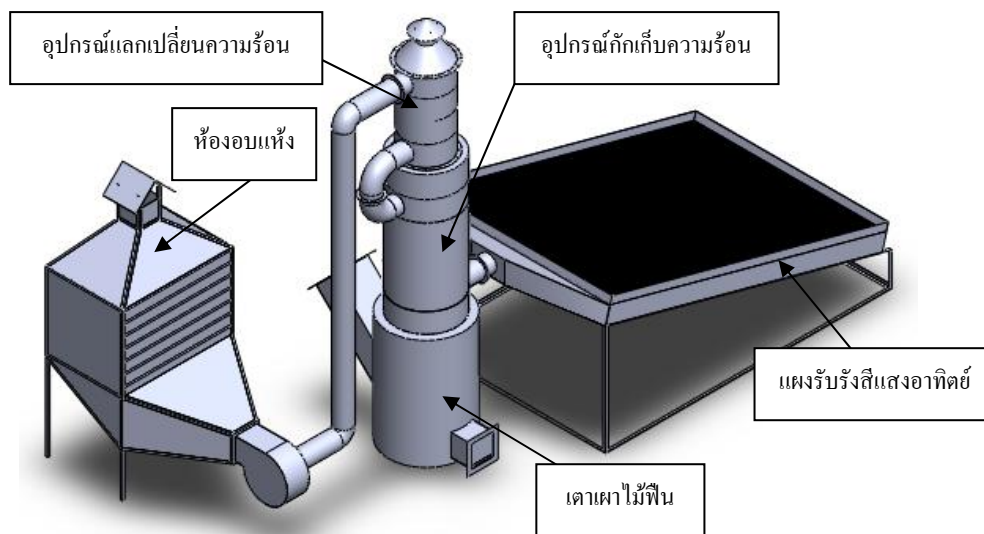
โดยที่ $l_{\text{tank}} = l_{\text{tube}} = l$
จะได้

$$V_{\text{paraffin}} = (D_{\text{tank}}^2 - N_{\text{tube}} \times D_{\text{tube}}^2) \times \frac{\pi}{4} \times l$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} l &= \frac{0.12 \text{ m}^3}{(0.55^2 - (37 \times 0.0381^2)) \times \frac{\pi}{4}} \\ &= 0.61 \end{aligned}$$

ดังนั้นถังเก็บพาราฟินมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.55 เมตร สูง 0.61 เมตร บรรจุ
พาราฟินจำนวน 92.5 kg สามารถสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝงเท่ากับ 17,575 kJ



รูปที่ 4.18 เครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

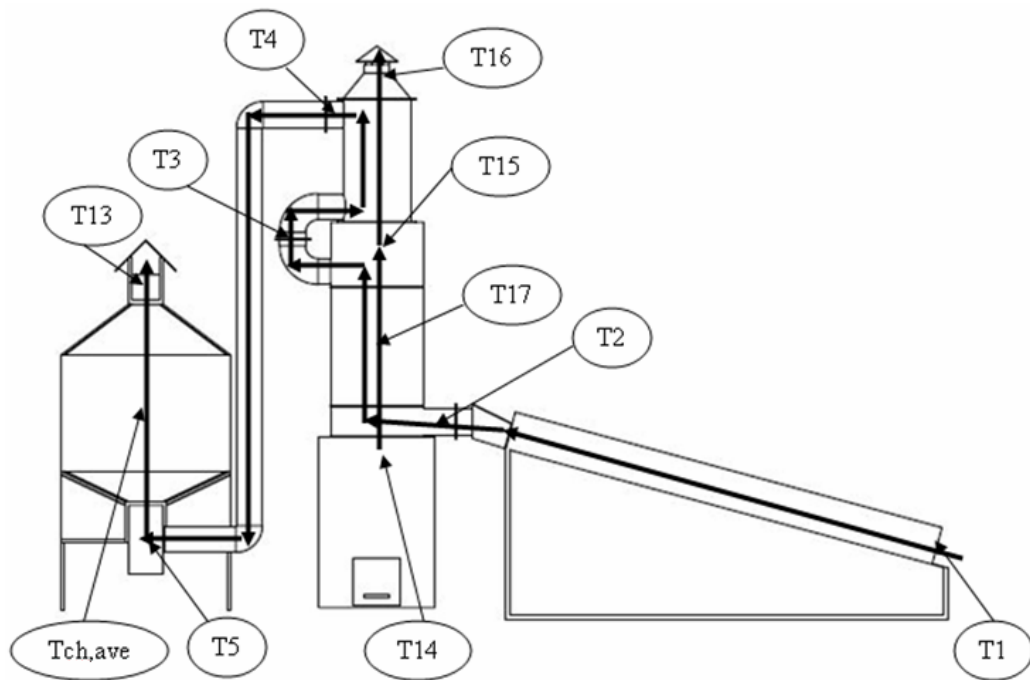


รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายของเครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล

บทที่ 5

ผลและวิจารณ์ผล

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการทดสอบระบบเปล่า เพื่อศึกษาการป้อนเชื้อเพลิงให้แก่ระบบเผาไหม้ พิจารณาอุณหภูมิป้อนเข้าห้องอบแห้ง โดยพยายามให้อุณหภูมิป้อนเข้าห้องอบแห้งอยู่ในช่วง 40-60 °C การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg และ 60 kg ด้วยเครื่องอบแห้งซึ่งมีแหล่งให้ความร้อน 2 แหล่งคือแสงอาทิตย์ และเตาเผาไม้ฟืน ก๊าซร้อนเกิดจากการเผาไม้ฟืนประกอบด้วย อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T16) สำหรับการอบกล้วยเล็บมือนางใช้อากาศเป็นสื่อพาความร้อนประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) และอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง ($T_{ch,ave}$) ดังรูปที่ 5.1 โดยเก็บตัวอย่างกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1, 3 และ 5 สำหรับกรณีสลับตากกล้วยเล็บมือนางจะสลับตำแหน่งตากดังรูปที่ 3.7

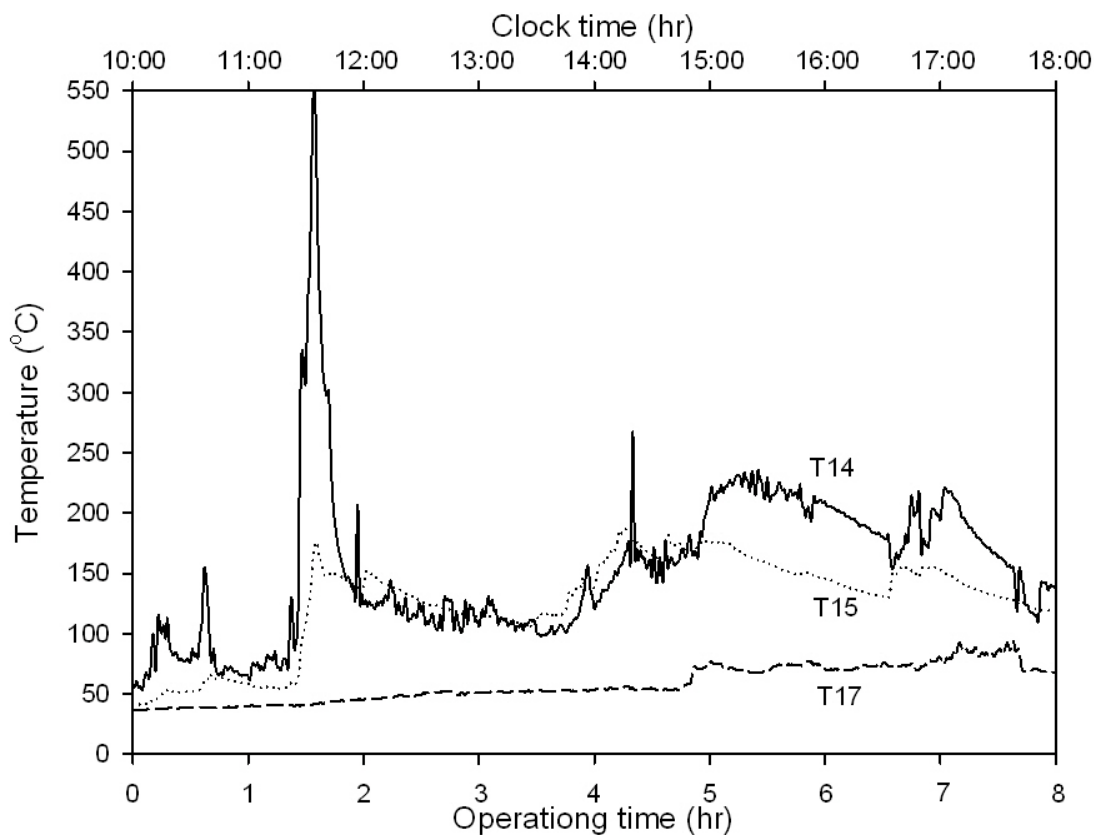


รูปที่ 5.1 การเคลื่อนที่ของลมร้อนและก๊าซร้อนของเครื่องอบแห้ง

5.1 การทดสอบระบบเปล่า (No-load condition)

5.1.1 พลังงานชีวมวลไม่มีการพาความร้อน

การทดสอบพลังงานชีวมวลไม่มีการพาความร้อน เป็นการป้อนความร้อนจากการเผาไหม้ไม้ปิ่นให้แก่พาราฟิน โดยไม่มีการดึงพลังงานจากพาราฟินไปใช้งาน เผาไหม้ปิ่นยาว 1 เมตร ป้อนเต็มช่องป้อนไม้ปิ่นเข้าเตาเผาซึ่งสามารถจุไม้ปิ่นได้ 20.9 kg สามารถเผาไหม้ได้อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.2 อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์เก็บกักความร้อน (T14) ซึ่งได้จากการเผาไหม้ไม้ปิ่นเฉลี่ยเท่ากับ 153.6 °C และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์เก็บกักความร้อน (T15) เฉลี่ยเท่ากับ 126.2 °C อุณหภูมิก๊าซร้อนลดลงเนื่องจากป้อนพลังงานให้แก่พาราฟินซึ่งพาราฟินใช้เวลา 5 ชั่วโมง พาราฟินจึงเข้าสู่การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวอุณหภูมิในพาราฟินสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตำแหน่งวัดอุณหภูมิในพาราฟินเริ่มหลอมเหลว พาราฟินซึ่งหลอมเหลวก่อนได้ไหลเข้ามาส่งผลให้อุณหภูมิจากจุดวัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว การป้อนไม้ปิ่นเต็มความจุสามารถให้ความร้อนได้อย่างต่อเนื่อง 8 ชั่วโมงแบ่งเป็นความร้อนจากการเผาไหม้ไม้ประมาณ 6 ชั่วโมง ความร้อนจากถ่านประมาณ 2 ชั่วโมง

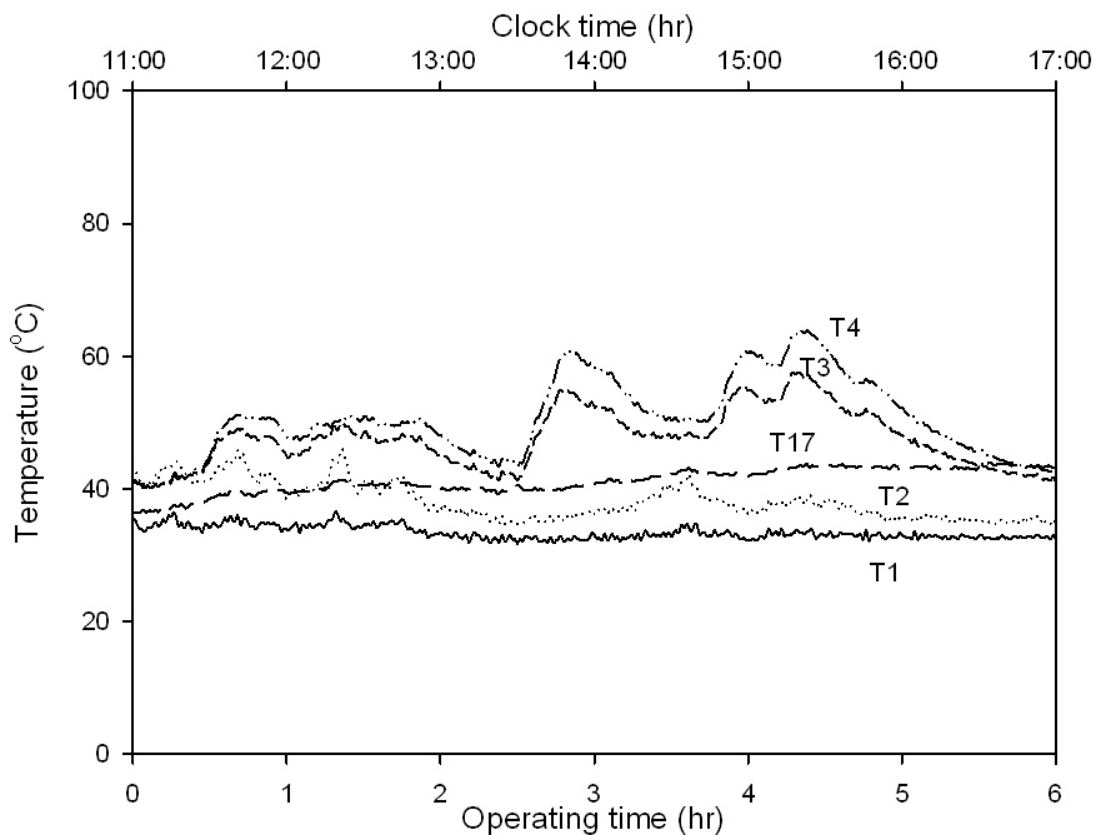


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

5.1.2 พลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางวัน

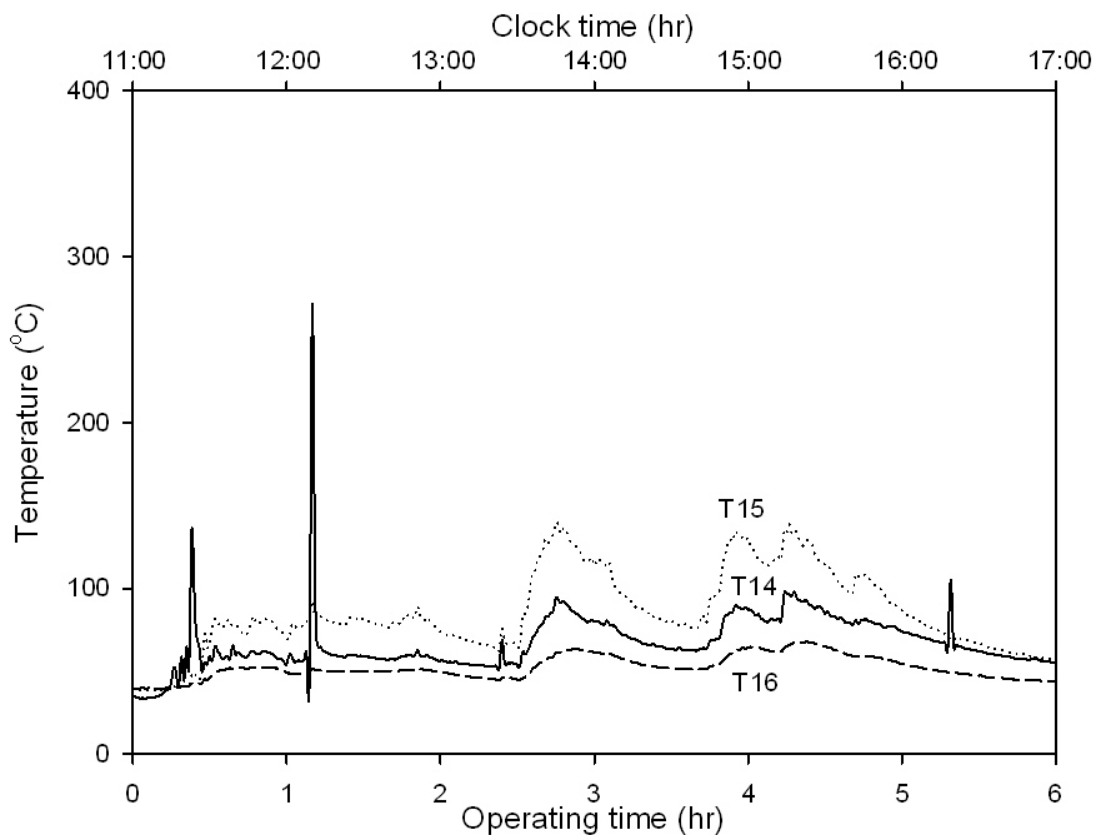
5.1.2.1 การทดลองครั้งที่ 1

การทดสอบพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางวันครั้งที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการป้อนความร้อนเข้าห้องอบแห้งในช่วงเวลากลางวัน โดยเผาไม้พินยาว 1 เมตร จำนวน 12 kg เนื่องจากการคำนวณอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{M}_f) ดังแสดงในภาคผนวก ก ข้อ 3 พบว่าต้องป้อนเชื้อเพลิง 0.98 kg-wood/h ต้องการเผาไหม้เชื้อเพลิง 8 ชั่วโมง รวม 7.84 kg และพลังงานบางส่วนถูกกักเก็บในพาราฟิน จึงป้อนเชื้อเพลิงเพิ่มอีก 1.5 เท่า พบว่าสามารถผลิตให้อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อยู่ในช่วง 40-60 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าไม่มีพลังงานสะสมในพาราฟินเนื่องจากอุณหภูมิในพาราฟิน (T17) เปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

เมื่อพิจารณาก๊าซร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงพบว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) น้อยกว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เนื่องจากจุดวัดอุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อยู่ตรงกลางของกลุ่มท่อก๊าซร้อน แต่การเผาไหม้ไม้พินจะเผาไหม้ใกล้ช่องใส่ไม้พิน จึงวัดอุณหภูมิได้น้อย สามารถป้อนความร้อน 6 ชั่วโมง ความร้อนจากการเผาไหม้ไม้ประมาณ 5 ชั่วโมง ความร้อนจากถ่านประมาณ 1 ชั่วโมง

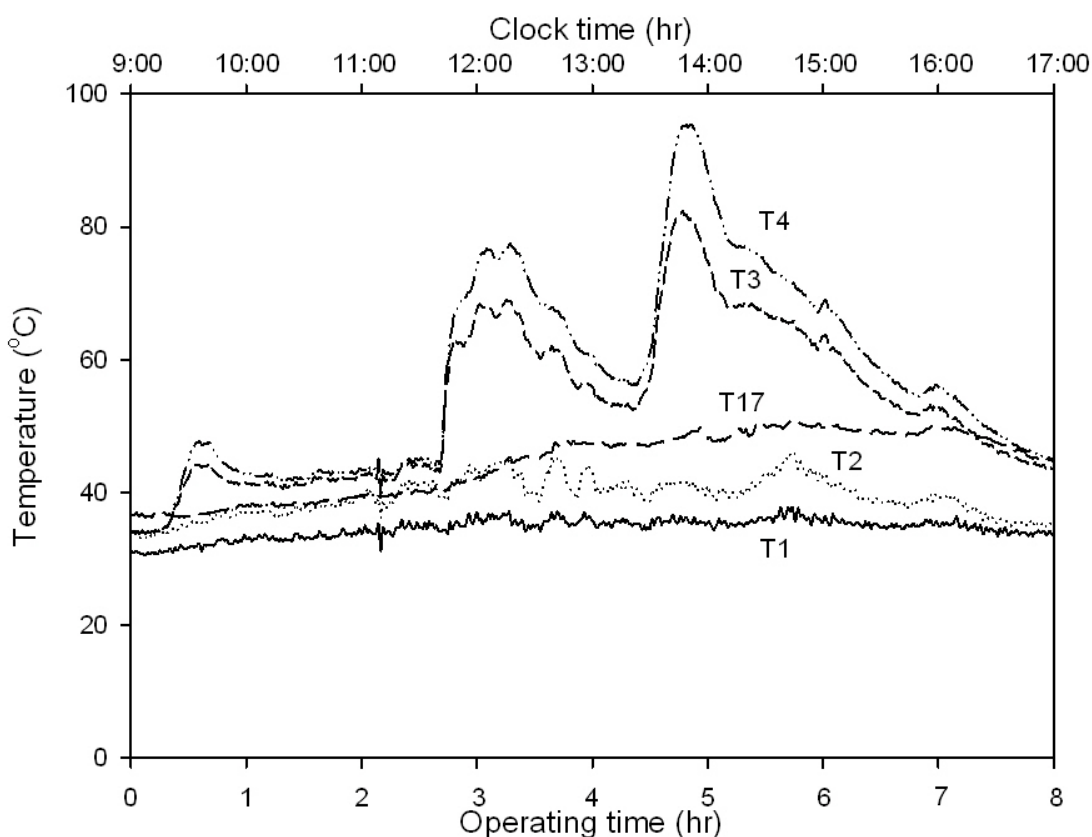


รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

5.1.2.2 การทดลองครั้งที่ 2

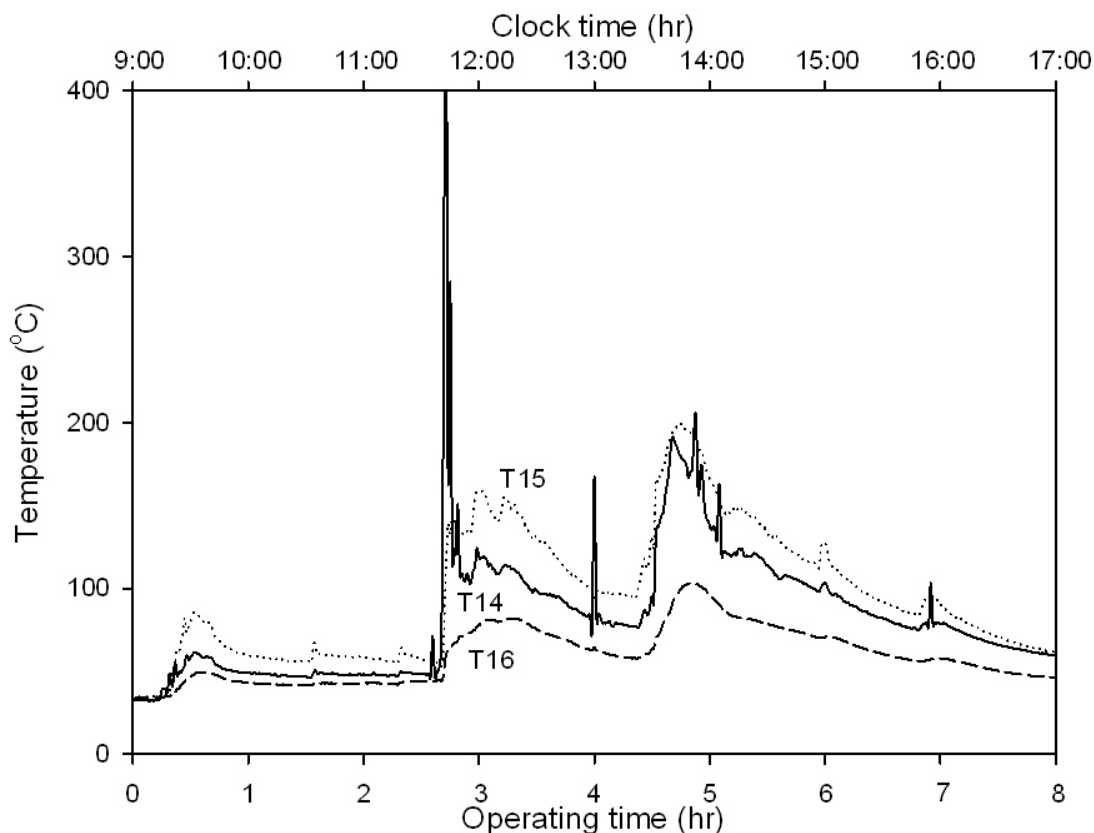
เนื่องจากการทดสอบพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางวันครั้งที่ 1 ป้อนไม้พิน 12 kg พบว่ามีการสะสมพลังงานความร้อนในพาราฟินเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิในพาราฟินสถานะของแข็งเปลี่ยนแปลงน้อยดังรูปที่ 5.3 การทดสอบพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางวันครั้งที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการป้อนความร้อนเข้าห้องอบแห้งในช่วงเวลากลางวันเผาไม้พินยาว 1 เมตรจำนวน 20 kg การทดลองครั้งนี้เพิ่มจำนวนไม้พินคือใส่เต็มช่องป้อนไม้พินพบว่าในเวลา 2 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อยู่ในช่วง 40-60°C ในช่วงโม่งที่ 3-6 อุณหภูมิความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อยู่ในช่วง 60-90°C ดังแสดงในรูปที่ 5.5 เนื่องจากในช่วงโม่งที่ 3-6 อุณหภูมิความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) สูงขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงเผาไหม้มากในช่วงนี้สังเกตได้จาก อุณหภูมิที่วอร์มก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) สูงขึ้นในช่วงโม่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 5.5 อุณหภูมิความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) เฉลี่ยเท่ากับ 57.5°C เมื่อพิจารณาการสะสม

ความร้อนในพาราฟินพบว่าพาราฟินมีการสะสมความร้อนเฉพาะในรูปความร้อนสัมผัส เนื่องจากป้อนเชื้อเพลิงครั้งเดียวในช่วง 7 ชั่วโมงแรกพาราฟินได้รับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและแสงอาทิตย์จึงสามารถสะสมความร้อนได้



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

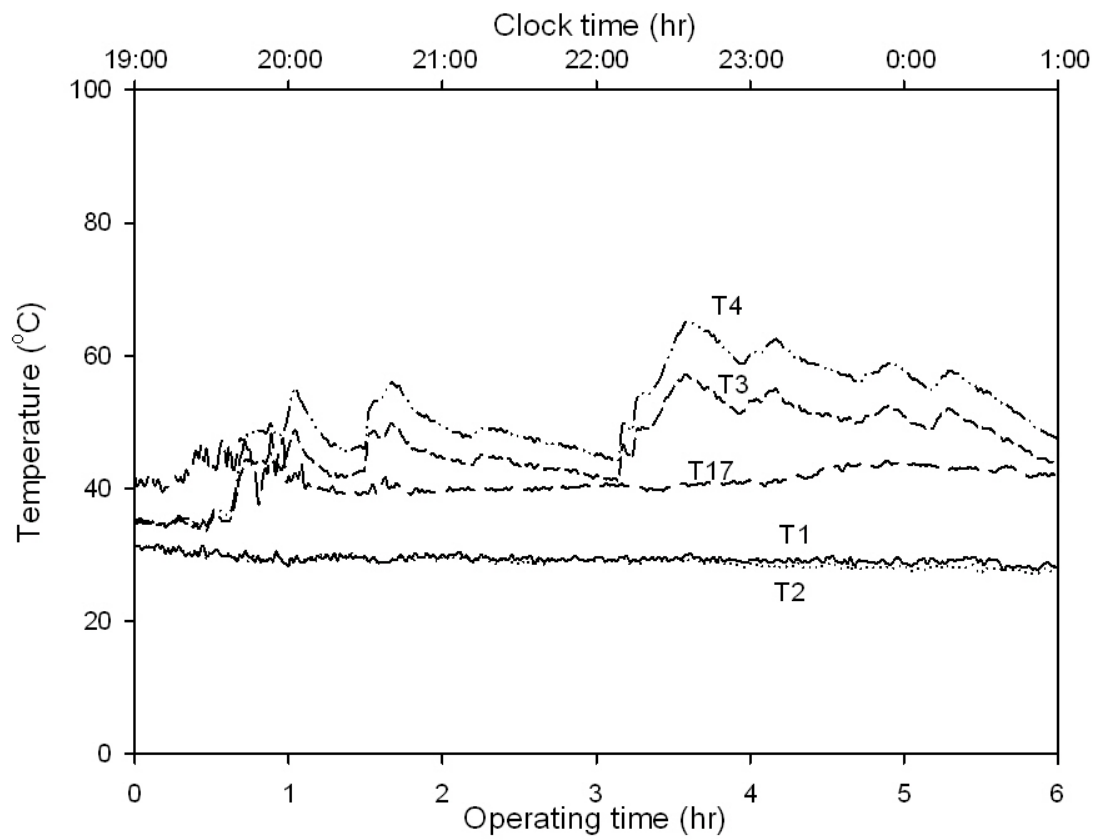
เมื่อพิจารณาก๊าซร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงพบว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) น้อยกว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เนื่องจากจุดวัดอุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อยู่ตรงกลางของกลุ่มท่อก๊าซร้อน แต่การเผาไหม้ไม้พินจะเผาไหม้ใกล้ช่องใส่ไม้พิน จึงวัดอุณหภูมิได้น้อย สามารถป้อนความร้อน 8 ชั่วโมง ความร้อนจากการเผาไหม้ไม้พินประมาณ 6 ชั่วโมง ความร้อนจากถ่านประมาณ 2 ชั่วโมง ในชั่วโมงที่ 8 พลังงานความร้อนจากการเผาไม้พินไม่เพียงพอ จึงดึงความร้อนจากพาราฟินทำให้อุณหภูมิในพาราฟินลดลง



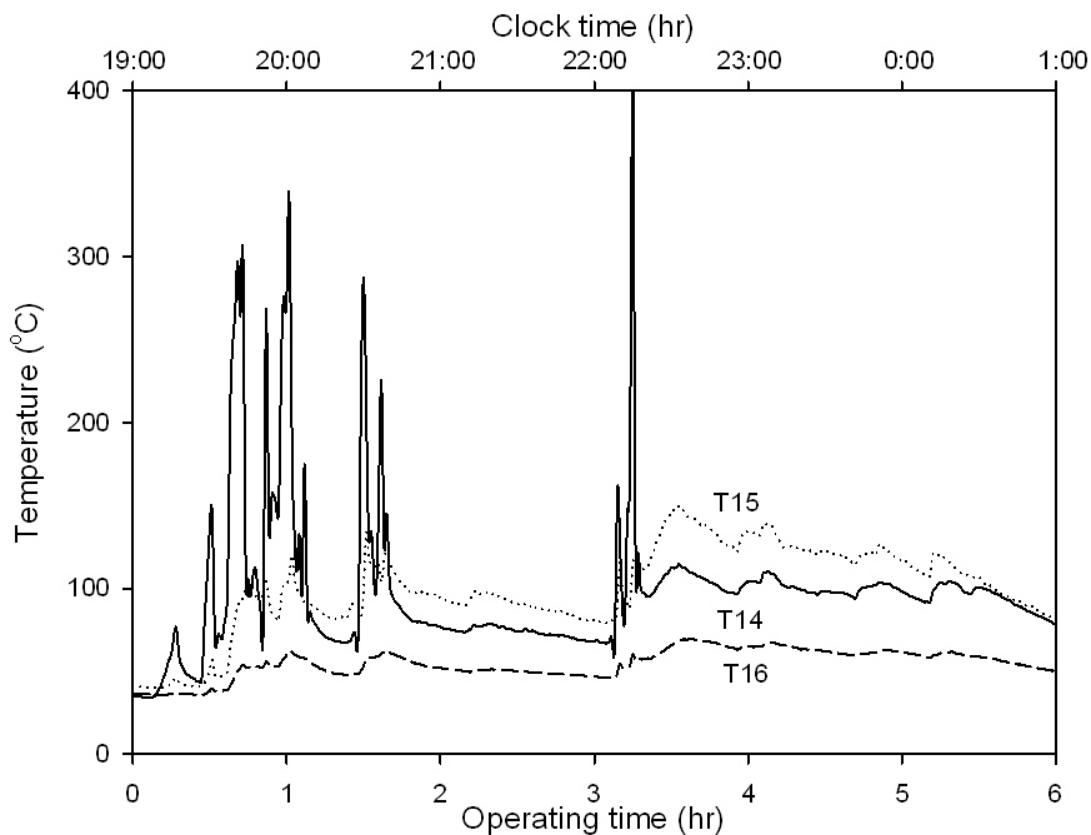
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

5.1.3 พลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางคืน

การทดสอบพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางคืนเป็นการทดลองเพื่อศึกษาการป้อนความร้อนเข้าห้องอบแห้งในช่วงเวลากลางคืน โดยเผาไม้พินยาว 1 เมตรจำนวน 19 kg เต็มช่องป้อนไม้พิน (ช่องป้อนไม้พินสามารถบรรจุไม้พิน 19-22 kg ขึ้นอยู่กับขนาดและความชื้นของไม้พิน) จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อยู่ในช่วง 40-60°C ดังแสดงในรูปที่ 5.7 พิจารณาการสะสมความร้อนของพาราฟินพบว่าอุณหภูมิในพาราฟินแกว่งในช่วงแรก เนื่องจากสายวัดอุณหภูมิในพาราฟินอยู่ที่กึ่งกลางของกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ช่วงเวลา 1-2 ชั่วโมงแรก การเผาไหม้ของไม้พินอยู่ที่กึ่งกลางเตาเผาส่งผลให้อุณหภูมิที่ความร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) สูงและค่อนข้างแกว่งดังรูปที่ 5.8 ทำให้อุณหภูมิในพาราฟินแกว่งด้วยในช่วงนี้ หลังจากชั่วโมงที่ 2 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอยู่ที่ใกล้ช่องป้อนไม้พิน การแลกเปลี่ยนความร้อนในพาราฟินอยู่ที่ใกล้ช่องป้อนไม้พินซึ่งอยู่ไกลจากตำแหน่งวัดอุณหภูมิในพาราฟินและในช่วงนี้พาราฟินอยู่ในสถานะของแข็งอุณหภูมิในพาราฟินจึงค่อนข้างคงที่



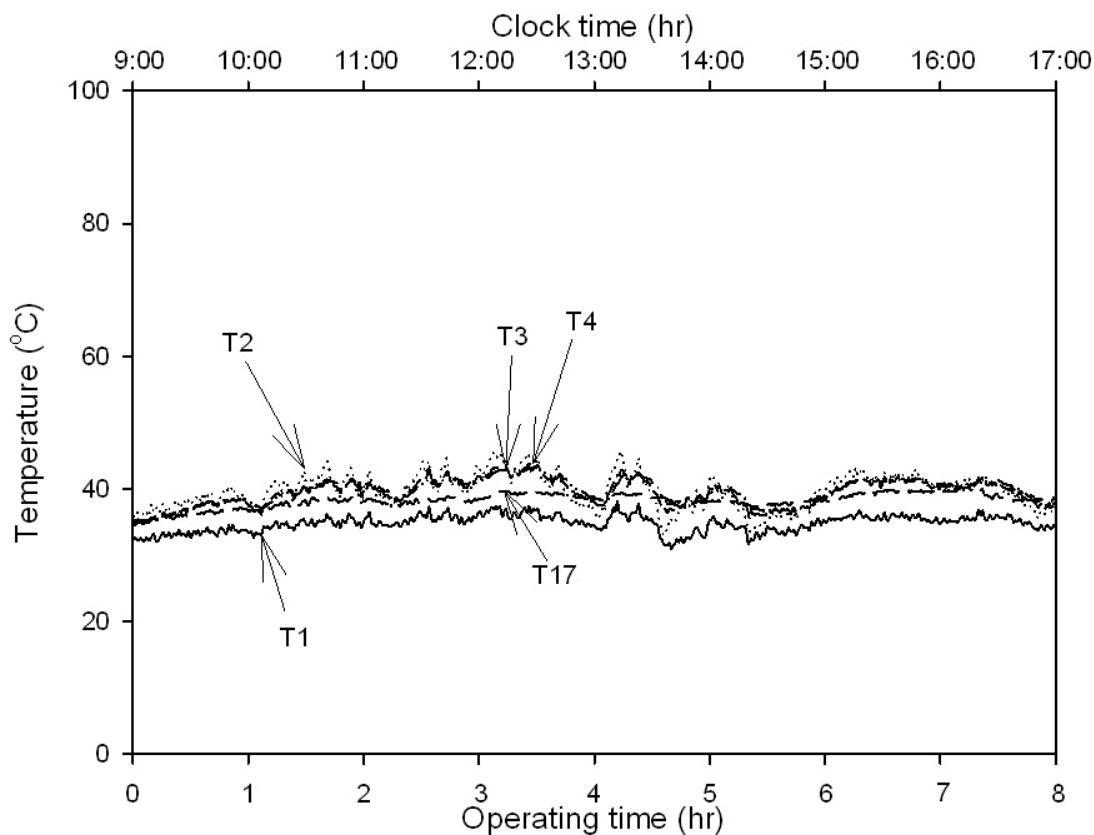
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับ เวลา



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

5.1.4 พลังงานแสงอาทิตย์มีการพาความร้อนช่วงกลางวัน

การทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์มีการพาความร้อนช่วงกลางวันเป็นการทดลองเพื่อศึกษาการป้อนความร้อนเข้าห้องอบในช่วงเวลากลางวันจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) เฉลี่ยเท่ากับ 40.9°C ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับใช้ออบกล้วยเล็บมือนางจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานจากการเผาไหม้ไม้ฟืน ไม่มีการสะสมพลังงานในพาราฟิน



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

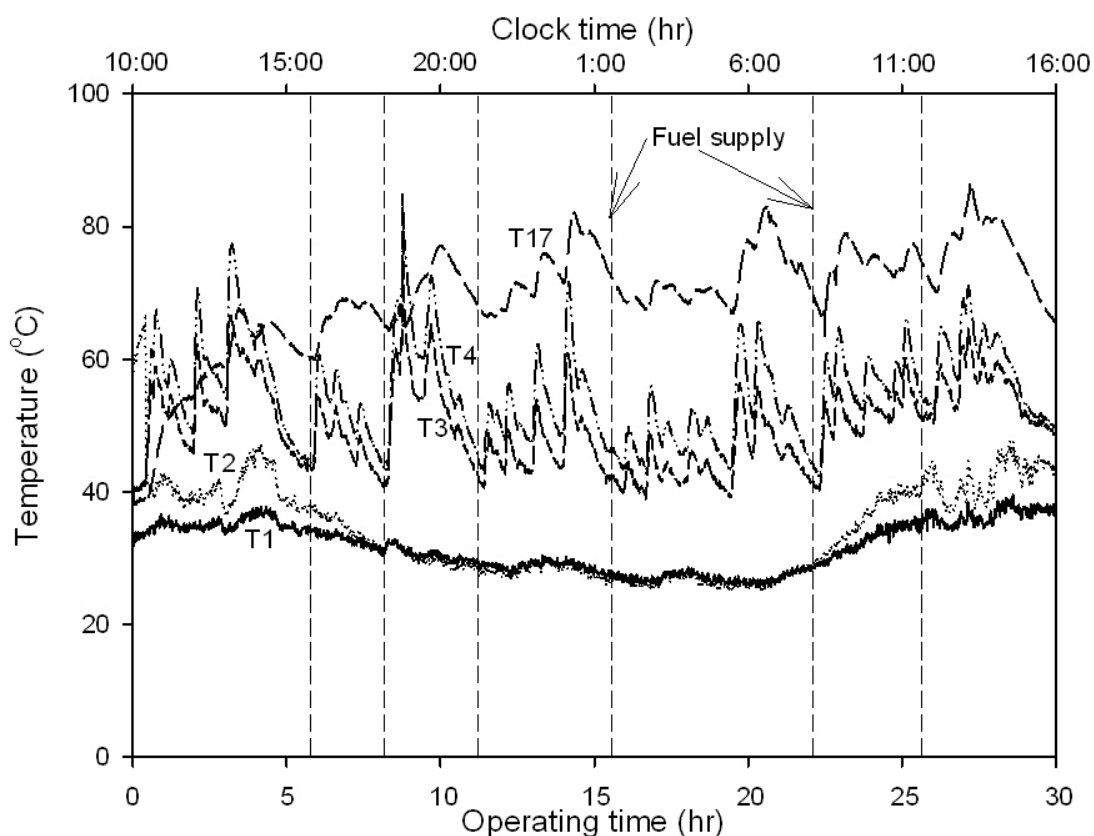
จากการทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนในช่วงกลางวันและการทดสอบพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนในช่วงกลางคืน ทำให้ทราบว่า การเผาไหม้ไม้พิน 1 เมตร จำนวน 12-20 kg สามารถผลิตความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C เมื่อพิจารณาการสะสมความร้อนในพาราฟินพบว่า กรณีการทดสอบพลังงานชีวมวลไม่มีการพาความร้อนพบว่าต้องป้อนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พาราฟินจึงสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง กรณีการทดสอบพลังงานชีวมวลมีการพาความร้อนช่วงกลางวันและกลางคืน พาราฟินสะสมความร้อนน้อย

5.1.5 พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการพาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืน

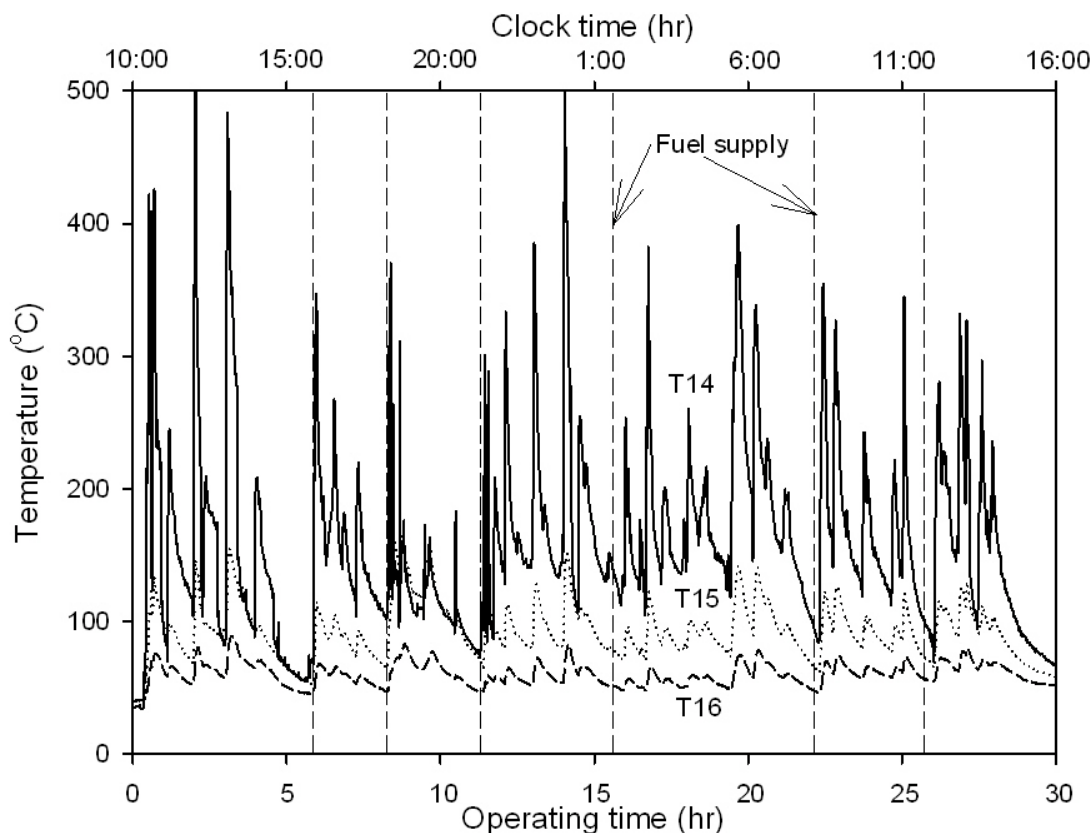
การทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการพาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืนเพื่อศึกษาการป้อนความร้อนเข้าห้องอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C ในเวลา 30 ชั่วโมง

5.1.5.1 เผาไม้พืดยาว 1 m

การทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการเผาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืนโดยเผาไม้พืดยาว 1 เมตร ซึ่งแต่ละครั้งจะป้อนไม้พืน 3 ท่อน น้ำหนักรวมแต่ละครั้งประมาณ 12-15 kg ซึ่งการเผาไหม้แต่ละครั้งเผาได้นานประมาณ 5 ชั่วโมง อุณหภูมิร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อยู่ในช่วง 40-60°C ดังรูปที่ 5.10 เนื่องจากมีการเขี่ยไม้พืนให้เผาไหม้กลางเตาเผา ส่งผลให้อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) ซึ่งมีตำแหน่งวัดอุณหภูมิกลางเตาเผา มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) ดังแสดงในรูปที่ 5.11 จากการเผาไหม้ไม้พืนกลางเตาเผาส่งผลให้อุณหภูมิในพาราฟินซึ่งมีตำแหน่งวัดอุณหภูมิอยู่กลางกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิพาราฟินแกว่งตามการเผาไหม้



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

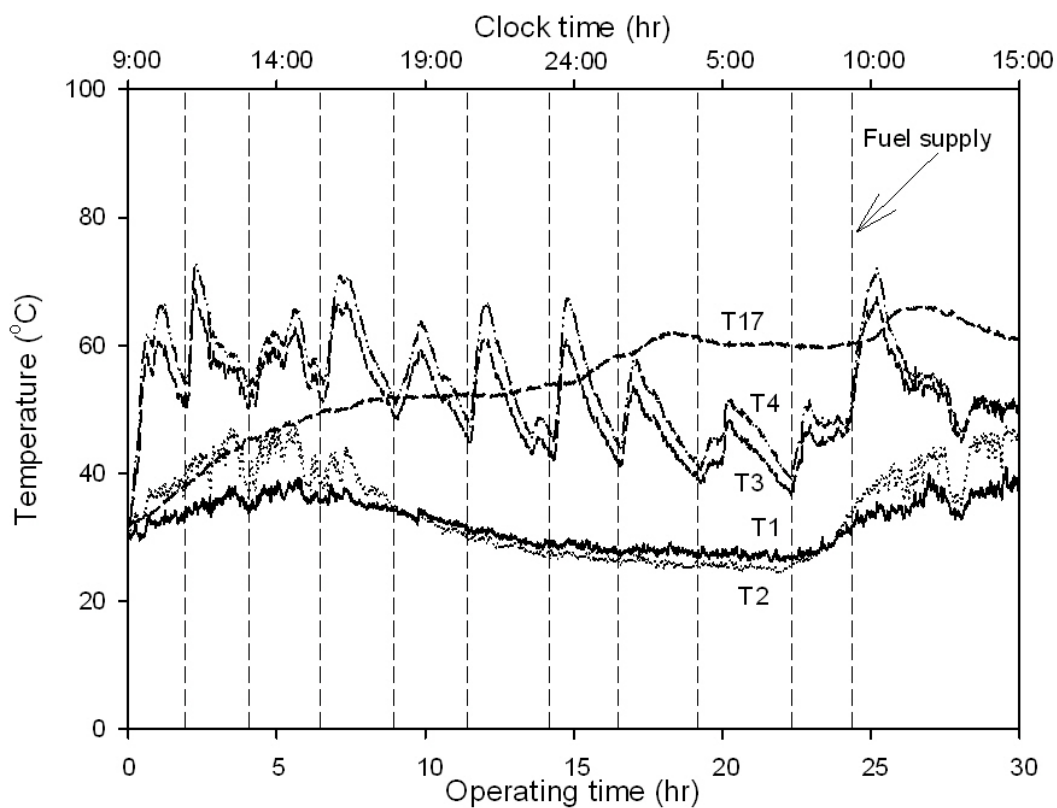


รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

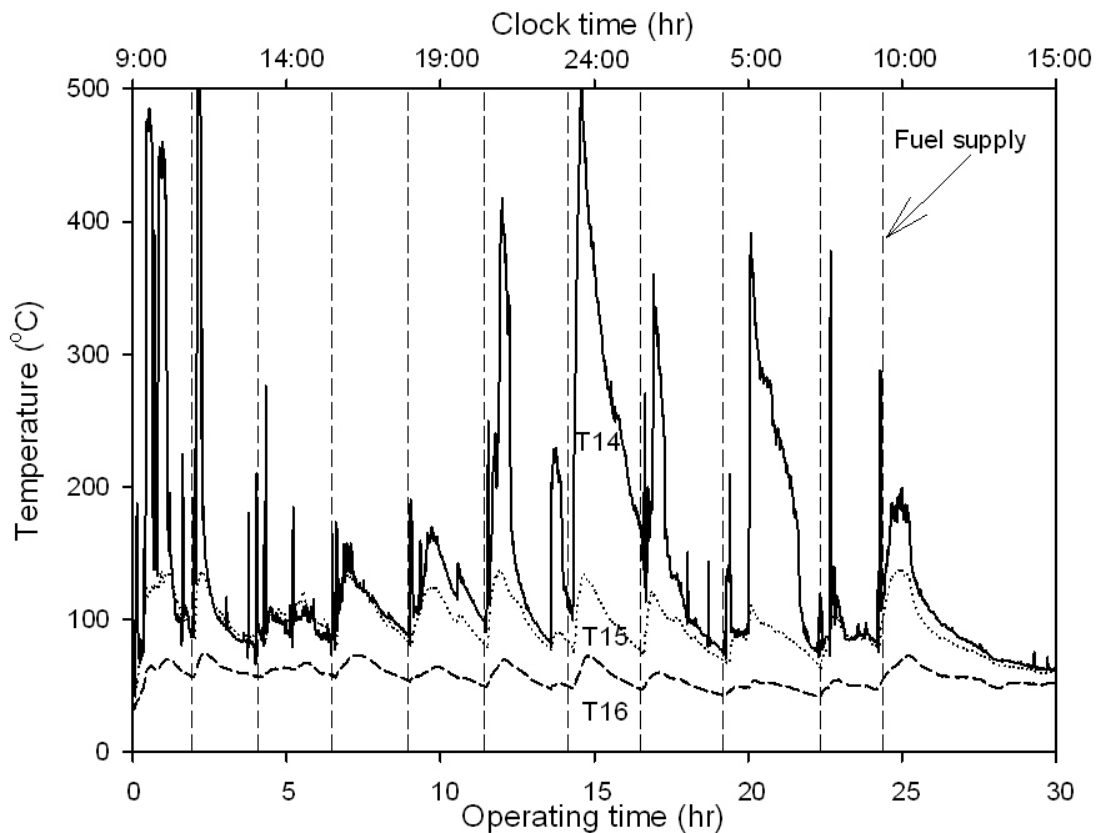
5.1.5.2 เผาไม้พืนยาว 35 cm

การทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการเผาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืน โดยเผาไม้พืนยาว 35 cm แต่ครั้งจะป้อนไม้พืน 3 ท่อน รวมน้ำหนักไม้พืนแต่ละครั้งประมาณ 6-8 kg ซึ่งเป็นน้ำหนักครึ่งหนึ่งของน้ำหนักไม้ที่ใช้แต่ละครั้งของไม้พืน 1 เมตร โดยเผาแต่ละครั้งนานประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งอุณหภูมิความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) อยู่ในช่วง 40-60°C ดังรูปที่ 5.12 ต้องป้อนไม้พืนบ่อยกว่ากรณีเผาไม้พืนยาว 1 เมตร การเผาใหม่จะเผาใหม่บริเวณกลางเตาเผาอุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) ดังแสดงในรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในพาราฟิน เนื่องจากสายวัดอุณหภูมิในพาราฟินชำรุด จำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งวัดอุณหภูมิในพาราฟินใหม่ ซึ่งตำแหน่งวัดอุณหภูมิในพาราฟินใหม่อยู่ใกล้ช่องถังอยู่นอกกลุ่มแลกเปลี่ยนความร้อนพบว่า 18 ชั่วโมงแรก พาราฟินสะสมความร้อนในรูปความร้อนสัมผัสในสถานะของแข็ง ระหว่างชั่วโมงที่ 18 ถึง ชั่วโมงที่ 25 พาราฟินสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง

ระหว่างชั่วโมงที่ 25 ถึง ชั่วโมงที่ 26 พาราฟินสะสมความร้อนในรูปความร้อนสัมผัสในสถานะของเหลวดังแสดงในรูปที่ 5.12 ช่วงเวลาทดลอง 30 ชั่วโมง มีแต่ความร้อนสะสมในพาราฟิน



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

จากการทดสอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการพาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืน กรณีเผาไม้พืนยาว 1 เมตร และกรณีเผาไม้พืนยาว 35 cm พบว่าทั้ง 2 กรณีสามารถผลิตลมร้อนอุณหภูมิอยู่ในช่วง $40-60^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งวัดอุณหภูมิในพาราฟินบริเวณกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเผาไม้พืนกลางเตาเผาอุณหภูมิในพาราฟินจะแปรผันตามอุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อนดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11 สำหรับตำแหน่งวัดอุณหภูมิในพาราฟินใหม่อยู่ใกล้ช่องถังซึ่งอยู่นอกกลุ่มท่อแลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิในพาราฟินเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ดังรูปที่ 5.12 เมื่อพิจารณาการเผาไหม้ไม้พืน กรณีเผาไม้พืนยาว 1 เมตร จะป้อนไม้พืนมากกว่ากรณีเผาไม้พืนยาว 35 cm 2 เท่า ระยะเวลาการเผาไหม้ไม้พืนกรณีเผาไม้พืนยาว 1 เมตร จะป้อนไม้พืนมากกว่ากรณีเผาไม้พืนยาว 35 cm 2 เท่า แต่กรณีเผาไม้พืนยาว 1 เมตร ต้องเผ่าเข้าไม้พืนเข้าเผาไหม้กลางเตาเผาและต้องเผ่าระวังไฟเข้าเผาไหม้ไม้พืนในช่องป้อนไม้พืนจึงไม่สะดวกสำหรับใช้งานจริง

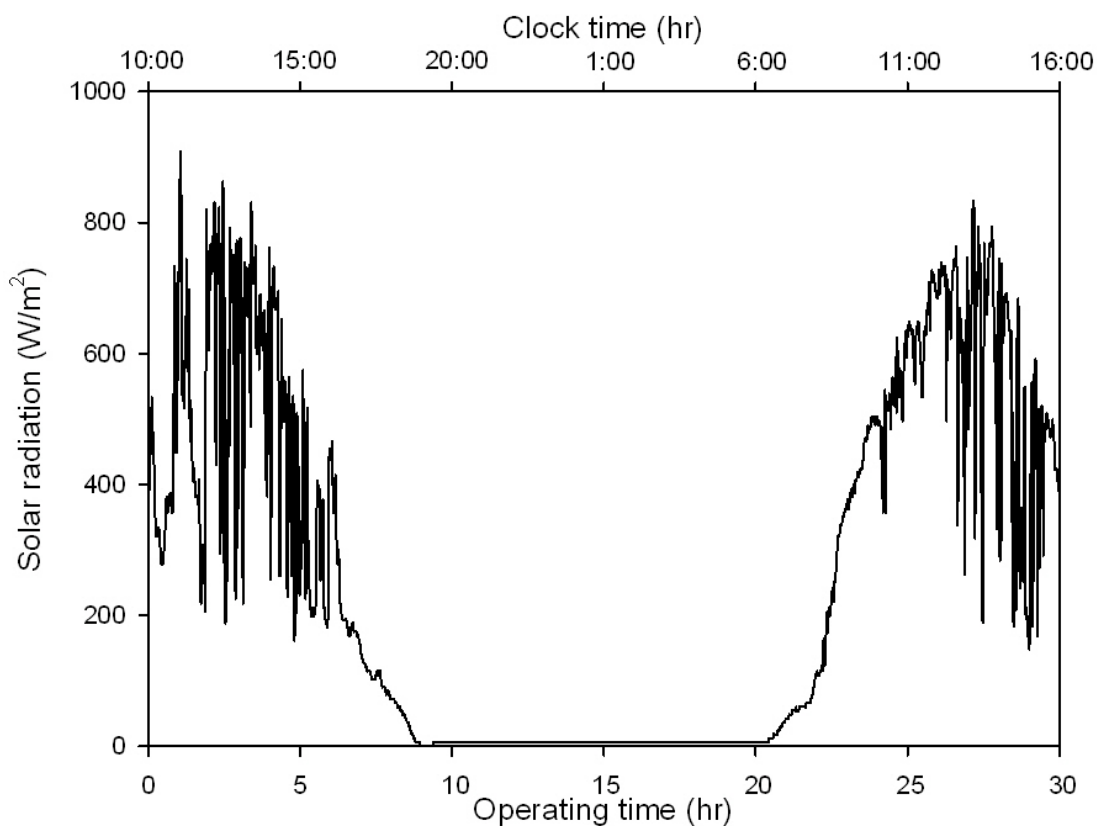
5.2 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนางด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีการพาความร้อนทั้งกลางวันและกลางคืน

5.2.1 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg โดยเผาไม้ฟืน ยาว 1 m

ทดลองในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555 อบกล้วยเล็บมือนางจำนวน 30 kg โดยเผาไม้ฟืนยาว 1 m โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล โดยวันที่ทดลองท้องฟ้ามีเมฆกระจายเป็นบางแห่ง

ความเข้มแสงอาทิตย์

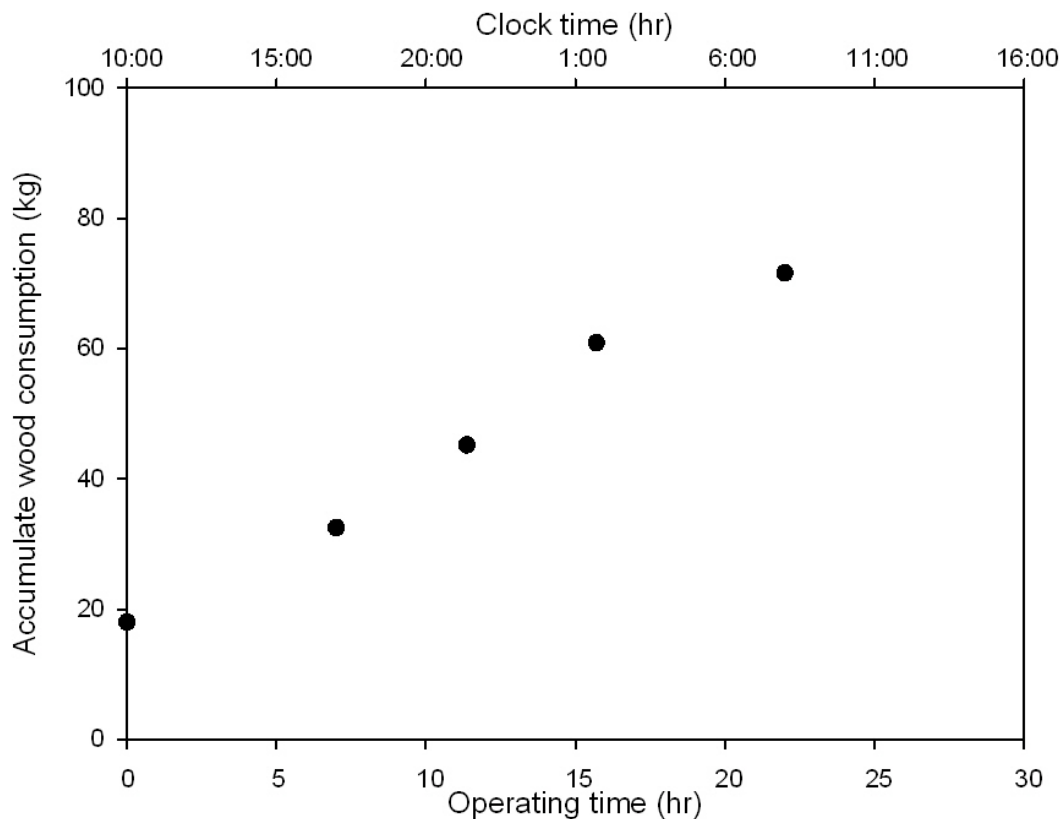
ความเข้มแสงอาทิตย์ช่วงเวลาต่างๆ ดังแสดงรูปที่ 5.14 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยวันที่ 1 มีค่า 450.7 W/m^2 วันที่ 2 มีค่า 538.6 W/m^2 สำหรับพื้นที่ผิวรับรังสีแสงอาทิตย์ขนาด 4.55 m^2 ให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในวันที่ 1 เท่ากับ 51.3 MJ วันที่ 2 เท่ากับ 62.3 MJ รวมพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดเท่ากับ 113.6 MJ



รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา

เชื้อเพลิงชีวมวล

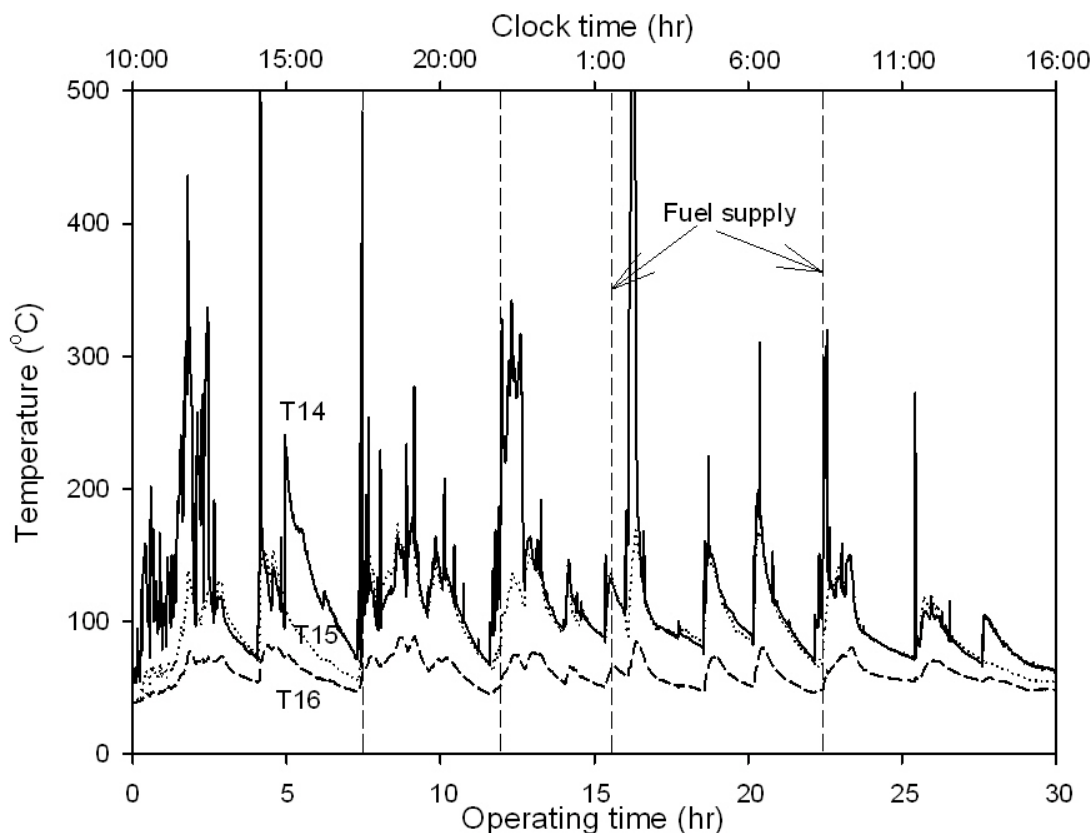
สำหรับการป้อนไม้ฟืนเนื่องจากต้องป้อนพลังงานบางส่วนสำหรับกักเก็บความร้อนในพาราฟิน ครั้งแรกป้อนไม้ฟืนจำนวน 18 kg หลังจากนั้นจะป้อนไม้ฟืนตาม การทดลองในข้อ 5.1.5.1 คือป้อนไม้ฟืนครั้งละ 3 ท่อน น้ำหนักรวมแต่ละครั้ง 12-15 kg ดังรูปที่ 5.15 เชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด 71.6 kg



รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไม้ฟืนสะสมกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อน

เนื่องจากเริ่มทดลองต้องป้อนพลังงานสำหรับกักเก็บในพาราฟิน ส่งผลให้ช่วงแรกมีการเผาไหม้อุณหภูมิสูง ไม้ฟืนที่ใช้มีความยาว 1 m สามารถป้อนครั้งเดียวเผาไหม้ได้นาน แต่ต้องคอยควบคุมการเผาไหม้ไม่ให้มากหรือน้อยเกินไป ทำให้อุณหภูมิก๊าซร้อนมีแนวโน้มตามการควบคุมการเผาไหม้ อุณหภูมิก๊าซร้อนประกอบด้วย อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T16) ดังรูปที่ 5.16 อุณหภูมิก๊าซร้อนต่างๆเฉลี่ยมีค่า 121.8 °C, 98.9 °C และ 61.2 °C ตามลำดับ

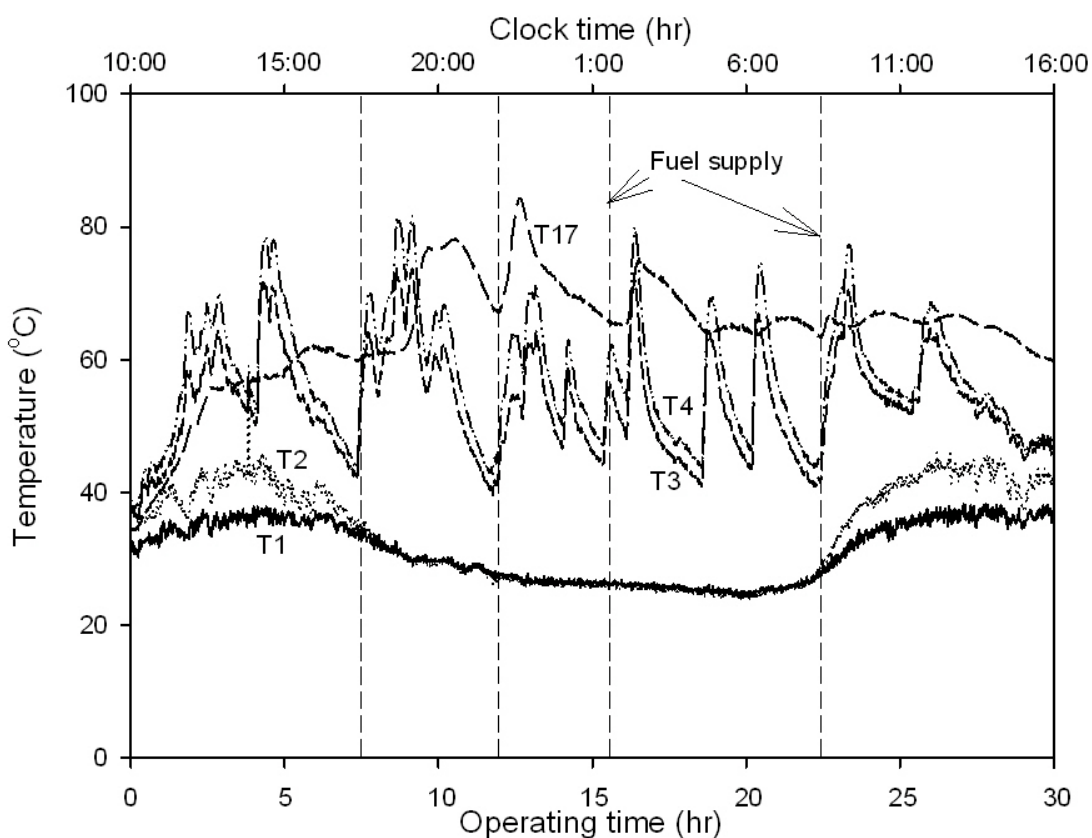


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายนอกห้องอบแห้ง

อุณหภูมิของลมร้อนภายนอกห้องอบแห้ง ประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ดังรูปที่ 5.17 พบว่า อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) มีแนวโน้มตามเข็มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) มีแนวโน้มตามการเผาไหม้ไม้ฟืน สังกะตุได้จากอุณหภูมิที่ความร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) ดังรูปที่ 5.16 สำหรับอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) เนื่องจากได้รับพลังงานบางส่วนจากอุณหภูมิที่ความร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (15) ซึ่งเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางวัน วันที่ 1 มีค่า 35.2°C และ 40.2°C ตามลำดับ เฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 1 มีค่า 27.6°C และ 27.4°C ตามลำดับและเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อน

หลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางวัน วันที่ 2 มีค่า 35.5°C และ 41.3°C ตามลำดับ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และเฉลี่ยอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ตลอดการทดลอง มีค่า 53.2°C และ 57.4°C ตามลำดับ พิจารณาอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) มีช่วงกว้างคือ $40\text{--}80^{\circ}\text{C}$ ทำให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงด้วย

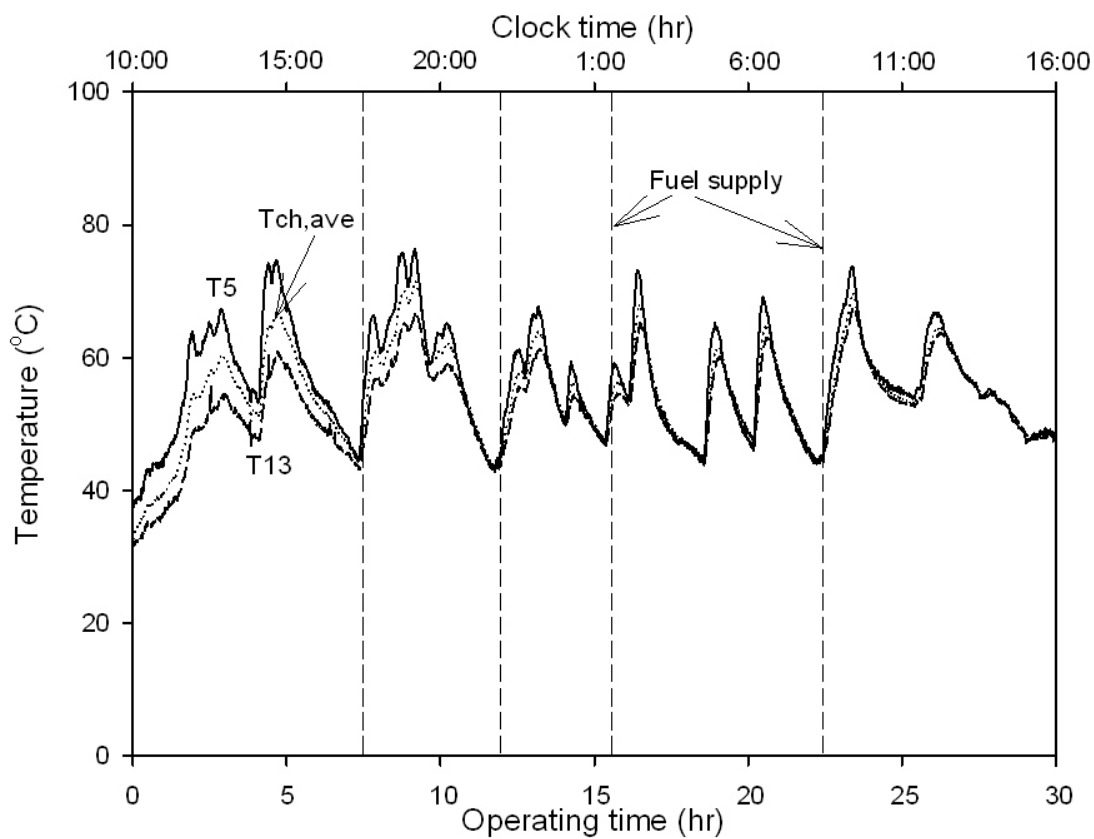


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง ($T_{ch,ave}$) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) ซึ่งอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) ผ่านห้องอบแห้งพลังงานส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ระเหยน้ำในกล้วยเล็บมือนางทำให้อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) ลดลง ซึ่งลดมากในช่วง 10 ชั่วโมงแรก ดังรูปที่ 5.18 อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยภายใน

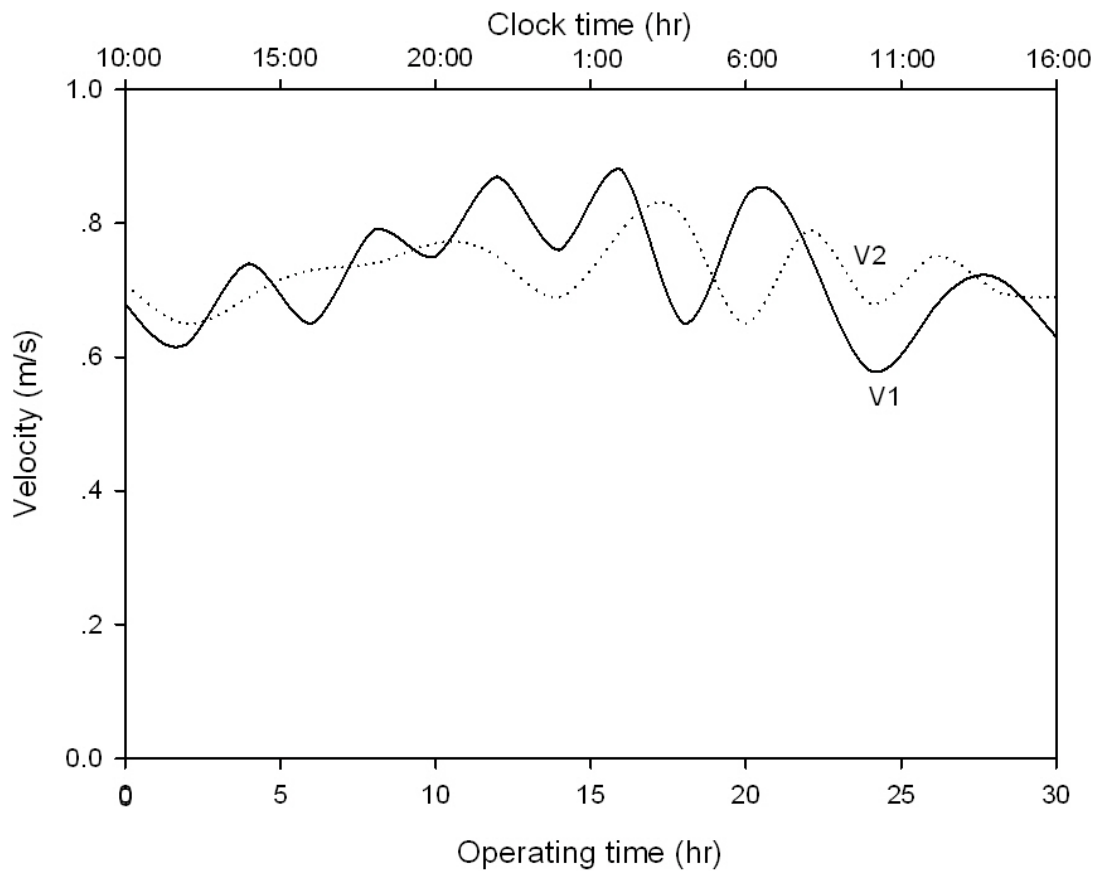
ห้องอบแห้ง (Tch,ave) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) เฉลี่ยมีค่า 56.4°C , 54.6°C และ 52.6°C ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิลมร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่งต่าง ๆ กับ เวลา

ความเร็วลม

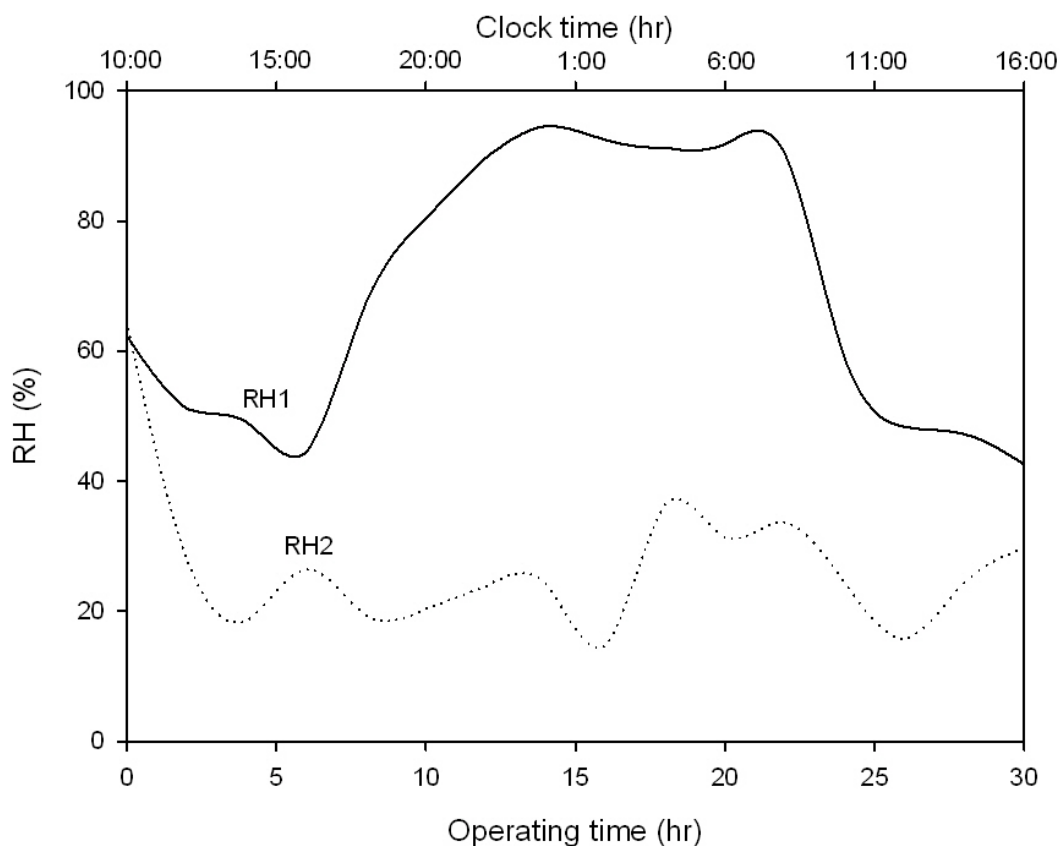
ความเร็วลมเฉลี่ยที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ ดังรูป 5.19
ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 0.72 m/s สำหรับพื้นที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ขนาด 0.21 m^2 ให้อัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}_a) เท่ากับ 0.175 kg/s



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา

ความชื้นสัมพัทธ์

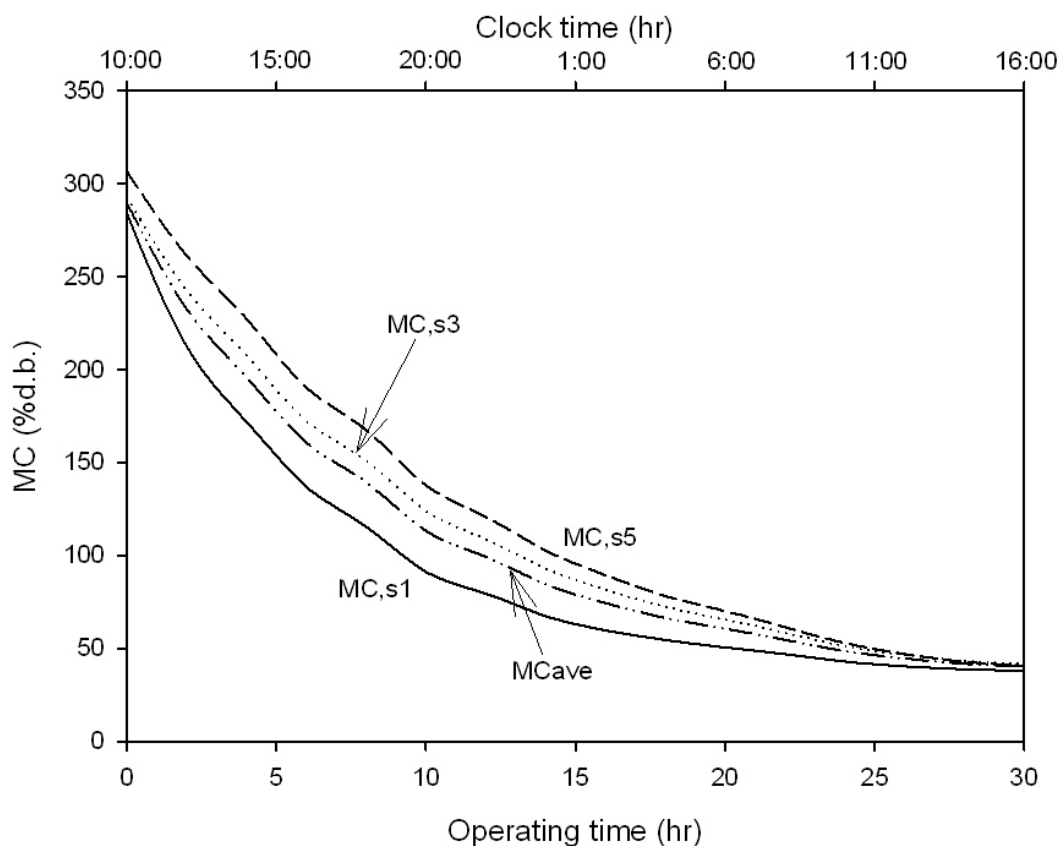
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแห้งตัวของกล้วยเล็บมือนาง โดยความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกห้องอบแห้ง (RH) มีค่าต่ำในช่วงกลางวัน และมีค่าสูงในช่วงกลางคืน และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณปล่องระบายความชื้น (RH2) มีค่าเท่ากับ 27%



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ค่าความชื้น

กล้วยเล็บมือนางเมื่อนำมาอบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล ค่าความชื้นของกล้วยเล็บมือนางจะลดลง ดังรูปที่ 5.21 กล้วยเล็บมือนางมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 289.8 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เมื่ออบแห้งเป็นเวลา 30 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้าย 40.4 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อยู่ในช่วง 40-70°C โดยอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง (Tch,ave) มีค่า 54.6°C และความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบต่ำ ทำให้น้ำบริเวณผิวระเหยเร็วทำให้น้ำในกล้วยเล็บมือนางเคลื่อนออกจากกล้วยได้ช้า เมื่อกล้วยแห้งความชื้นสุดท้ายสูง เนื่องจากการทดลองโดยเผาไม้ฟืนยาว 1 m เพิ่มภาระควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิง จึงทดลองลดความยาวไม้ฟืนเหลือ 35 cm ต่อไป



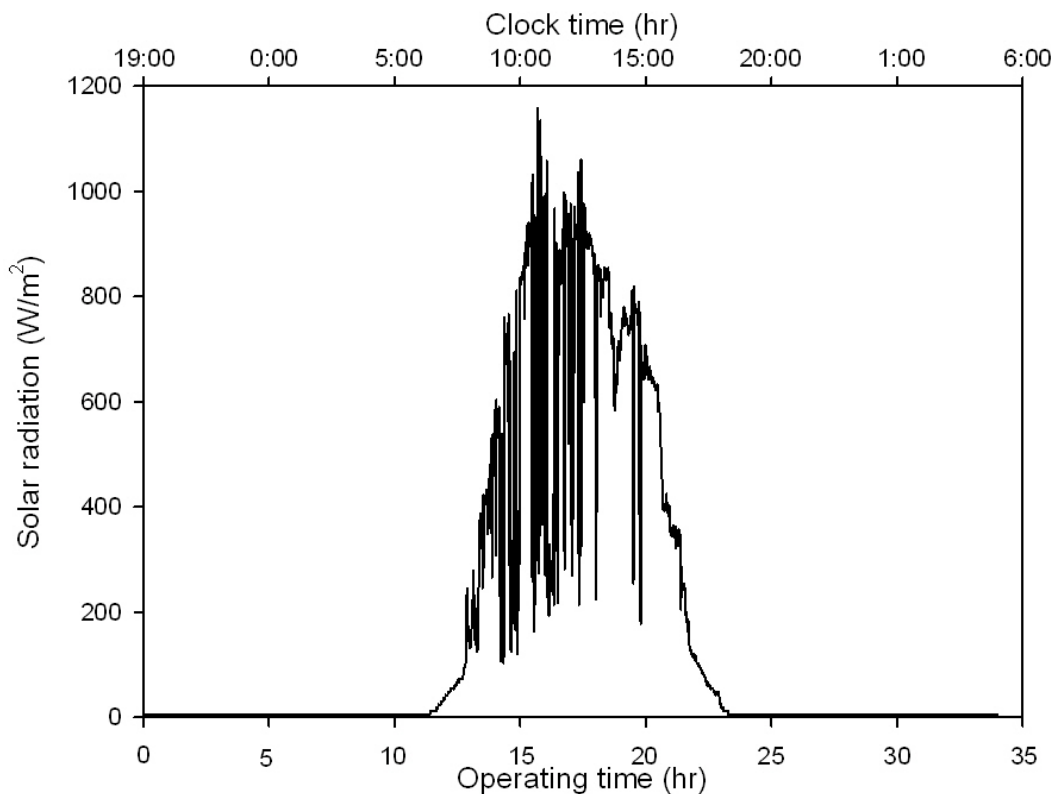
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา

5.2.2 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg โดยเผาไม้พิน ยาว 35 cm

ทดลองในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555 อบกล้วยเล็บมือนางจำนวน 30 kg โดยเผาไม้พินยาว 35 cm โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล วันที่ทดลองช่วงเช้าห้องฟาร์มมีเมฆมาก

ความเข้มแสงอาทิตย์

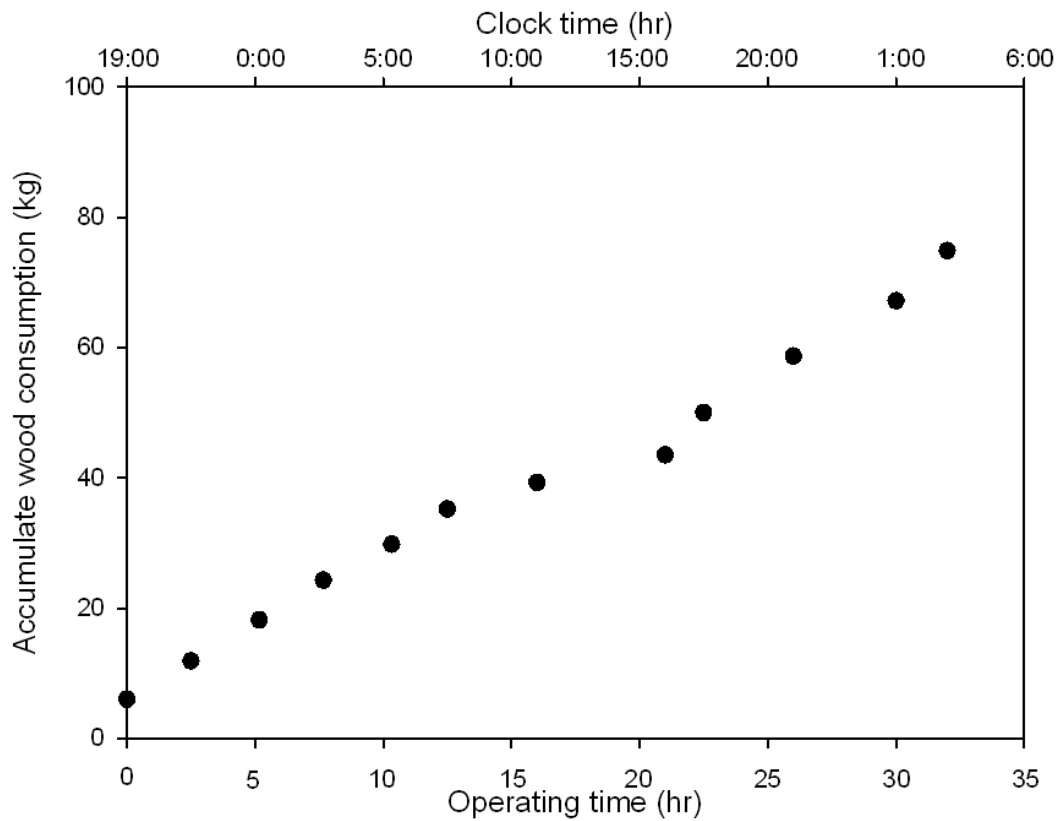
ความเข้มแสงอาทิตย์ช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.22 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ย มีค่า 606.7 W/m^2 ให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เท่ากับ 79.7 MJ



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา

เชื้อเพลิงชีวมวล

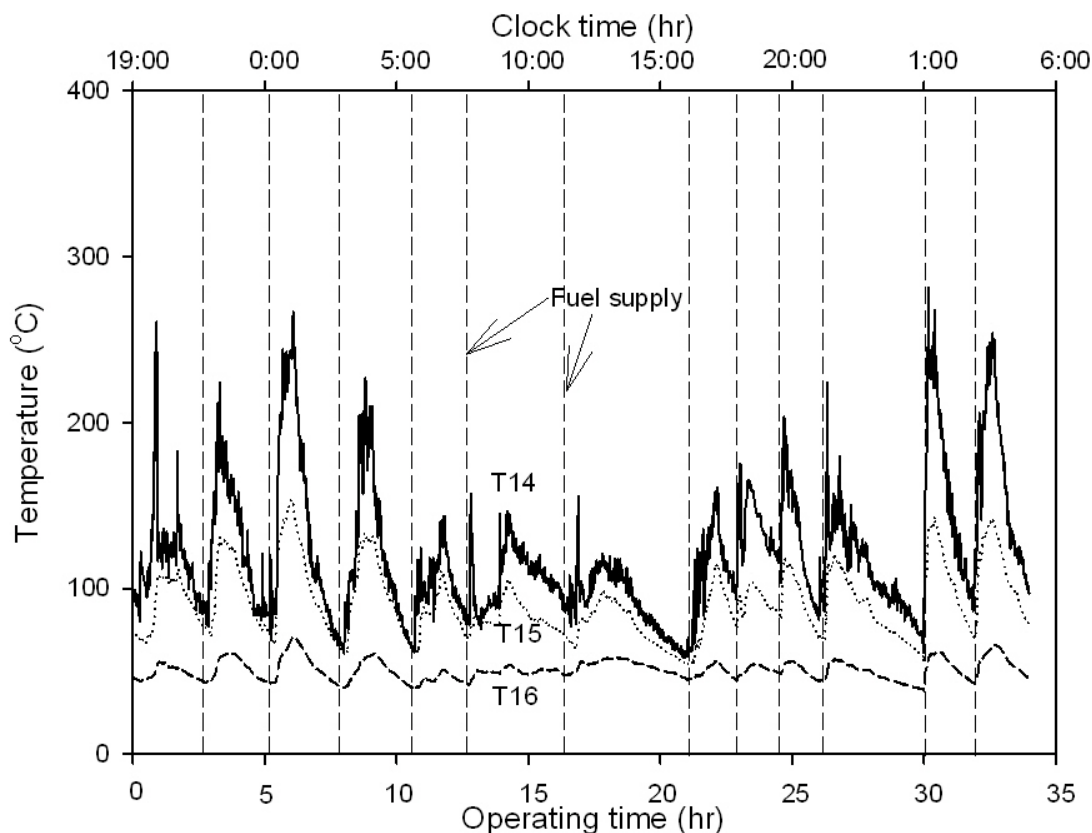
เนื่องจากการทดลอง 5.2.1 ทดลองโดยการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อสกัดเก็บความร้อนใน พาราฟินด้วย จึงต้องป้อนไม้ฟืนมาก ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งสูงในช่วงแรก ซึ่งทำให้ผิว ของกล้วยเล็บมือนางแห้ง ความชื้นสุดท้ายของกล้วยเล็บมือนางจึงสูง และไม้ฟืนยาว 1 m ความคุม การเผาไหม้ลำบาก ในการทดลองครั้งนี้จะทดลองในกรณีสถานะของพาราฟินเป็นของเหลว โดย เผาไม้ฟืนยาว 35 cm ตามการทดลองใน ข้อ 5.1.5.2 คือเติมไม้ฟืนครั้งละ 3 ท่อน น้ำหนักรวมแต่ละ ครั้ง 6-8 kg และช่วงกลางวัน 4-5 kg ซึ่งการเผาไหม้ค่อนข้างคงที่ เผาไหม้ลักษณะเป็นไฟใน ช่วงแรก หลังจากนั้นจะให้ความร้อนในรูปของถ่าน เริ่มการทดลองครั้งแรกเผาไม้ฟืน 6 kg การ ป้อนไม้ฟืนช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.23 เชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด 74.9 kg



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไม้พื้่นสะสมกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อน

อุณหภูมิก๊าซร้อนมีแนวโน้มตามการเผาไหม้ไม้พื้่น ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T16) ดังรูปที่ 5.24 อุณหภูมิก๊าซร้อนต่างๆเฉลี่ยมีค่า 120.2 °C, 90.8 °C และ 50.9 °C ตามลำดับ

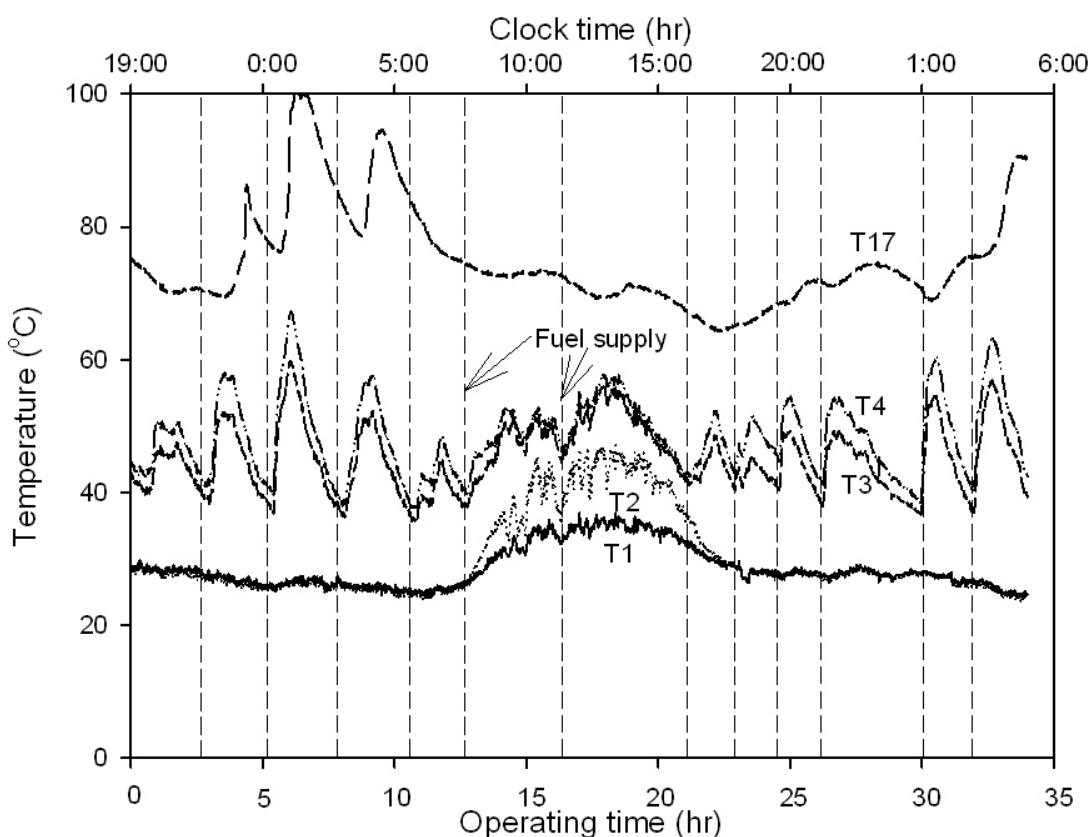


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายนอกห้องอบแห้ง

อุณหภูมิอากาศของลมร้อนภายนอก ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศภายนอก (T1), อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2), อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ดังรูปที่ 5.25 ซึ่งเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 1 มีค่า 26.8°C และ 26.5°C เนื่องจากช่วงกลางวันอากาศได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางวัน วันที่ 2 มีค่า 33.6°C และ 40.4°C และเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 2 มีค่า 27.5°C และ 27.2°C , อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และเฉลี่ยอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ตลอดการทดลอง มีค่า 45.3°C และ 48.6°C เนื่องจากการทดลอง ในข้อ 5.2.1 ทดลองที่อุณหภูมิสูง ผิดกฏร้ายแรงเร็ว การทดลองครั้งนี้จึงค่อย ๆ ป้อนให้อุณหภูมิที่ค่อยมีอุณหภูมิสูงขึ้น อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์

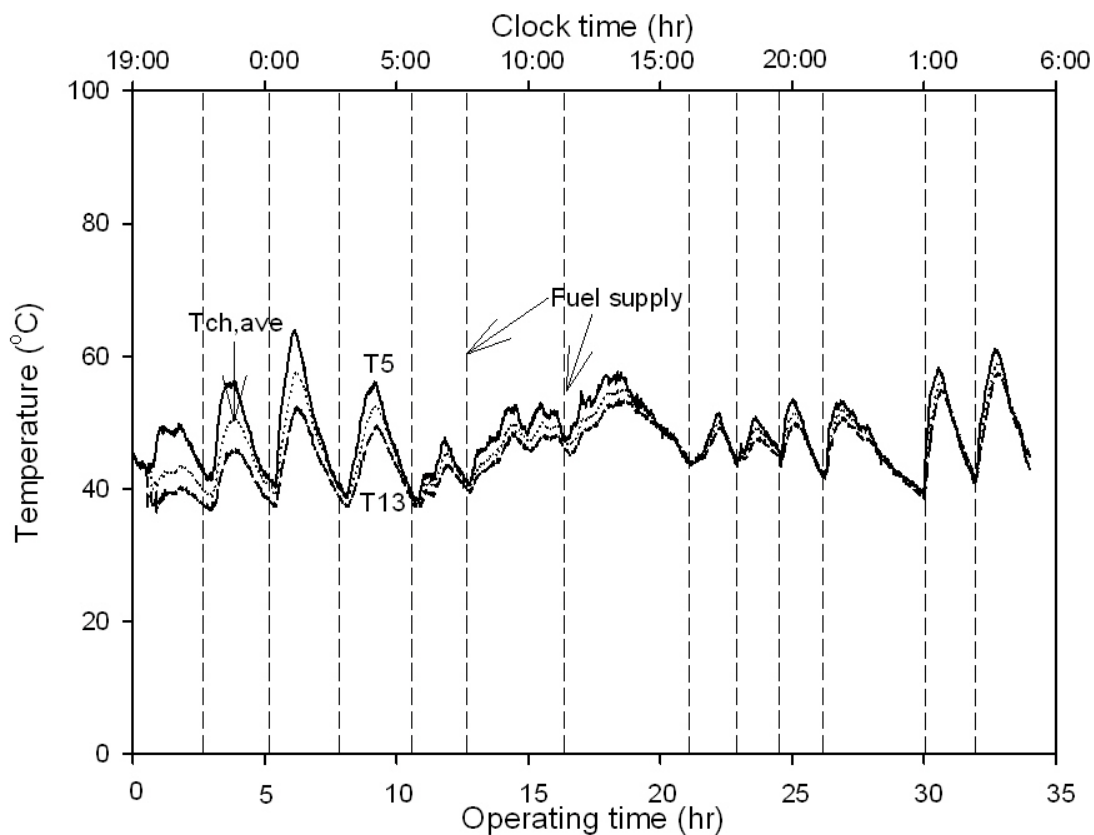
แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ในช่วงแรกจึงไม่สูงมากนัก พลังงานสะสมในพาราฟินขึ้นตามการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิในพาราฟิน (T17) พลังงานสะสมในพาราฟินถูกนำไปใช้ในช่วง 1.00 น. – 7.00 น. ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดน้ำค้างอากาศค่อนข้างเย็น



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิมืดร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

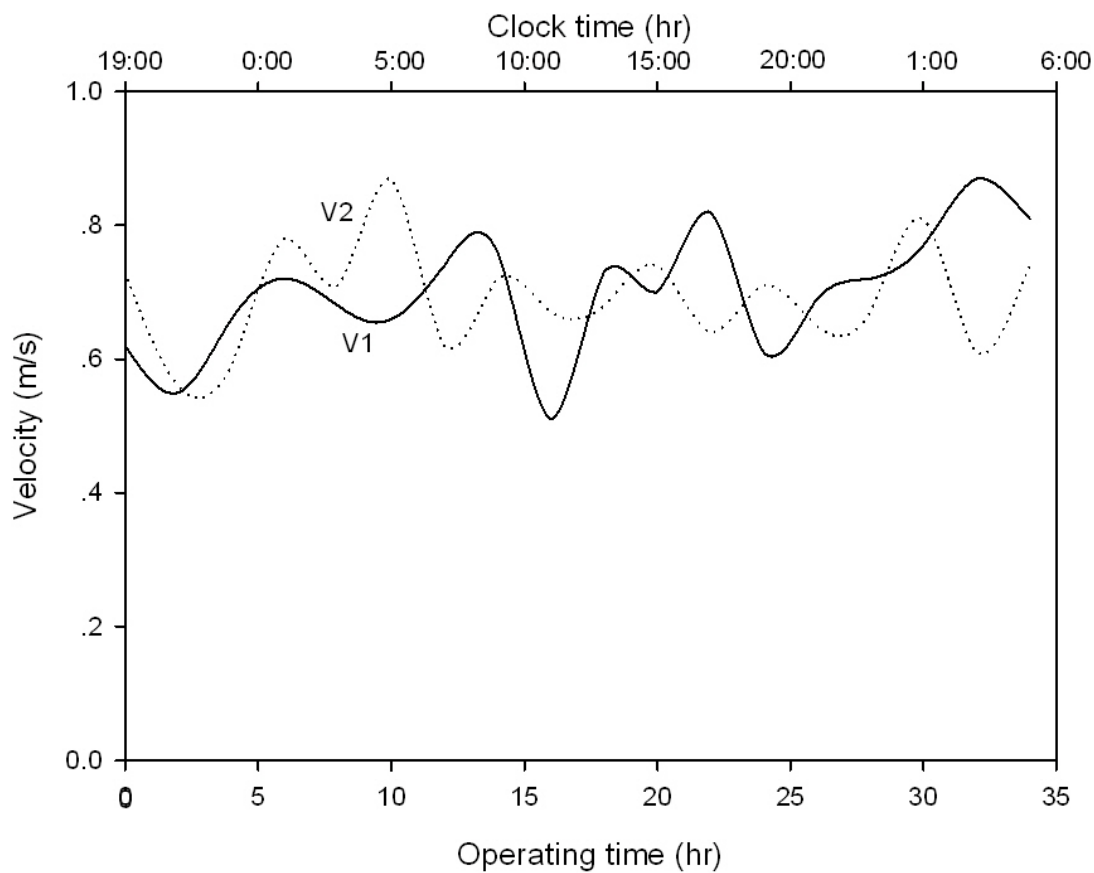
อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งประกอบด้วย อุณหภูมิมืดร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อุณหภูมิมืดร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง ($T_{ch,ave}$) และอุณหภูมิมืดร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) ดังรูปที่ 5.26 อุณหภูมิมืดร้อนต่าง ๆ เฉลี่ยมีค่า 48.5°C , 46.9°C และ 45.3°C ตามลำดับ พบว่าช่วง 10 ชั่วโมงแรก ความร้อนถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำจากกล้วยมากส่งผลให้ อุณหภูมิมืดร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) และอุณหภูมิมืดร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) แตกต่างกันมาก



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่งต่าง ๆ กับ เวลา

ความเร็วลม

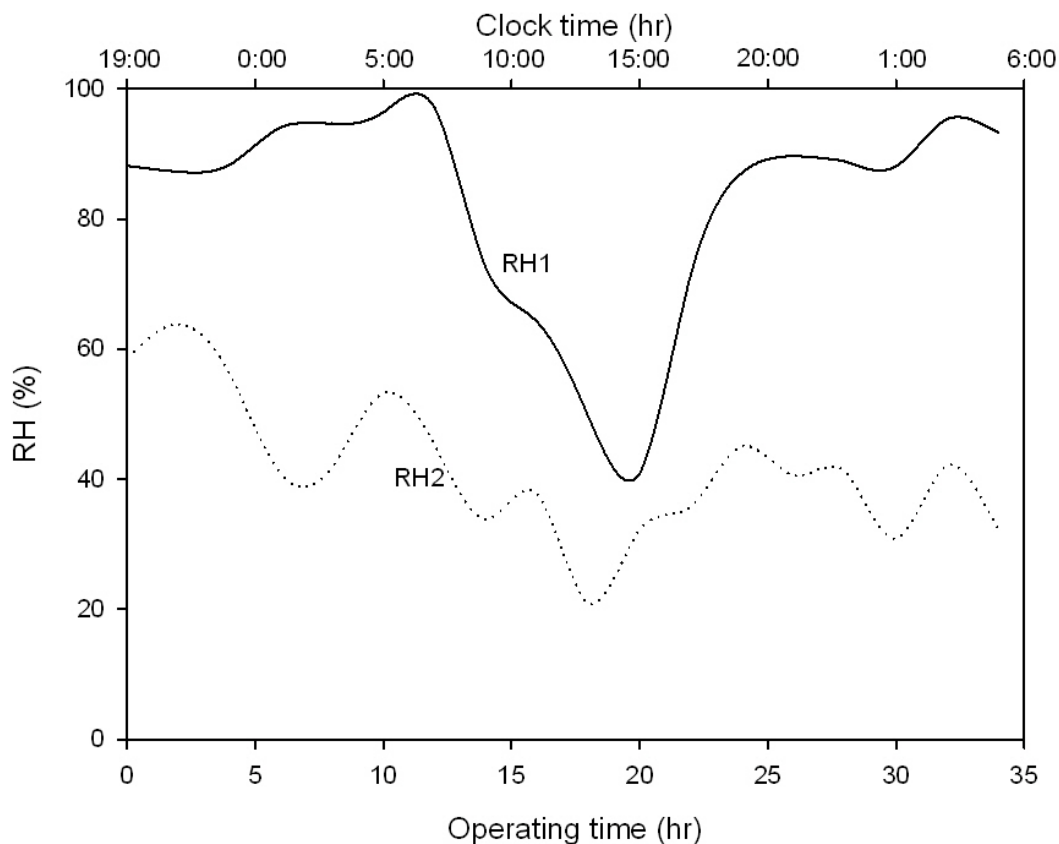
ความเร็วลมเฉลี่ยที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.27 ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 0.70 m/s สำหรับพื้นที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ขนาด 0.21 m^2 ให้อัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}_a) เท่ากับ 0.172 kg/s



รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา

ความชื้นสัมพัทธ์

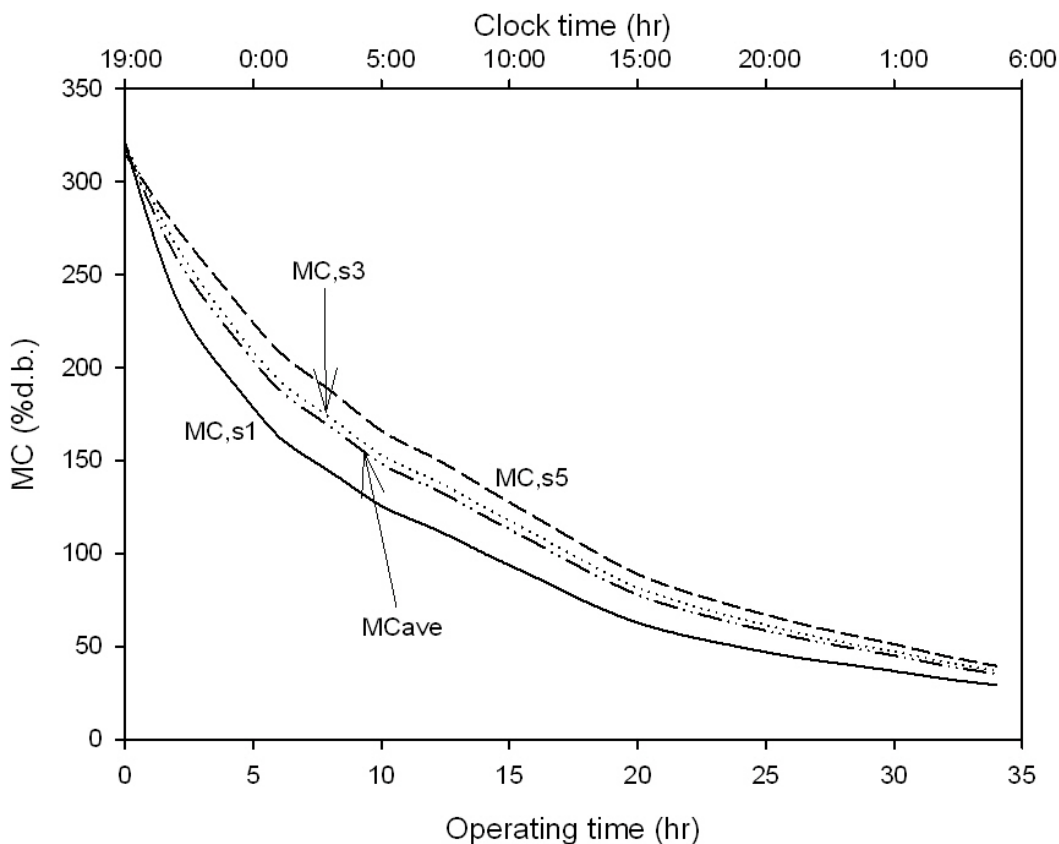
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกห้องอบแห้ง (RH) มีค่าต่ำในช่วงกลางวัน และมีค่าสูงในช่วงกลางคืน และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณปล่องระบายความชื้น (RH2) มีค่าสูงในช่วงแรก เนื่องจากน้ำระเหยออกจากกล้วยเล็บมือนางมาก



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ค่าความชื้น

กล้วยเล็บมือนางเมื่อนำมาอบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล ค่าความชื้นของกล้วยเล็บมือนางจะลดลง ดังรูปที่ 5.29 กล้วยเล็บมือนางมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 319.1 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เมื่ออบแห้งเป็นเวลา 34 ชั่วโมง 35.2 เหลือความชื้นสุดท้าย เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง พบว่าเนื่องจาก 10 ชั่วโมงแรก ผลต่างระหว่างอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) มีค่ามากเนื่องจากการนำความร้อนไปใช้ระเหยน้ำ ซึ่งกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1 (MC,s1) อัตราการแห้งเร็ว และกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) ช้าที่สุด ซึ่งผลต่างของความชื้นสุดท้ายของกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1 (MC,s1) และกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) ห่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เนื่องจากมีผลต่างของความชื้นของกล้วยเล็บมือนางในแต่ละชั้นมาก การทดลองครั้งต่อไปจะสลับถาด ในชั่วโมงที่ 10 เนื่องจากช่วงนี้มีผลต่างของความชื้นมากที่สุด



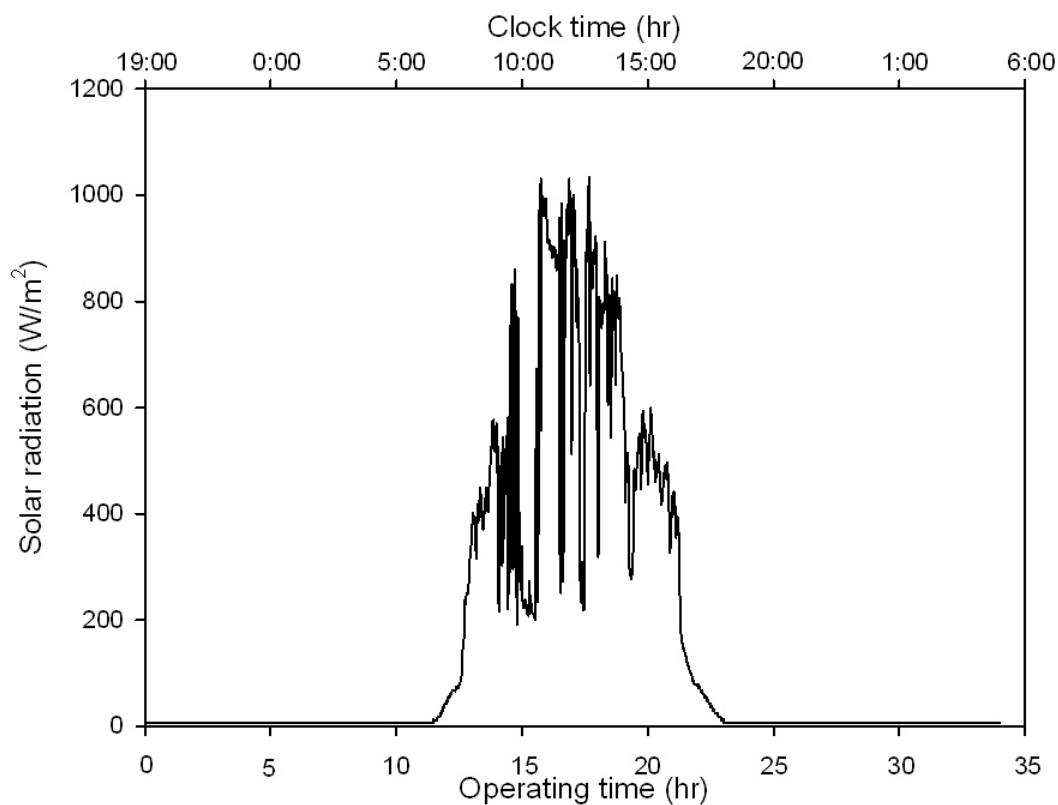
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา

5.2.3 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg โดยเผาไม้พิน ยาว 35 cm (สลับถาด)

ทดลองในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555 อบกล้วยเล็บมือนางจำนวน 30 kg โดยเผาไม้พินยาว 35 cm โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล การทดลองครั้งนี้จะทดลองตามเงื่อนไขคล้ายกับการทดลองข้อ 5.2.2 ซึ่งจะสลับถาดในชั่วโมงที่ 10 วันที่ทดลองช่วงเช้ามีเมฆเป็นหย่อม ๆ

ความเข้มแสงอาทิตย์

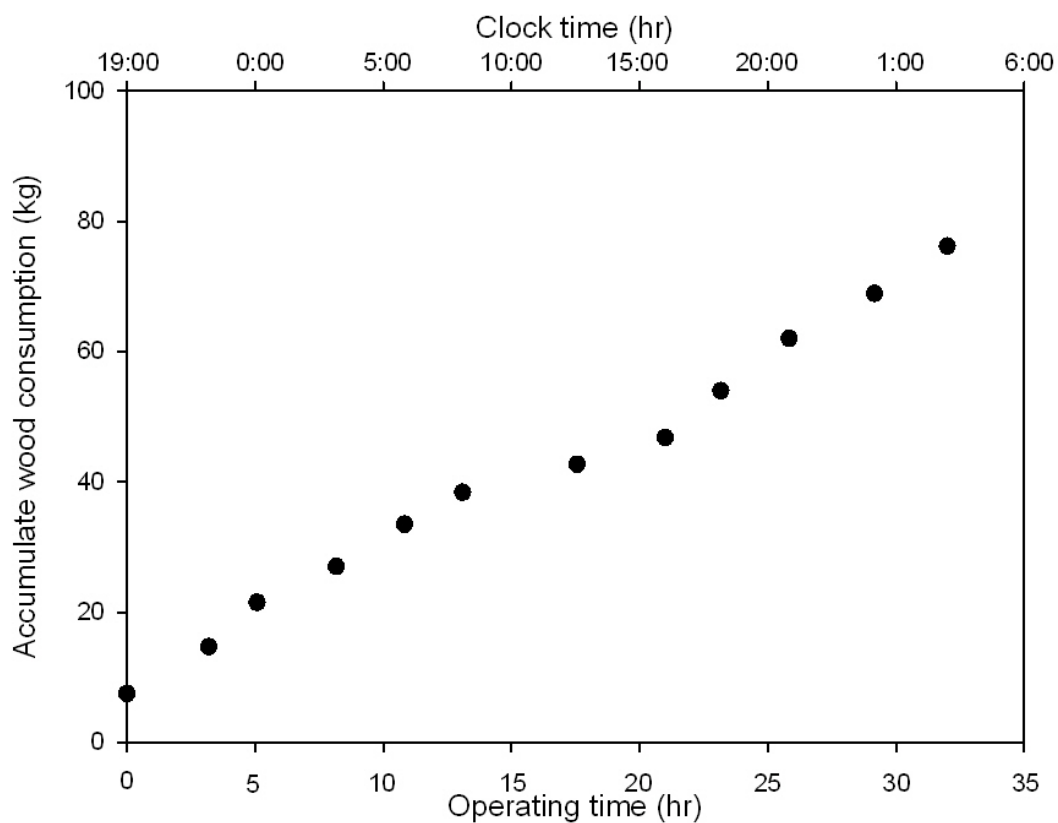
ความเข้มแสงอาทิตย์ช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.30 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ย มีค่า 548.4 W/m^2 ให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เท่ากับ 72.1 MJ



รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา

เชื้อเพลิงชีวมวล

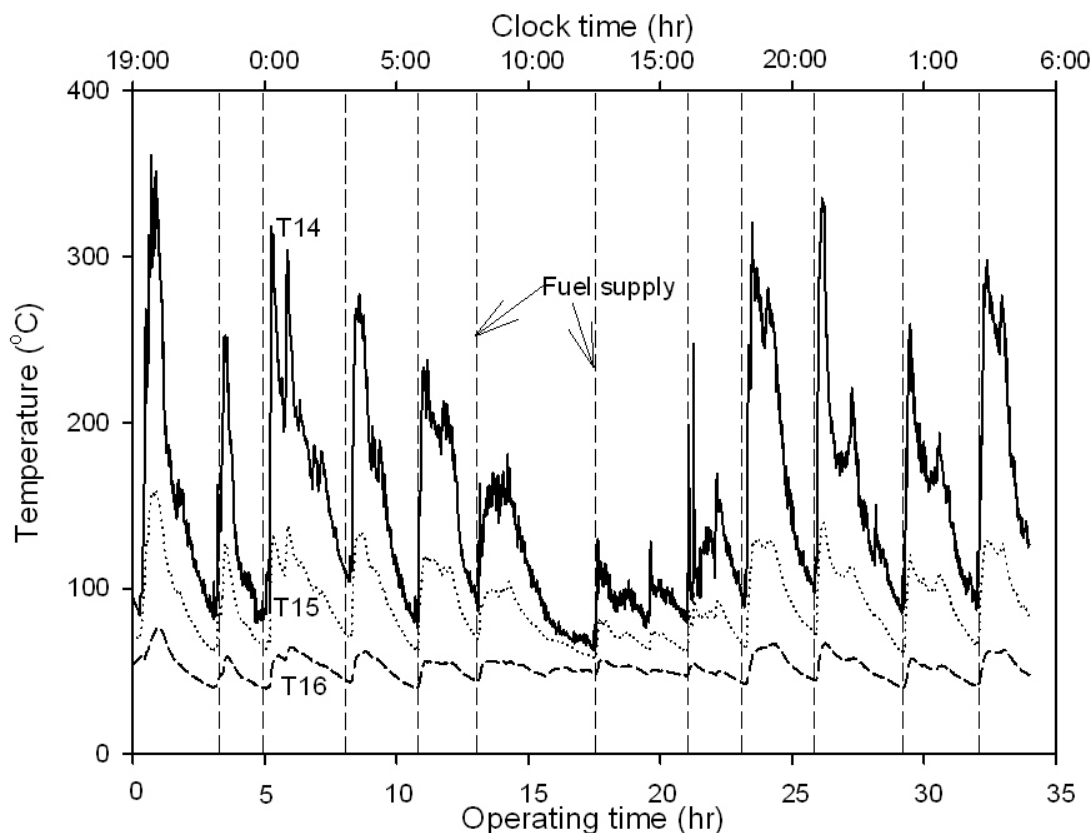
การทดลองครั้งนี้ ทดลองในกรณีสถานะของพาราฟินเป็นของเหลว เหมือนการทดลองข้อ 5.2.2 โดยเผาไม้พินยาว 35 cm เดิมไม้พินครั้งละ 3 ท่อน น้ำหนักรวมแต่ละครั้ง 6-8 kg และในช่วงกลางวันเผาไม้พิน 4-5 kg โดยป้อนเชื้อเพลิงครั้งแรก 7.5 kg การป้อนไม้พินช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.31 เชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด 76.2 kg



รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไม้พืนสะสมกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อน

อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T16) ดังรูปที่ 5.32 อุณหภูมิก๊าซร้อนต่าง ๆ เฉลี่ยมีค่า 149.9°C, 91.2°C และ 52.4°C ตามลำดับ

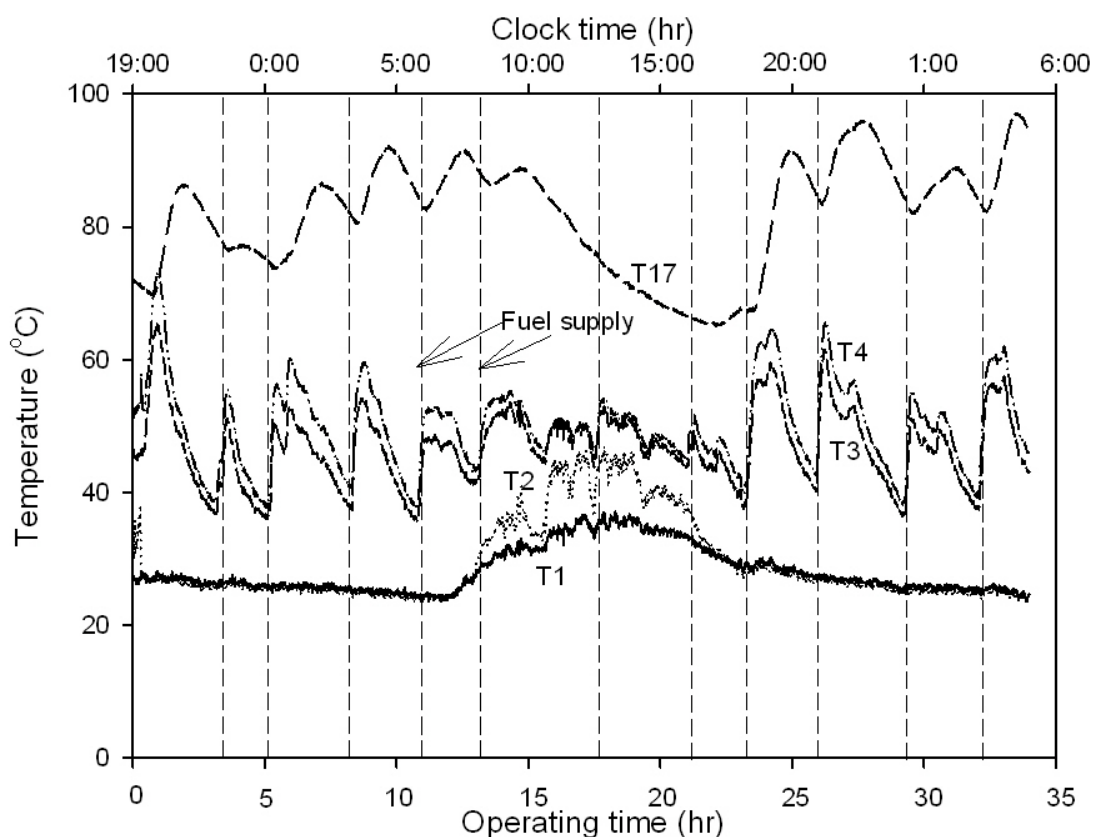


รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบลมร้อนภายนอกห้องอบแห้ง

อุณหภูมิอากาศของลมร้อนภายนอกห้องอบแห้ง ซึ่งระบบลมร้อนประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศภายนอก (T1), อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2), อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ดังรูปที่ 5.33 ซึ่งเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 1 มีค่า 26.1°C และ 26.1°C , เฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางวัน วันที่ 2 มีค่า 33.7°C และ 39.6°C และเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 2 มีค่า 26.9°C และ 26.4°C , อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และเฉลี่ยอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ตลอดการทดลอง มีค่า 46.8°C และ 50.1°C การทดลองครั้งนี้อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ค่อยเพิ่มอย่างช้าในชั่วโมงแรก หลังจากนั้นมีการเผาไหม้มากส่งผลให้อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) เพิ่มสูงขึ้นขึ้นถึง 70°C หลังจากนั้นอุณหภูมิอยู่

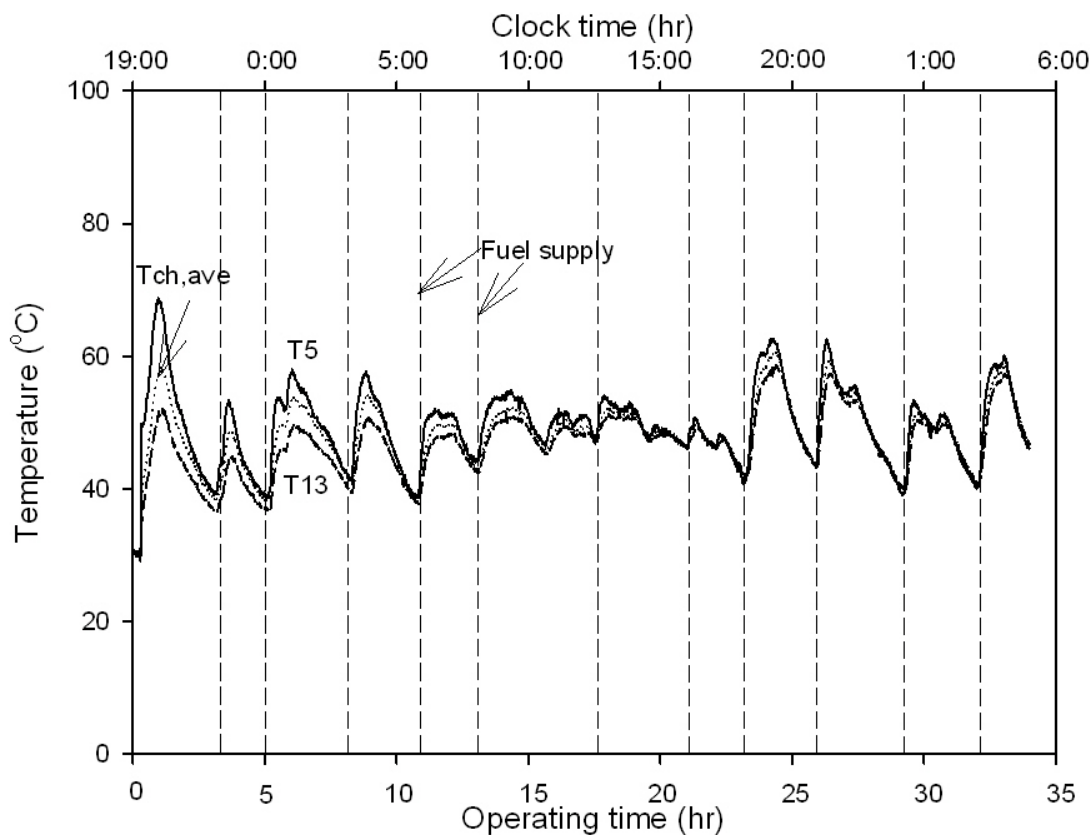
ในช่วง $40-60^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาพลังงานสะสมในพาราฟิน พบว่าพาราฟินสะสมพลังงานอย่างต่อเนื่องจนถึงเวลา 10.00 น. หลังจากนั้นพลังงานในพาราฟินถูกนำไปใช้ในชั้เวลากลางวันซึ่งอุณหภูมิของพาราฟินลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงกลางวันและสะสมพลังงานความร้อนใหม่ในช่วงกลางคืน



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

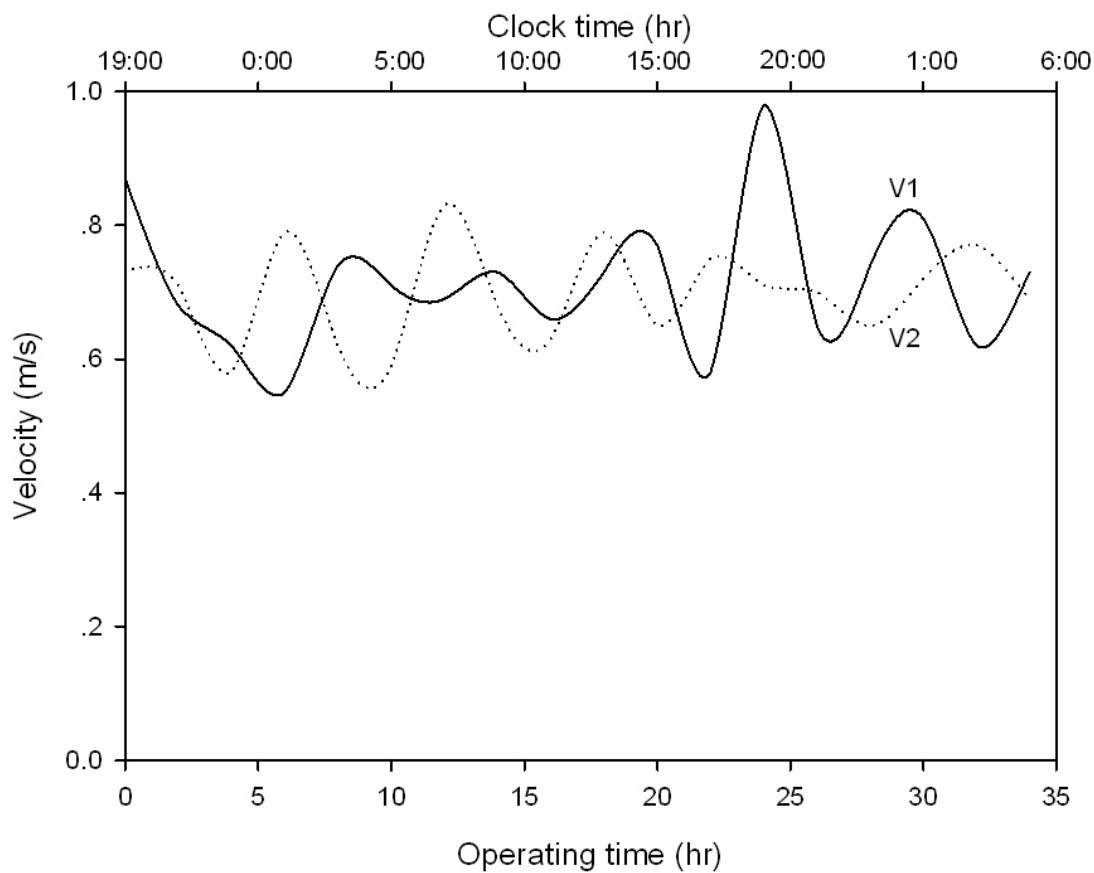
อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งประกอบด้วย อุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง ($T_{ch,ave}$) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) ดังรูปที่ 5.34 อุณหภูมิลมร้อนต่าง ๆ เฉลี่ยมีค่า 49.6°C , 48.3°C และ 46.8°C ตามลำดับ พบว่าผลต่างของอุณหภูมิลมร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) มีความแตกต่างกันมากในช่วง 20 ชั่วโมงแรก



รูปที่ 5.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่งต่าง ๆ กับ เวลา

ความเร็วลม

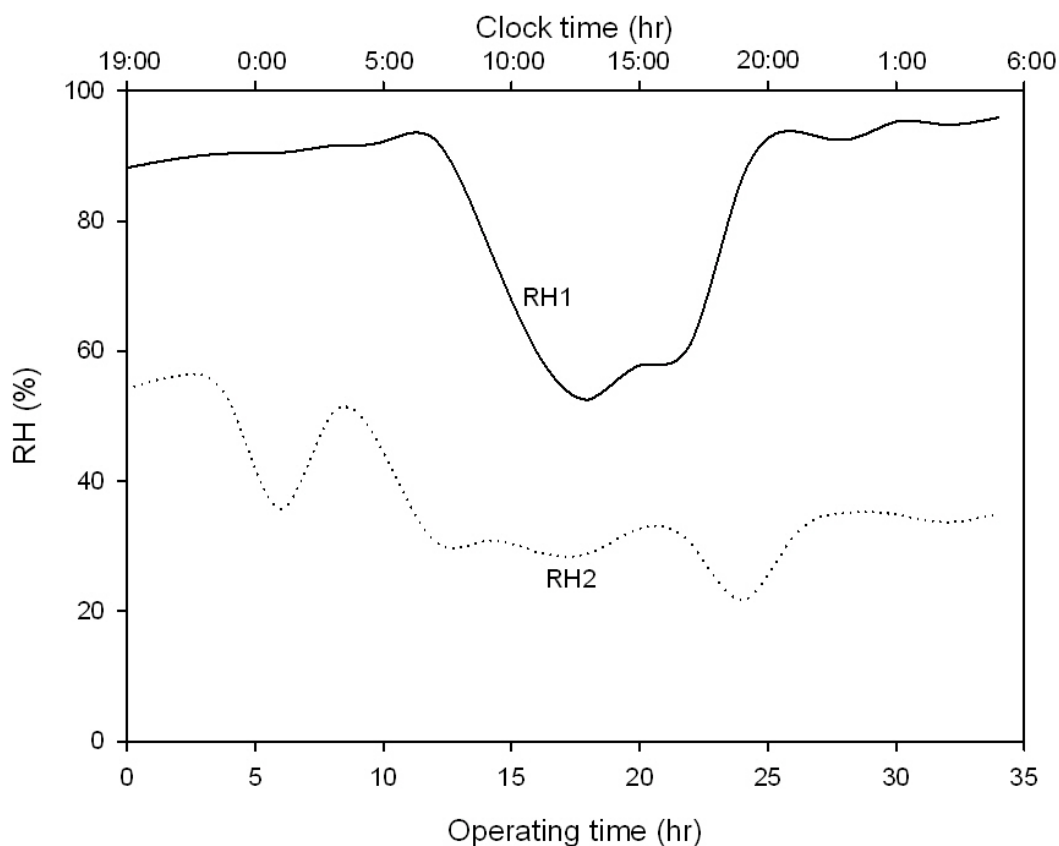
ความเร็วลมเฉลี่ยที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.35 ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 0.71 m/s สำหรับพื้นที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ขนาด 0.21 m² ให้อัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}_a) เท่ากับ 0.175 kg/s



รูปที่ 5.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา

ความชื้นสัมพัทธ์

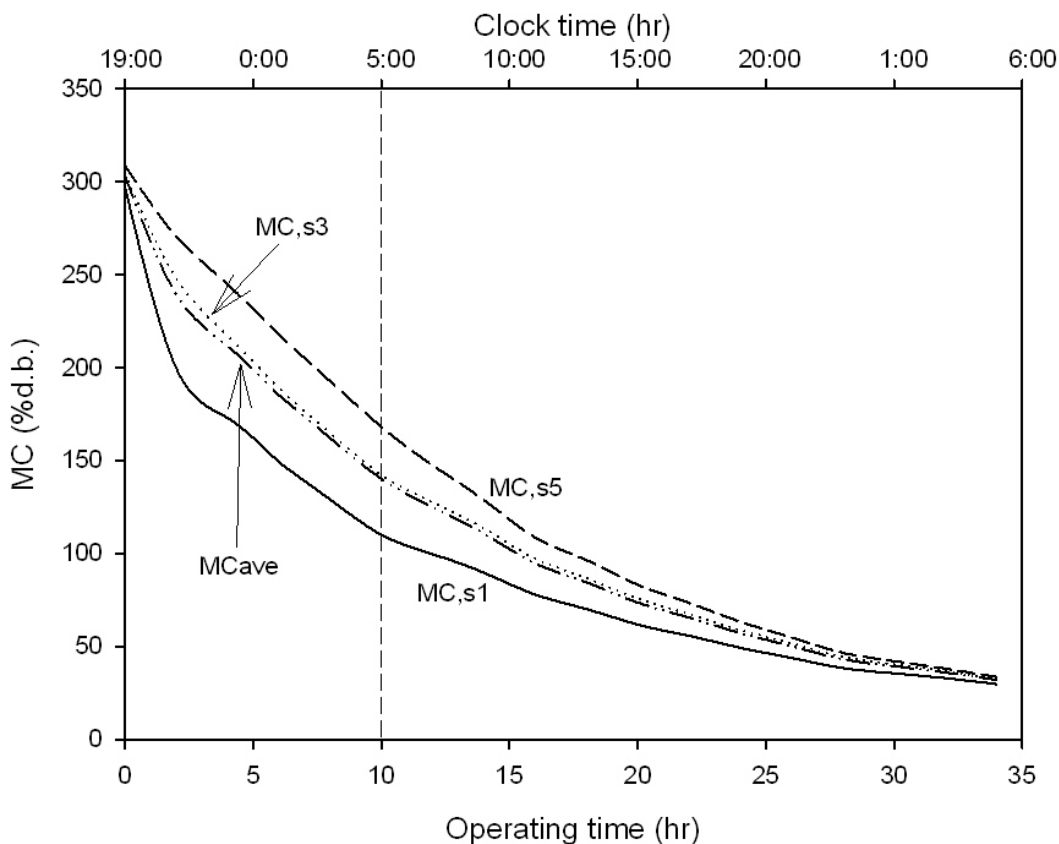
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกห้องอบแห้ง (RH) มีค่าต่ำในช่วงกลางวัน และมีค่าสูงในช่วงกลางคืน และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณปล่องระบายความชื้น (RH2) มีค่าสูงในช่วงแรก เนื่องจากน้ำระเหยออกจากกล้วยเล็บมือนางมาก



รูปที่ 5.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ค่าความชื้น

กล้วยเล็บมือนางเมื่อนำมาอบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล ค่าความชื้นของกล้วยเล็บมือนางจะลดลง ดังรูปที่ 5.37 กล้วยเล็บมือนางมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 303.6 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เมื่ออบแห้งเป็นเวลา 34 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้าย 31.9 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง การทดลองครั้งนี้สลับภาคในชั่วโมงที่ 10 พบว่า กล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) มีความชื้นลดลงเร็วขึ้น ซึ่งผลต่างของความชื้นสุดท้ายของกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1 (MC,s1) และ กล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) ห่างกัน 3.8 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง การทดลองต่อไปจะทดลองอบ กล้วยเล็บมือนางเต็มความจุของห้องอบแห้ง ซึ่งสามารถบรรจุกล้วยได้ 60 kg



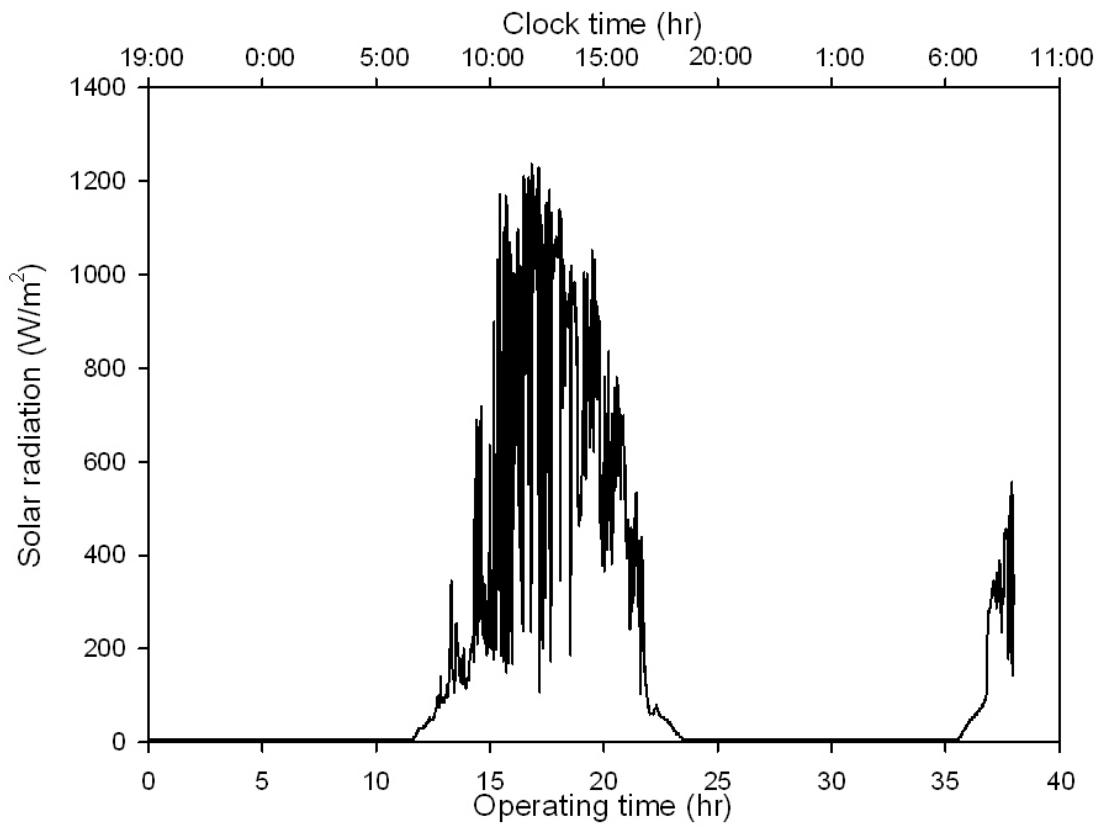
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา

5.2.4 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 60 kg โดยเผาไม้ฟืน ยาว 35 cm (สลัปดาห์)

ทดลองในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556 อบกล้วยเล็บมือนางจำนวน 60 kg โดยเผาไม้ฟืนยาว 35 cm โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล การทดลองครั้งนี้ทดลองคล้าย การทดลองข้อ 5.23

ความเข้มแสงอาทิตย์

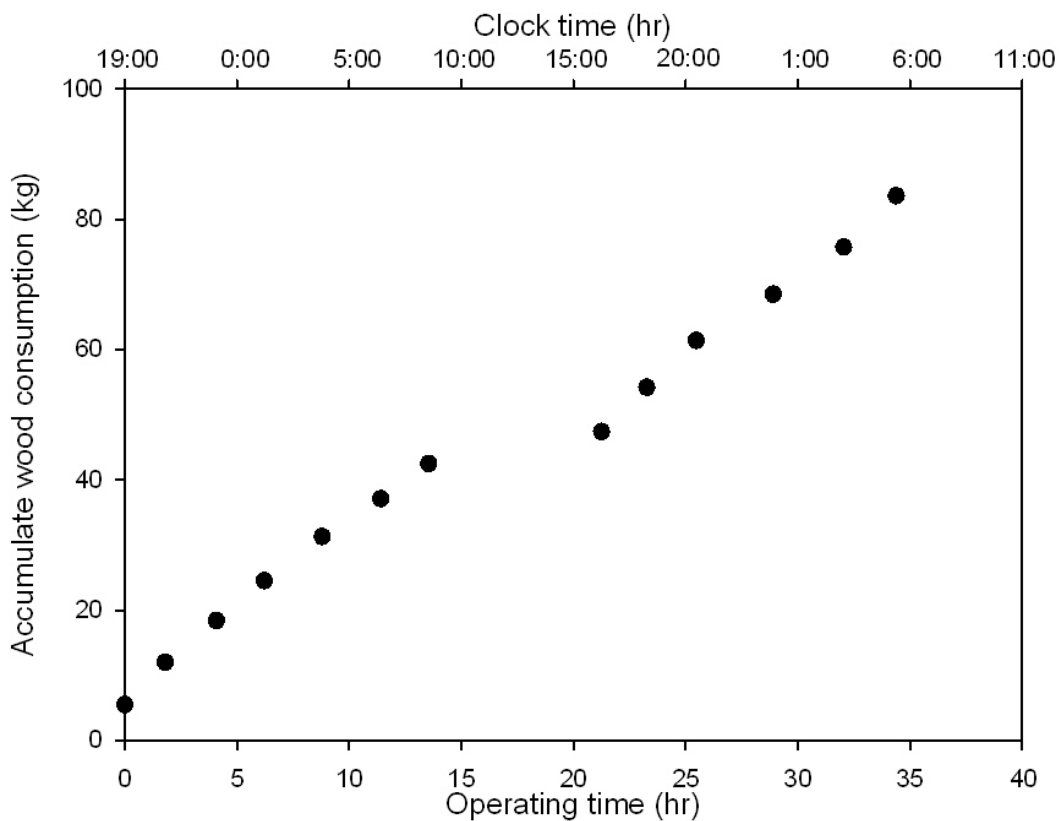
ความเข้มแสงอาทิตย์ช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.38 ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ย มีค่า 635.4 W/m^2 ให้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เท่ากับ 83.5 MJ



รูปที่ 5.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา

เชื้อเพลิงชีวมวล

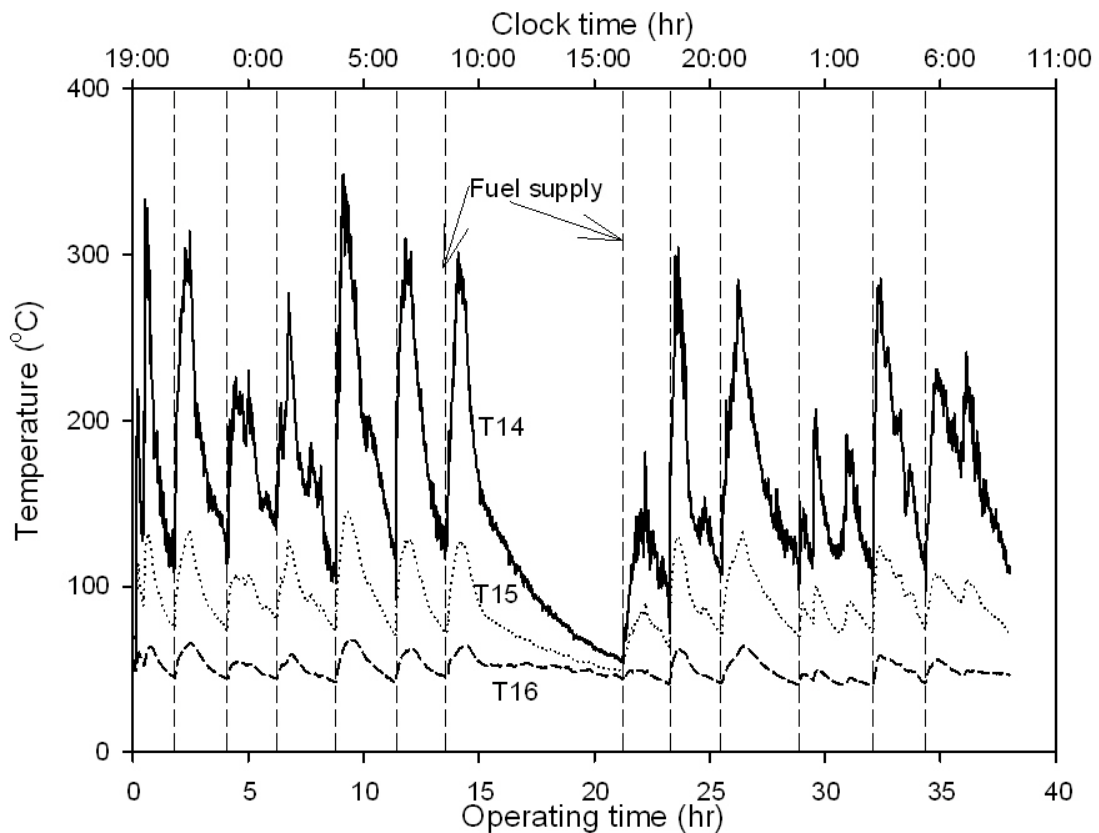
การทดลองครั้งนี้ ทดลองในกรณีสถานะของพาราฟินเป็นของเหลว โดยเผาไม้พินยาว 35 cm เติมไม้พินครั้งละ 3 ท่อน น้ำหนักรวมแต่ละครั้ง 6-8 kg และในช่วงกลางวันเผาไม้พิน 4-5 kg โดยป้อนเชื้อเพลิงครั้งแรก 5.5 kg ครั้งแรกป้อนเชื้อเพลิงน้อยเนื่องจากอุณหภูมิในพาราฟินมีค่าสูงกว่า การทดลองข้อ 5.2.2 และ 5.2.3 หลังจากนั้นป้อนไม้พินตามปกติ การป้อนไม้พินช่วงเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.39 เชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด 83.6 kg



รูปที่ 5.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการป้อนไม้พืนสะสมกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของก๊าซร้อน

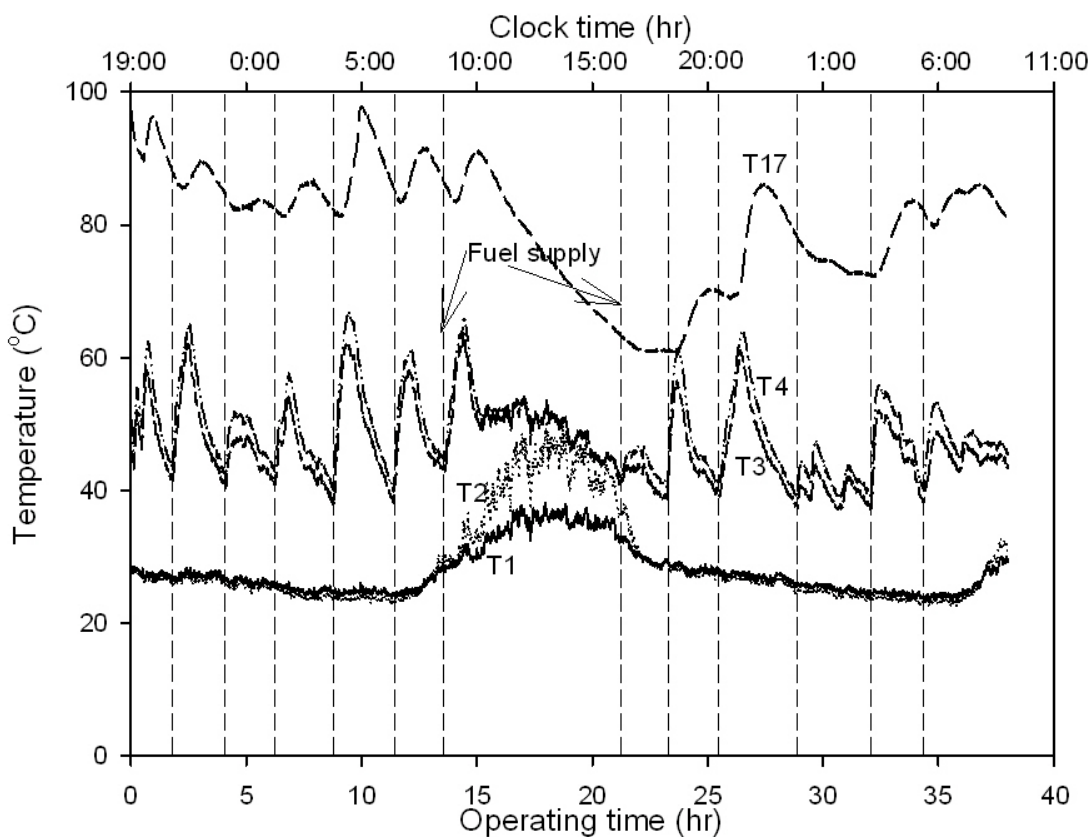
อุณหภูมิก๊าซร้อนประกอบด้วย อุณหภูมิก๊าซร้อนก่อนเข้าอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T14) อุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T15) และอุณหภูมิก๊าซร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T16) ดังรูปที่ 5.40 อุณหภูมิก๊าซร้อนต่าง ๆ เฉลี่ยมีค่า 162.2°C , 90.0°C และ 51.0°C ตามลำดับ



รูปที่ 5.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อนภายนอกห้องอบแห้ง

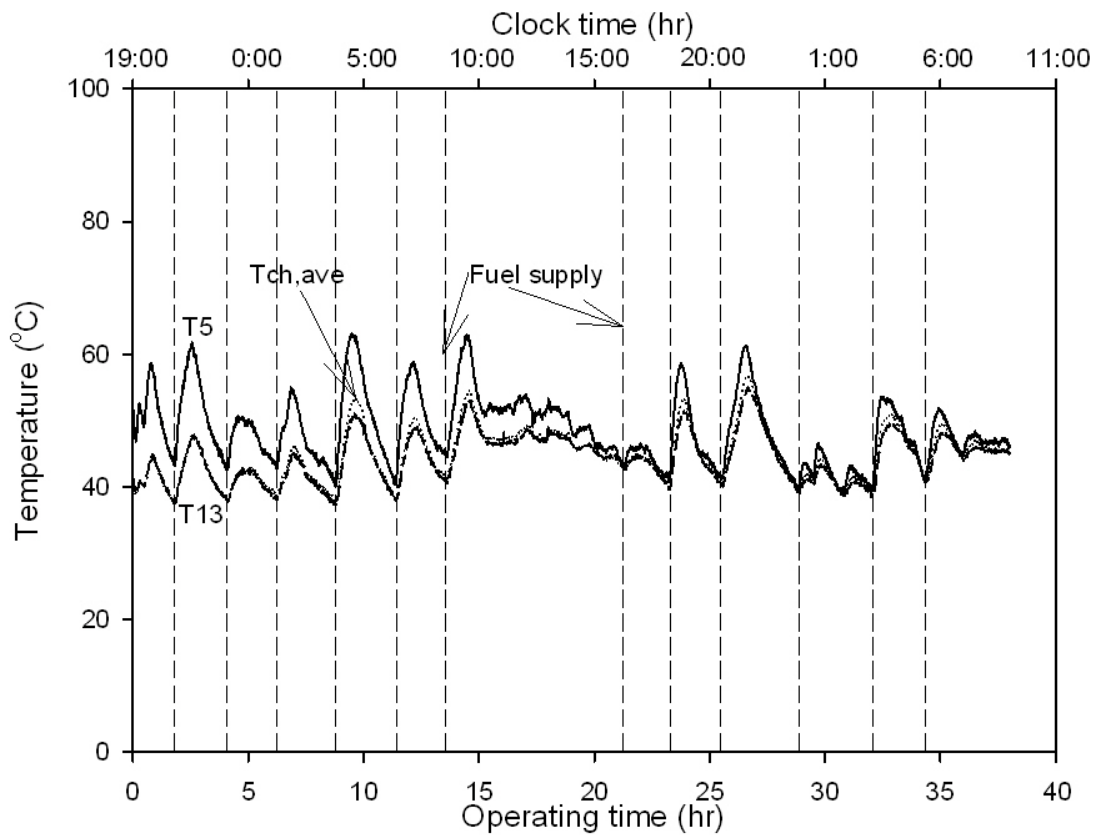
อุณหภูมิอากาศของลมร้อน ซึ่งระบบลมร้อนประกอบด้วย อุณหภูมิอากาศภายนอก (T1), อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2), อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ดังรูปที่ 5.41 ซึ่งเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 1 มีค่า 26.1°C และ 25.4°C , เฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางวัน วันที่ 2 มีค่า 33.9°C และ 40.4°C และเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศภายนอก (T1) และ อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (T2) ช่วงกลางคืน วันที่ 2 มีค่า 26.3°C และ 25.8°C , อุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์กักเก็บความร้อน (T3) และเฉลี่ยอุณหภูมิลมร้อนหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T4) ตลอดการทดลอง มีค่า 46.8°C และ 49.3°C พิจารณาพลังงานในพาราฟินพบว่าคล้ายการการทดลองข้อ 5.2.3 พลังงานพาราฟินสะสมความร้อนในช่วงกลางคืน หลังจากเวลา 10.00 น. พาราฟินถูกนำไปใช้ในช่วงกลางวัน



รูปที่ 5.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่าง ๆ อุณหภูมิพาราฟินกับเวลา

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้ง

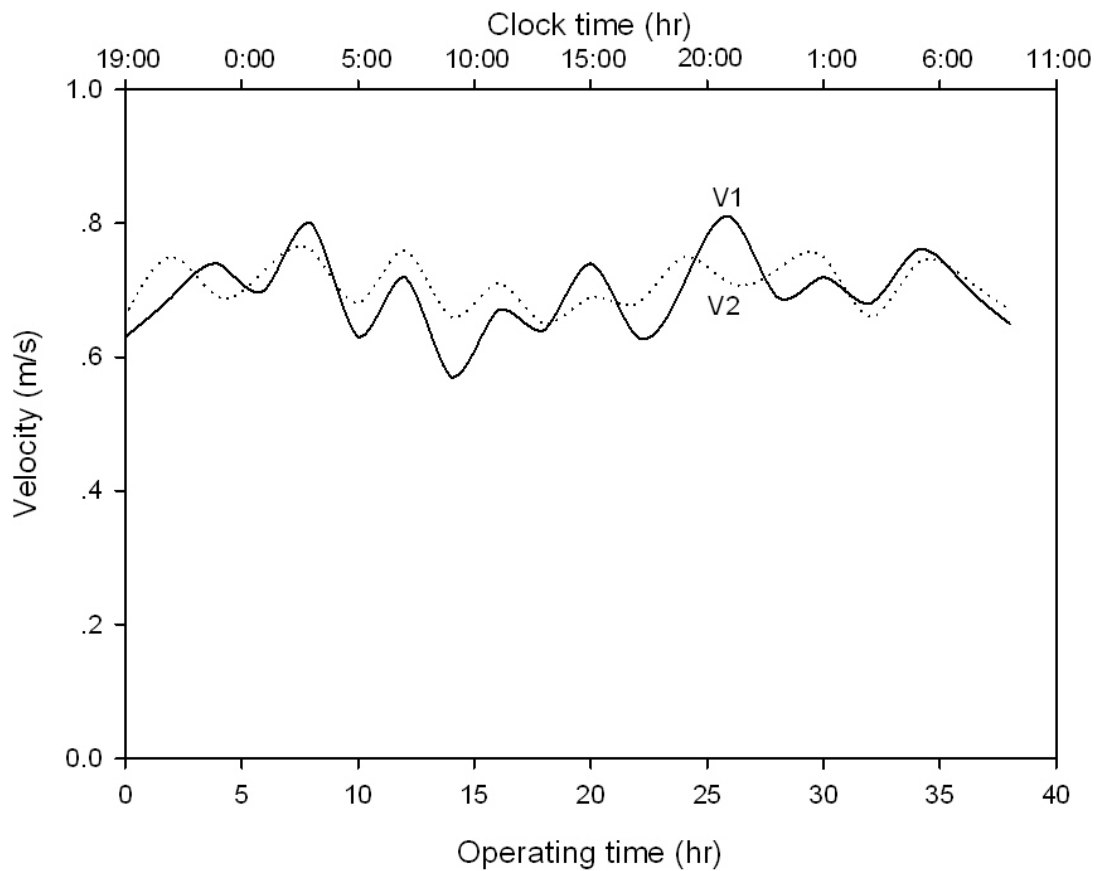
อุณหภูมิภายในห้องอบแห้งประกอบด้วย อุณหภูมิความร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) อุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง (Tch,ave) และอุณหภูมิความร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) ดังรูปที่ 5.42 อุณหภูมิความร้อนต่าง ๆ เฉลี่ยมีค่า 48.7°C , 44.9°C และ 44.3°C ตามลำดับ พบว่าผลต่างของอุณหภูมิความร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง (T5) และ อุณหภูมิความร้อนหลังผ่านห้องอบแห้ง (T13) มีความแตกต่างกันตลอด 38 ชั่วโมง เนื่องจากอบกล้วยจำนวนมาก จึงดึงความร้อนไปใช้สำหรับอบแห้งมาก



รูปที่ 5.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิความร้อนภายในห้องอบแห้งตำแหน่งต่างๆ กับ เวลา

ความเร็วลม

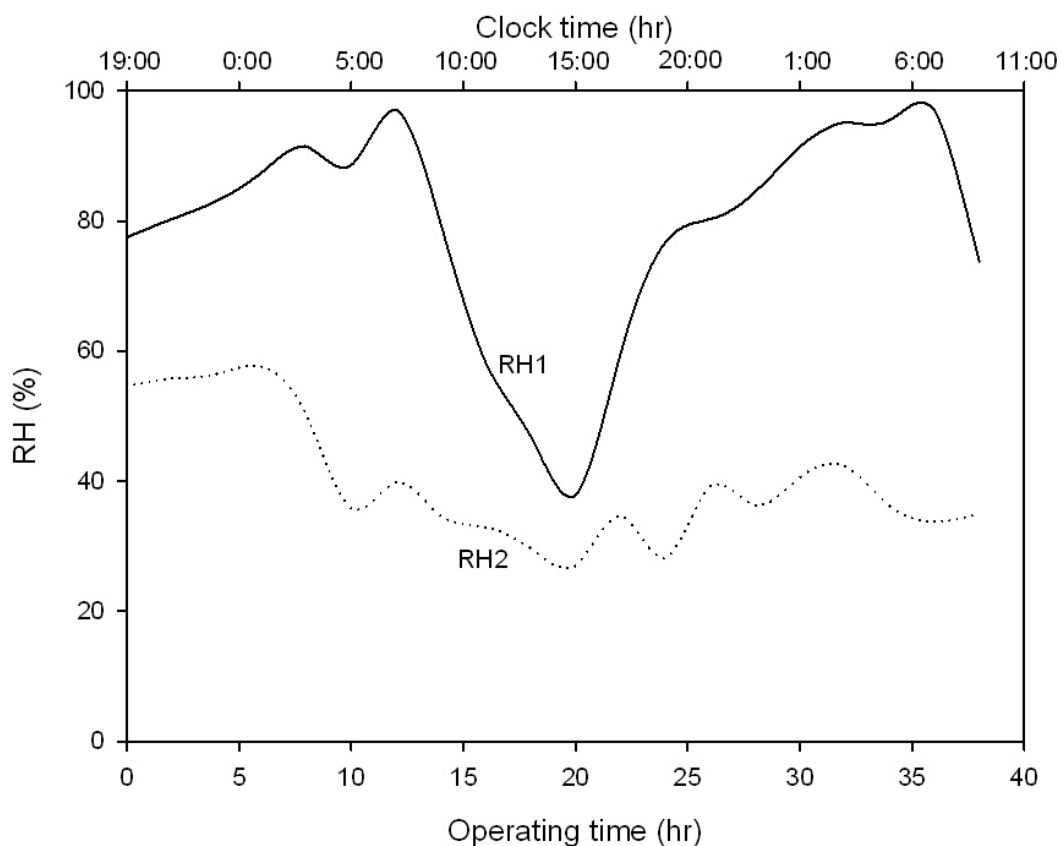
ความเร็วลมเฉลี่ยที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 5.43 ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 0.70 m/s สำหรับพื้นที่ทางเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ขนาด 0.21 m² ให้อัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}_a) เท่ากับ 0.172 kg/s



รูปที่ 5.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลา

ความชื้นสัมพัทธ์

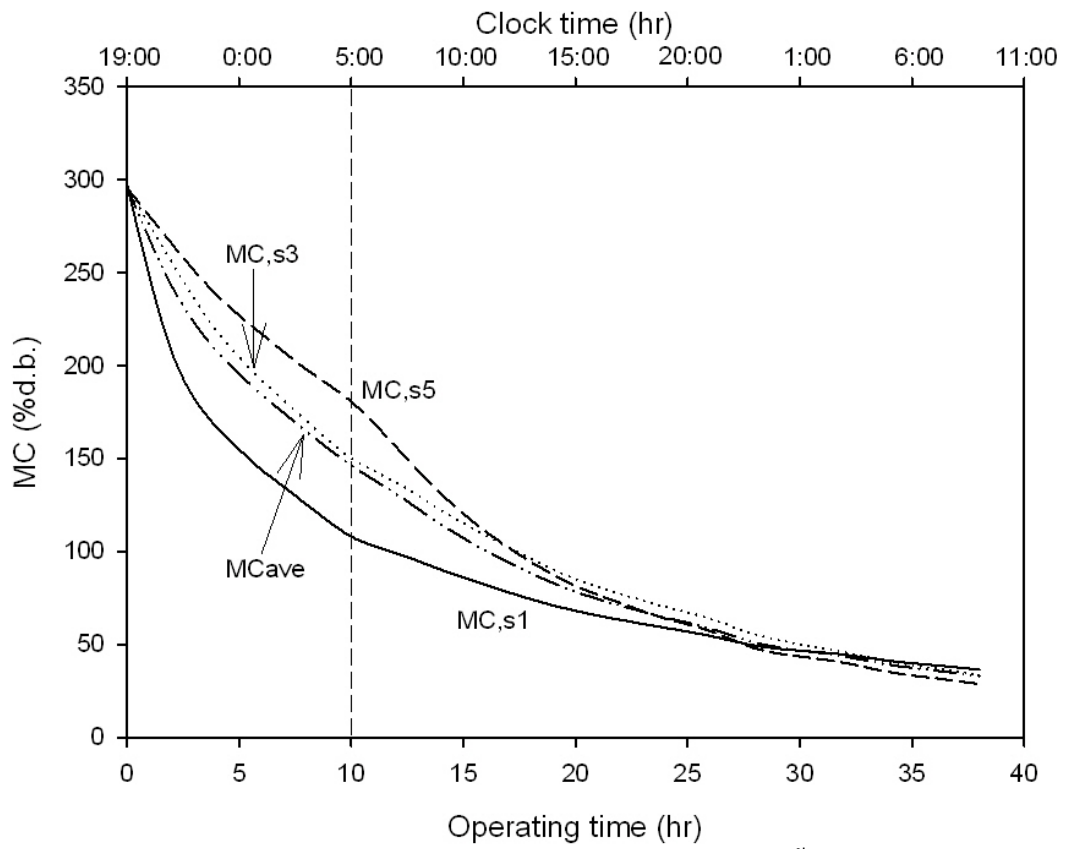
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกห้องอบแห้ง (RH) มีค่าต่ำในช่วงกลางวัน และมีค่าสูงในช่วงกลางคืน และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณปล่องระบายความชื้น (RH2) มีค่าสูงในช่วงแรก เนื่องจากน้ำระเหยออกจากกล้วยเล็บมือนางมาก



รูปที่ 5.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับเวลา

ค่าความชื้น

กล้วยเล็บมือนางเมื่อนำมาอบในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล ค่าความชื้นของกล้วยเล็บมือนางจะลดลง ดังรูปที่ 5.45 กล้วยเล็บมือนางมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 297.0 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง เมื่ออบแห้งเป็นเวลา 38 ชั่วโมง เหลือความชื้นสุดท้าย 33.0 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง การทดลองครั้งนี้สลับภาคในชั่วโมงที่ 10 พบว่า กล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) มีความชื้นลดลงเร็วในชั่วโมงที่ 28 กล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) มีความชื้นน้อยกว่ากล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1 (MC,s1) ซึ่งผลต่างของความชื้นสุดท้ายของกล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 1 (MC,s1) และ กล้วยเล็บมือนางชั้นที่ 5 (MC,s5) ห่างกัน 7.8 เปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง



รูปที่ 5.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นกับเวลา

5.3 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนจากอุปกรณ์ต่างๆ และประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

จากการทดลองข้อ 5.2 การทดลองอบกล้วยเล็บมือนางจำนวน 30 kg และ 60 kg ด้วยเครื่องอบแห้งซึ่งมีแหล่งผลิตความร้อน 2 แหล่งคือพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวล ซึ่งสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวลผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยพลังงานชีวมวล (อุปกรณ์กักเก็บความร้อนและอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าพลังงานหลักที่ใช้สำหรับอบแห้งได้รับจากพลังงานชีวมวล อัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนจากพลังงานชีวมวล ($\dot{Q}_{biomass}$) มีค่ามากที่สุดทั้งเวลากลางคืนและกลางวัน สำหรับเวลากลางวัน ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ด้วย ทำให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนจากพลังงานชีวมวล ($\dot{Q}_{biomass}$) น้อยกว่ากลางวัน สำหรับค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นวิธีที่ง่ายกับการคำนวณเมื่อนำอุณหภูมิเข้าและออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นค่าที่นำมาประเมินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\varepsilon_{biomass}$) ของเครื่องอบแห้งที่ใช้ทดลองอยู่ในช่วง 70-92 ซึ่งมีค่าสูง มีการถ่ายเทความร้อนของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี เมื่อพิจารณาพลังงานที่ปล่อยทิ้งบริเวณทางออกของห้องอบแห้งพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนปล่อยทิ้งจากห้องอบแห้ง ($\dot{Q}_{chamber\ exit}$) มีค่าสูงมากซึ่งเป็นพลังงานส่วนใหญ่ที่ผลิตได้จากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยพลังงานชีวมวล พลังงานลมร้อนปล่อยทิ้งจากห้องอบแห้งควรนำกลับมาใช้ใหม่สำหรับดึงความร้อนสะสมของพาราฟินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป

ตารางที่ 5.1 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของลมร้อนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ และประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การทดลอง	ช่วงเวลา	\dot{Q}_{solar} (kW)	$\dot{Q}_{biomass}$ (kW)		$\dot{Q}_{chamber\ exit}$ (kW)	$\epsilon_{biomass}$ (%)	
			$\dot{Q}_{storage}$ (kW)	$\dot{Q}_{exchanger}$ (kW)			
กล้วย 30 kg เผาไม้พิน ยาว 1 m	วันที่ 1	กลางวัน	0.88	2.31	0.75	3.09	74.26
		กลางคืน		4.58	0.75	4.45	64.19
	วันที่ 2	กลางวัน	1.02	2.12	0.75	3.04	75.28
		กลางคืน					
กล้วย 30 kg เผาไม้พิน ยาว 35 cm	วันที่ 1	กลางวัน					
		กลางคืน		3.24	0.58	3.20	73.95
	วันที่ 2	กลางวัน	1.17	0.84	0.58	2.02	86.84
		กลางคืน		3.13	0.58	3.08	74.51
กล้วย 30 kg เผาไม้พิน ยาว 35 cm (สลับถาด)	วันที่ 1	กลางวัน					
		กลางคืน		3.63	0.57	3.62	78.75
	วันที่ 2	กลางวัน	1.03	1.27	0.57	2.30	88.39
		กลางคืน		3.58	0.57	3.49	78.94
กล้วย 60 kg เผาไม้พิน ยาว 35 cm (สลับถาด)	วันที่ 1	กลางวัน					
		กลางคืน		3.70	0.44	3.16	81.28
	วันที่ 2	กลางวัน	1.13	1.10	0.44	1.79	91.30
		กลางคืน		3.64	0.44	3.11	81.52

5.4 การคำนวณประสิทธิภาพ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การคำนวณประสิทธิภาพจากการทดลองข้อ 5.2 สามารถหาประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (η_{solar}) ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องอบแห้ง (η_{dryer}) ดังตารางที่ 5.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแบบครั้งเดียว (SEC_{alone}) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแบบต่อเนื่อง ($SEC_{continue}$) ซึ่งการทดลองการอบแบบต่อเนื่องจะป้อนความร้อนให้พาราฟินก่อน

อบแห้งดังนั้นจึงคิดความร้อนสิ้นเปลืองโดยรวมด้วย (SEC_{total}) ดังตารางที่ 5.3 พบว่าทุกการทดลองประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (η_{solar}) มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) แยกคิดเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงกลางวันและกลางคืน พบว่าประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางคืนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางวันมีผลต่างกัน เนื่องจากปริมาณพลังงานความร้อนสะสมในพาราฟินเมื่อพิจารณาการทดลองอบกล้วย 30 kg ไม้พินยาว 1 m ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางวันของวันที่ 1 มีค่าน้อย เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ เริ่มทดลองจากไม่มีพลังงานสะสมในพาราฟินจึงต้องป้อนเชื้อเพลิงเพื่อกักเก็บความร้อนในพาราฟินทำให้ประสิทธิภาพมีค่าน้อย ส่วน ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางวันของวันที่ 2 มีค่าสูง เนื่องจากป้อนเชื้อเพลิงน้อยในช่วงนี้ใช้พลังงานความร้อนสะสมในพาราฟินและพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก ซึ่งพลังงานสะสมของพาราฟินสังเกตได้จากอุณหภูมิในพาราฟิน (17) ดังแสดงในรูปที่ 5.16 สำหรับจากการทดลองอบกล้วย 30 kg, 30 kg สลัดบาด และ 60 kg สลัดบาด เผาไม้พิน 35 cm พบว่าพลังงานสะสมในพาราฟินมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางวัน พิจารณาได้จากอุณหภูมิในพาราฟิน ดังแสดงในรูปที่ 5.25, 5.33 และ 5.41 การทดลองอบกล้วย 30 kg และ 60 kg กรณีสลัดบาด มีพลังงานสะสมในพาราฟินช่วงเวลา 10.00 น. ใกล้เคียงกันสังเกตได้จากอุณหภูมิในพาราฟินดังรูปที่ 5.33 และ 5.41 จึงมีประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางวันใกล้เคียงกัน สำหรับการอบกล้วย 30 kg มีพลังงานสะสมในพาราฟินช่วงเวลา 10.00 น. น้อยกว่าดังแสดงจากอุณหภูมิในพาราฟินดังรูปที่ 5.24 จึงต้องป้อนเชื้อเพลิงมากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล ($\eta_{biomass}$) ช่วงกลางวันมีค่าน้อย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องอบแห้ง (η_{dryer}) กรณีอบกล้วย 30 kg ทั้ง 3 การทดลองมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องอบแห้ง (η_{dryer}) ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาเฉพาะความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะช่วงเวลาอบแห้งการอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg เผาไม้พินยาว 35 cm มีการสลัดบาดจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($SEC_{continue}$) น้อยที่สุดสำหรับกรณีอบกล้วย 60 kg พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องอบแห้ง (η_{dryer}) มีค่าสูงขึ้นและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) น้อยลง เครื่องอบแห้งด้วยพลังแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการพบว่าเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องอบแห้งของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรี และมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่า สำหรับเครื่องอบแห้งของกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงป้อนความร้อนจากการเผาไหม้ของแก๊สโดยตรง

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของกลุ่มกล้วยอบเลียบมีอนางท่ามะปริงสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล ซึ่งค้นจากการเผาไหม้ไม้ฟืนมีกลิ่นไม่เหมาะสำหรับอบกล้วยเลียบมีอนางโดยตรง พลังงานความร้อนสำหรับอบกล้วยเลียบมีอนางผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลพบว่าประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนประมาณ 40% เมื่อนำพลังงานความร้อน 40% อบกล้วยเลียบมีอนาง ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลน้อยกว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งของกลุ่มกล้วยอบเลียบมีอนางท่ามะปริง เนื่องจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลมีพลังงานความร้อนปล่อยทิ้งบริเวณช่องระบายความชื้นของห้องอบจำนวนมาก สามารถนำพลังงานความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งได้ แหล่งพลังงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลคือแสงอาทิตย์และไม้ฟืนซึ่งหาได้จากสวนของเกษตรกร สามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ดังนั้นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลเหมาะสำหรับอบแห้งกล้วยเลียบมีอนาง

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณประสิทธิภาพ

การทดลอง		ช่วงเวลา	η_{solar} (%)	$\eta_{biomass}$ (%)	η_{dryer} (%)
อบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m	วันที่ 1	กลางวัน	43.3	27.9	3.84
		กลางคืน		45.3	
	วันที่ 2	กลางวัน	41.3	50.0	
		กลางคืน			
อบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm	วันที่ 1	กลางวัน			3.76
		กลางคืน		40.4	
	วันที่ 2	กลางวัน	42.5	24.1	
		กลางคืน		34.3	
อบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm (สลักถาด)	วันที่ 1	กลางวัน			3.94
		กลางคืน		43.0	
	วันที่ 2	กลางวัน	41.5	36.8	
		กลางคืน		40.0	
อบกล้วย 60 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm (สลักถาด)	วันที่ 1	กลางวัน			6.33
		กลางคืน		37.0	
	วันที่ 2	กลางวัน	38.8	42.7	
		กลางคืน		39.6	
อบกล้วยด้วย เครื่องอบของ กลุ่มกล้วยอบ เล็บมือนางท่า มะปริง					42.8
อบกล้วยด้วย เครื่องอบของ วิสาหกิจชุมชน กลุ่มแม่บ้าน เกษตรกรสวน จันทร์ศรี					1.5

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

การทดลอง	SEC_{alone} $\left(\frac{MJ}{kg \text{ water removed}}\right)$	$SEC_{continue}$ $\left(\frac{MJ}{kg \text{ water removed}}\right)$	SEC_{total} $\left(\frac{MJ}{kg \text{ water removed}}\right)$
อบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m	61.7		61.7
อบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm		63.6	69.5
อบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm (สลัดถาด)		60.6	66.2
อบกล้วย 60 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm (สลัดถาด)		37.8	40.9
อบกล้วยด้วยเครื่องอบของกลุ่ม กล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง	5.5		5.5
อบกล้วยด้วยเครื่องอบของ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้าน เกษตรกรสวนจันทร์ศรี	159.7		159.7

5.5 ผลการทดสอบคุณภาพของกล้วยเล็บมือนางอบ

การทดสอบคุณภาพของกล้วยเล็บมือนางอบ โดยการทดสอบคุณภาพทางกายภาพ และคุณภาพทางจุลินทรีย์ ได้แก่ ความชื้นสุดท้าย ค่า water activity ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด เอสเชอริเชีย โคลิ สตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส ยีสต์และรา พิจารณาตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กล้วยอบ (มผช. 112/2546) รายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ พบว่าผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ทุกรายการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 สำหรับสี จะรายงานผล 3 ค่า คือ L^* a^* และ b^* โดยที่ L^* คือค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 ค่า L^* เท่ากับ 0 เป็นสีมืดที่สุด ค่า L^* เท่ากับ 100 สีสว่างที่สุด a^* คือค่าบ่งบอกความเป็นสีเขียวและสีแดง โดยค่า a^* เป็นบวกแสดงความเป็นสีแดง ค่า a^* เป็นลบ แสดงความเป็นสีเขียว และ b^* คือค่าบ่งบอกความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่า b^* เป็นบวก แสดงความเป็นสีเหลือง ค่า b^* เป็นลบแสดงความเป็นสีน้ำเงิน เมื่อพิจารณาโดยรวมสีของกล้วยเล็บมือนางอบเป็นสีเหลืองทองเทียบกับกล้วยเล็บมือนางอบแห้งของกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงและวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวนจันทร์ศรีดังรูปที่ 5.46

ตารางที่ 5.3 ความชื้นสุดท้าย ค่า water activity สี ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด เอสเชอริเชีย โคลิ สตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส และยีสต์และรา

ชื่อตัวอย่าง	รายการทดสอบ	วิธีการทดสอบ	ผลการทดสอบ	มผช.112/2546
กล้วยเล็บมือนางอบ	ความชื้นสุดท้าย	AOAC 1995	35.9 %d.b.	-
	Water activity (a_w)	เครื่องวัดค่า a_w ยี่ห้อAqualab	0.729	0.75
	Color	เครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex	$L^* = 47.58$ $a^* = 10.11$ $b^* = 36.46$	-
	Total viable count	BAM 2001	70 CFU/g	1×10^3 CFU/g
	Escherichia coli	BAM 2002	ไม่พบ	<3MPN/g
	Staphylococcus aureus	BAM 2001	ไม่พบ	ไม่พบ
	Yeast & Mold count	BAM 2001	35 CFU/g	<100 CFU/g



(ก) ก้วยเล็บมือนางอบแห้ง
ของกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริง



(ข) ก้วยเล็บมือนางอบแห้ง
ของวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรสวน
จันทร์ศรี



(ค) ก้วยเล็บมือนางอบแห้ง
ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล
รูปที่ 5.46 ผลิตภัณฑ์กล้วยเล็บมือนางอบแห้ง

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

โครงการนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางที่ใช้ได้ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์และไม้ฟืน เครื่องอบแห้งประกอบด้วยแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล (อุปกรณ์กักเก็บความร้อน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน) ตู้อบแห้ง และเตาเผาไม้ฟืน

แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่สร้างสามารถผลิตความร้อนได้ประมาณ 1 kW สำหรับจ่ายให้ห้องอบแห้ง ความร้อนส่วนใหญ่ได้จากการเผาไม้ฟืนที่ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนประมาณ 1-2 kw ในช่วงกลางวัน และ 3 kw ในช่วงกลางคืน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเผาไม้ฟืน

การทดสอบระบบเปล่าด้วยพลังงานจากไม้ฟืนยาวพารายาว 1 m โดยป้อนไม้ฟืนครั้งเดียวจำนวน 20 kg ในช่วงเวลากลางวัน และในช่วงเวลากลางคืนสามารถให้ความร้อน 40-60°C ประมาณ 6 ชั่วโมง มีความร้อนสะสมในพาราฟินน้อยเนื่องจากป้อนเชื้อเพลิงน้อย การเผาไม้ฟืนยาว 1 m แบบต่อเนื่อง เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ป้อนไม้ฟืน 7 ครั้ง ๆ ครั้งละ 12-15 kg ใส่ไม้ฟืนในช่องป้อนไม้ฟืนซึ่งเอียง 45 องศาพบว่า ได้ลมร้อนอุณหภูมิ 40-60°C ป้อนเข้าตู้อบ เมื่อเปลี่ยนเป็นเผาไม้ฟืนยาว 35 cm ป้อนไม้ฟืน 12 ครั้ง ๆ ละ 6-8 kg ใส่กึ่งกลางเตาเผาพบว่าได้ลมร้อนอุณหภูมิ 40-60°C แต่การเผาไม้ฟืนยาว 1 m มีระยะเวลาการเผาไหม้นานกว่าการเผาไม้ฟืนยาว 35 cm อย่างไรก็ตามการใช้ไม้ฟืนสั้นทำให้ควบคุมการเผาไหม้ได้ดีกว่าไม้ฟืนยาว เนื่องจากอัตราการเผาไหม้ของไม้ฟืนยาวไม่คงที่ และการเผาไหม้ไม้ฟืนยาวทั้งหมดครั้งเดียวจะให้ความร้อนสูง สำหรับความร้อนที่ใช้ประโยชน์จากตัวกักเก็บความร้อนหรือพาราฟินนั้นเป็นความร้อนสัมผัส เนื่องจากอุณหภูมิพาราฟินสูงกว่าจุดหลอมเหลว

ผลการทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg เมื่อใช้ไม้ฟืนยาว 1 m ลมร้อนที่ได้มีอุณหภูมิ 40-80°C พบว่าผิวกล้วยเล็บมือนางแห้งเกินไป ส่งผลให้น้ำภายในกล้วยเคลื่อนที่ออกมาได้ยากเพราะช่องรูพรุนบนผิวกล้วยเกิดการปิดตัว กล้วยเล็บมือนางอบแห้งจึงมีความชื้นสูง เมื่อใช้ไม้ฟืนยาว 35 cm ลมร้อนที่ได้มีอุณหภูมิ 40-60°C กล้วยแห้งไม่เท่ากัน กล้วยที่อยู่ใกล้ทางเข้าของลมร้อนจะแห้งเร็วกว่ากล้วยที่อยู่ใกล้ปล่องระบายความชื้นประมาณ 10% d.b. การสลับถาดวางกล้วยในชั่วโมงที่ 10 จะช่วยให้อัตราการแห้งสม่ำเสมอขึ้น โดยผลต่างระหว่างความชื้นของกล้วยที่อยู่

ใกล้ทางเข้าลมร้อนและกล้วยที่อยู่ใกล้ปล่องระบายความชื้นประมาณ 3.8% d.b. การอบกล้วยเล็บมือนาง 30 kg ใช้พลังงานความร้อนจำเพาะ 61-70 MJ/kg_{water}

การอบกล้วยเล็บมือนาง 60 kg มีการสลับตากกล้วยในชั่วโมงที่ 10 พบว่าผลต่างระหว่างความชื้นของกล้วยที่อยู่ใกล้ทางเข้าลมร้อนและกล้วยที่อยู่ใกล้ปล่องระบายความชื้นประมาณ 7.8% d.b. เนื่องจากในชั่วโมงที่ 27 ความชื้นของกล้วยใกล้บริเวณปล่องเดิมแห้งเร็วกว่ากล้วยใกล้ทางเข้าลมร้อนเดิมจึงควรเพิ่มระยะเวลาอบแห้งก่อนสลับตาก จะช่วยให้กล้วยภายในห้องอบแห้งสม่ำเสมอขึ้น การอบกล้วยเล็บมือนาง 60 kg ใช้พลังงานความร้อนจำเพาะ 40.9 MJ/kg_{water} แสดงว่าการเพิ่มปริมาณกล้วยสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานได้ ดังนั้นเครื่องอบแห้งที่ออกแบบและสร้างนี้สามารถอบกล้วยได้สูงสุด 60 kg

การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวลในการอบกล้วยเล็บมือนางนี้ พบว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนประมาณ 3.5-6.5% ซึ่งยังต่ำกว่าประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งแบบใช้แก๊สหุงต้มของผู้ประกอบการกลุ่มกล้วยอบเล็บมือนางท่ามะปริงซึ่งผลิตโดยศูนย์เตาอบกล้วยน้ำไทมีประสิทธิภาพ 48.8% เนื่องจากเครื่องอบแห้งของผู้ประกอบการใช้ความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สหุงต้มป้อนเข้าห้องอบแห้งโดยตรงจึงมีประสิทธิภาพสูง แต่เครื่องอบแห้งที่ออกแบบรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และความร้อนจากไม้ฟืนผ่านระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลจึงมีประสิทธิภาพต่ำ ซึ่งประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์เท่ากับ 39-43% และระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน 37-45% ในช่วงกลางคืนพบว่าการสะสมความร้อนในพาราฟิน ไม่มีผลต่อระบบอบแห้ง โดยพาราฟินสะสมความร้อนจากการเผาไม้ฟืนในช่วงเวลากลางคืน และใช้ความร้อนที่สะสมในเวลากลางวันซึ่งเริ่มใช้ความร้อนสะสมในเวลาประมาณ 10.00 น.

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าเครื่องอบแห้งซึ่งผลิตโดยศูนย์เตาอบกล้วยน้ำไท ราคา 85,000 บาท สามารถอบกล้วยจำนวน 245.5 kg ราคาต้นทุนกล้วย 4 baht/kg ใช้เชื้อเพลิงแก๊สหุงต้มจำนวน 1 ถึงราคาถึงละ 300 baht จะได้กล้วยเล็บมือนางอบแห้ง 84.4 kg_{drying banana} ราคาขาย 90 baht/kg_{drying banana} ดังนั้นจึงมีต้นทุนแปรผันต่อหน่วย 15.2 bath/kg_{drying banana} จุดคุ้มทุน 1,136 kg_{drying banana} สำหรับเครื่องอบแห้งที่ออกแบบ ใช้เงินสร้างเครื่อง 100,000 บาท สามารถอบกล้วยจำนวน 60 kg ใช้เชื้อเพลิงคือแสงอาทิตย์และไม้ฟืนซึ่งใช้ไม้ฟืนจำนวน 83.6 kg ราคาไม้ฟืน 0.5 baht/kg_{wood} จะได้กล้วยเล็บมือนางอบแห้ง 21.1 kg_{drying banana} ดังนั้นจึงมีต้นทุนแปรผันต่อหน่วย 13.4 bath/kg_{drying banana} จุดคุ้มทุน 1,305 kg_{drying banana} จะเห็นได้ว่าเครื่องที่ออกแบบใช้ระยะเวลาการคัมนานกว่า ระยะเวลาขึ้นอยู่กับกำลังการผลิต อย่างไรก็ตามหลังจากคัมนแล้วต้นทุนต่อหน่วยของเครื่องที่ออกแบบจะต่ำกว่า นอกจากนี้เครื่องอบกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ

พลังงานชีวมวลควรปรับปรุงโดยนำพลังงานปล่อยทิ้งกลับมาใช้ใหม่สำหรับลดเชื้อเพลิงและเพิ่มจำนวนกล้วยอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบ

คุณภาพของกล้วยเล็บมือนางอบแห้งจากการทดลองอบกล้วยเล็บมือนาง 60 kg โดยเผาไม้ฟืนยาว 35 cm ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวลผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ทั้งคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางจุลินทรีย์ สีของกล้วยเล็บมือนางเป็นสีเหลืองทอง

6.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบอบแห้งกล้วยเล็บมือนางที่ศึกษา ยังมีพลังงานปล่อยทิ้งอยู่ 2 ส่วน คือ ลมร้อนจากห้องอบแห้ง และไอเสียจากการเผาไหม้ สำหรับพลังงานลมร้อนปล่อยทิ้งจากห้องอบแห้งมีอุณหภูมิ 40-50°C จึงยังมีศักยภาพสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยช่วงเวลากลางวันควรนำลมร้อนปล่อยทิ้งบริเวณปล่องระบายความชื้นของห้องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่โดยต่อเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งพลังงานลมร้อนปล่อยทิ้งร่วมกับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพียงพอสำหรับอบแห้งในช่วงกลางวัน ส่วนพลังงานจากไอเสียจากการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 60°C สามารถนำไปใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้อากาศเย็นก่อนเข้าห้องเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิ 30°C จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซร้อนได้

เอกสารอ้างอิง

1. Augustus, L. M., Kumar, S., and Bhattacharya, S. C. (2002) A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 367-393.
2. Ekechukwu, O. V. (1999) Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory, *Energy Conversion & Management*, 40, 593-613.
3. Ekechukwu, O. V., and Norton, B. (1999) Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, *Energy Conversion & Management*, 40, 615-655.
4. E. U. Schlunder (1983) *Heat exchanger design handbook*, Hemisphere publishing corporation, 914-1058.
5. Felix Regin, A., Solanki, S. C., Saini J. S. (2006) Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations, *Renewable Energy*, 31, 2025-2041
6. Leite, J. B., Mancini, M. C., and Borges, S. V. (2007) Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. prata and d'a'gua, *LWT - Food Science and Technology*, 40, 319-323.
7. Madhlopa, A., and Ngwalo, G. (2007) Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater, *Solar Energy*, 81, 449-462.
8. Mathioulakis, E., Karathanos, V. T., and Belessiotis, V. G. (1998) Simulation of Air Movement in a Dryer by Computational Fluid Dynamics: Application for the Drying of Fruits, *Journal of Food Engineering*, 36, 183-200.
9. Milton, C. C. (2004) Drying curves and water activity evaluation of dried banana, *Drying 2004-Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, C, 2013-2020
10. Nguyen, M. H., and Price, W. E. (2007) Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season, *Journal of Food Engineering*, 79, 200-207.
11. Sharma, A., Chen, C. R., and Lan, N. V. (2009) Solar-energy drying systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1185-1210.

12. Sopian, K., Fudholi, A., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., and Sulaiman, M. Y. (2009) Review of solar dryers for agricultural and marine products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 749, 1–31.
13. Yunus, A. C. (2004) *Heat transfer a practical approach*, McGraw-Hill companies. Singapore, 862-874
14. จารุวรรณ กุลวิศวะ สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์, (2550) ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพของกล้วยแผ่น, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับพิเศษ ปีที่ 30 ฉบับที่ 4*
15. ณัฐพล รุ่งประแสง, (2547) การอบกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้รางพาราโบลาคร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
16. ชนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ อติศักดิ์ ทองช่วย, (2548) การศึกษาและจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบไม่เปลี่ยนเฟสในช่วงอุณหภูมิ 50-150°C, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่15 ฉบับที่ 2*
17. ปิยรัตน์ เชียรตติวงศ์, (2550) การพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยการควบคุมการไหลของอากาศ, *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*
18. วีรัชย์ อาจหาญ, (2551) รายงานการวิจัยการศึกษาต้นแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน, *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*
19. อภาภรณ์ ศรีสระคู, (2549) การจำลองการอบแห้งผลลำไยโดยใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล, *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การคำนวณออกแบบเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนาง
ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

การออกแบบเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

1. คำนวณความร้อนทั้งหมดสำหรับอบแห้ง

พลังงานความร้อนสำหรับอบกล้วยเล็บมือนางเป็นผลรวมของความร้อนแฝงที่ใช้ระเหยน้ำ ความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำ ความร้อนสัมผัสที่เพิ่มอุณหภูมิกกล้วยและความร้อนสูญเสียที่ผนังของห้องอบแห้ง

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ

น้ำหนักเริ่มต้นของกล้วยเล็บมือนาง, M_i	30 kg
น้ำหนักสุดท้ายของกล้วยเล็บมือนาง, M_f	8.76 kg
น้ำหนักของกล้วยแห้งปราศจากน้ำ, M_{banana}	7.3 kg
ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ, L_w (Yunus, 2004)	2358.5 kJ/kg
อุณหภูมิอากาศเริ่มต้น, T_i	30°C
อุณหภูมิอากาศสุดท้าย, T_f	60°C
ความร้อนจำเพาะของกล้วย, $C_{p,banana}$ (Yunus, 2004)	3.59 kJ/kg°C
ความร้อนจำเพาะของน้ำ, $C_{p,w}$ (Yunus, 2004)	4.185 kJ/kg°C
ความหนาของอลูมิเนียม, $L_{aluminum}$	0.0003 m
ความหนาของโฟม, L_{foam}	0.0254 m
ค่าการนำความร้อนของอลูมิเนียม, $k_{aluminum}$ (Yunus, 2004)	222 W/m.°C
ค่าการนำความร้อนของโฟม, k_{foam} (Yunus, 2004)	0.04 W/m.°C

$$E_{total} = E_{evap,water} + E_{sensible,water} + E_{banana} + E_{loss}$$

โดยที่

E_{total}	= ความร้อนทั้งหมดสำหรับอบแห้ง
$E_{evap,water}$	= ความร้อนแฝงสำหรับใช้ระเหยน้ำ
$E_{sensible,water}$	= ความร้อนสำหรับใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำ
E_{banana}	= ความร้อนสัมผัสสำหรับเพิ่มอุณหภูมิกกล้วย
E_{loss}	= ความร้อนสูญเสียที่ผนังของห้องอบแห้ง

1.1 หาคความร้อนแฝงที่ใช้ระเหยน้ำจาก

$$E_{evap,water} = (M_i - M_f)L_w$$

$$E_{evap,water} = (30kg - 8.76kg)2358.5 \frac{kJ}{kg}$$

$$= 50094.54kJ$$

1.2 หาคความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก

$$E_{sensible,water} = (M_i - M_f)C_{p,w}(T_f - T_i)$$

$$E_{sensible,water} = (30kg - 8.76kg)(4.185 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C})(60 - 30)$$

$$= 2666.68kJ$$

1.3 หาคความร้อนสัมผัสที่เพิ่มอุณหภูมิกกล้วย

$$E_{banana} = m_{banana} C_{p,banana} (T_f - T_i)$$

$$E_{banana} = (7.3kg)(3.59 \frac{kJ}{kg - K})(60 - 30)$$

$$= 786kJ$$

1.4 หาคความร้อนสูญเสียที่ผนังของห้องอบแห้ง

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง \dot{Q}_a หาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho} = \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{1.059 \frac{kg}{m^3}} = 0.137 \frac{m^3}{s}$$

โดยที่

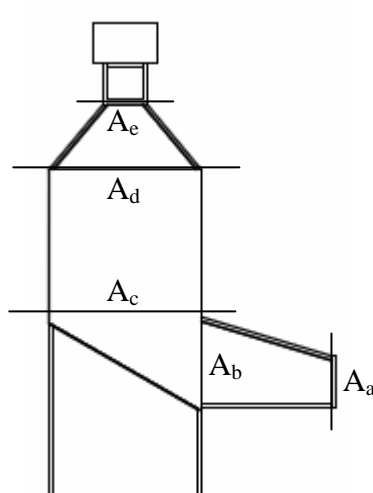
อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนเข้าห้องอบ, \dot{m}_a เท่ากับ 0.15 kg/s (จากข้อ 2)

ความหนาแน่นของอากาศ, ρ เท่ากับ 1.059 kg/m³ (Yunus, 2004)

ดังนั้นความเร็วลมเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง (V) หาได้จากสมการ

$$V = \frac{\dot{Q}}{A}$$

โดยที่ $A_a = 0.04m^2, A_b = 0.4m^2, A_c = 0.7m^2, A_d = 0.7m^2$ and $A_e = 0.04m^2$ ตำแหน่งตามรูปที่ ก1



รูปที่ ก1 แสดงพื้นที่ส่วนต่างๆ ในห้องอบแห้ง

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} V_{average} &= \frac{(V_a + V_b + V_c + V_d + V_e)}{5} \\ &= \frac{\left(\frac{0.137 \frac{m^3}{s}}{0.04m^2} + \frac{0.137 \frac{m^3}{s}}{0.4m^2} + \frac{0.137 \frac{m^3}{s}}{0.7m^2} + \frac{0.137 \frac{m^3}{s}}{0.7m^2} + \frac{0.137 \frac{m^3}{s}}{0.04m^2}\right)}{5} \\ &= \frac{\left(3.43 \frac{m}{s} + 0.34 \frac{m}{s} + 0.20 \frac{m}{s} + 0.20 \frac{m}{s} + 3.43 \frac{m}{s}\right)}{5} \\ &= 1.52 \frac{m}{s} \end{aligned}$$

หาความร้อนสูญเสียที่ผนังของห้องอบแห้ง

$$E_{loss, wall} = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_{alu \ min \ um1}}{k_{alu \ min \ um} A} + \frac{L_{foam}}{k_{foam} A} + \frac{L_{alu \ min \ um}}{k_{alu \ min \ um} A} + \frac{1}{h_2 A}}$$

$$\text{โดยที่ } V_{average} = 1.52 \frac{m}{s}, L_{front} = 1.41m, L_{back} = 2.496m, L_{side} = 2.33m$$

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกห้องอบ $30^{\circ}C$ อุณหภูมิภายในห้องอบ $60^{\circ}C$ เมื่อความเร็วลมผ่านท่อไหลเข้าห้องอบแห้งซึ่งมีพื้นที่กว้างเปรียบเสมือนการไหลภายนอกแบบบังคับบน flat plates ซึ่งจะแยกคิดที่ผนังของห้องอบแห้ง โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ ผนังด้านหน้า ผนังด้านหลัง ผนังด้านข้างฝั่งซ้ายและผนังด้านข้างฝั่งขวา ซึ่งแยกคิด โดยหาค่า Reynolds number ได้จาก

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

เปิดตาราง A-15 ที่อุณหภูมิ $60^{\circ}C$ (Yunus, 2004)

$$k = 0.02808 \frac{W}{m \cdot ^{\circ}C}, \nu = 0.00001896 \frac{m^2}{s}, Pr = 0.7202$$

จะได้ค่า Reynolds number ดังนี้

$$Re_{front} = \frac{(1.52 \frac{m}{s})(1.41m)}{0.00001896 \frac{m^2}{s}} = 113063.57$$

$$Re_{back} = \frac{(1.52 \frac{m}{s})(2.496m)}{0.00001896 \frac{m^2}{s}} = 200146.58$$

$$Re_{side} = \frac{(1.52 \frac{m}{s})(2.333m)}{0.00001896 \frac{m^2}{s}} = 187076.11$$

เนื่องจากค่า Reynolds number น้อยกว่า 5×10^5 จึงเป็นการไหลแบบ Laminar

ดังนั้น สามารถหาค่า Nusselt number เฉลี่ยบน plate ได้จาก

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{\frac{1}{3}}, Pr > 0.60, Re_L < 5 \times 10^5$$

$$Nu_{front} = 0.664(113063.57^{0.5})(0.7202^{\frac{1}{3}}) = 200.13$$

$$Nu_{back} = 0.664(200146.58^{0.5})(0.7202^{\frac{1}{3}}) = 266.27$$

$$Nu_{side} = 0.664(187076.11^{0.5})(0.7202^{\frac{1}{3}}) = 257.43$$

นำค่า Nusselt number ที่ได้ไปหาค่า convection heat transfer coefficient ที่ผนังแต่ละด้านในห้อง
อบแห้งจากสมการ

$$h = Nu \frac{k}{L}$$

จะได้ค่า h_1 ดังนี้

$$h_{1,front} = (200.13) \frac{0.02808 \frac{W}{m^{\circ}C}}{1.41m} = 3.99 \frac{W}{m^2C}$$

$$h_{1,back} = (266.27) \frac{0.02808 \frac{W}{m^{\circ}C}}{2.496m} = 3.00 \frac{W}{m^2C}$$

$$h_{1,side} = (257.43) \frac{0.02808 \frac{W}{m^{\circ}C}}{2.333m} = 3.10 \frac{W}{m^2C}$$

หา h_2

ภายนอกห้องอบแห้งมีการถ่ายเทความร้อนในลักษณะการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ที่อุณหภูมิ
สิ่งแวดล้อม $30^{\circ}C$ กำหนด อุณหภูมิที่ผิวห้องอบแห้งภายนอกเท่ากับ $34^{\circ}C$

$$\text{โดยที่ } V_{average} = 1.52 \frac{m}{s}, L_{front} = 1.41m, L_{back} = 2.496m, L_{side} = 2.33m$$

หาอุณหภูมิฟิล์มได้จากสมการ

$$T_f = (T_s + T_{\infty}) / 2 = (34^{\circ}C + 30^{\circ}C) / 2 = 32^{\circ}C$$

เปิดตาราง A-15 ที่อุณหภูมิ $32^{\circ}C$ (Yunus, 2004)

$$k = 0.02603 \frac{W}{m^{\circ}C}, \nu = 0.00001627 \frac{m^2}{s}, Pr = 0.7276, T_{\infty} = 30^{\circ}C, T_s = 34^{\circ}C$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{32^{\circ}C} = 0.003279$$

สามารถหาค่า Rayleigh number ได้จากสมการ

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \text{Pr}$$

ซึ่งแยกคิดที่ผนังแต่ละด้านได้ผลดังนี้

$$Ra_{L,front} = \frac{(9.81 \frac{m}{s^2})(0.003279)(34^\circ C - 30^\circ C)((1.41m)^3)}{(0.00001627 \frac{m^2}{s})^2} \cdot 0.7276$$

$$= 991298108$$

$$Ra_{L,back} = \frac{(9.81 \frac{m}{s^2})(0.003279)(34^\circ C - 30^\circ C)((2.496m)^3)}{(0.00001627 \frac{m^2}{s})^2} \cdot 0.7276$$

$$= 5498961542$$

$$Ra_{L,side} = \frac{(9.81 \frac{m}{s^2})(0.003279)(34^\circ C - 30^\circ C)((2.333m)^3)}{(0.00001627 \frac{m^2}{s})^2} \cdot 0.7276$$

$$= 4490463345$$

ดังนั้น สามารถหาค่า Nusselt number เฉลี่ยสำหรับการพาแบบธรรมชาติบนพื้นผิว ได้จาก

$$Nu = 0.59Ra_L^{\frac{1}{4}}$$

ซึ่งแยกคิดที่ผนังแต่ละด้านได้ผลดังนี้

$$Nu_{front} = 0.59(991298108^{\frac{1}{4}}) = 104.69$$

$$Nu_{back} = 0.59(5498961542^{\frac{1}{4}}) = 176.51$$

$$Nu_{side} = 0.59(4490463345^{\frac{1}{4}}) = 164.98$$

นำค่า Nusselt number ที่ได้ไปหาค่า convection heat transfer coefficient ที่ผนังแต่ละด้านภายนอกห้องอบแห้งจากสมการ

$$h = Nu \frac{k}{L}$$

จะได้ค่า h_2 ดังนี้

$$h_{2,front} = 104.69 \frac{0.02603 \frac{W}{m^{\circ}C}}{1.41m} = 1.93 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$h_{2,back} = 176.51 \frac{0.02603 \frac{W}{m^{\circ}C}}{2.496m} = 1.84 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$h_{2,side} = 164.98 \frac{0.02603 \frac{W}{m^{\circ}C}}{2.333m} = 1.64 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

ดังนั้นหาความร้อนสูญเสียที่ผนังในห้องอบกล้วยได้ดังนี้

$$E_{loss,wall} = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_{aluminum1}}{k_{aluminum} A} + \frac{L_{foam}}{k_{foam} A} + \frac{L_{aluminum}}{k_{aluminum} A} + \frac{1}{h_2 A}}$$

โดยที่ $A_{front} = 1.313m^2$, $A_{back} = 2.1m^2$, $A_{side, left} = 1.07m^2$, $A_{side, right} = 1.07m^2$,

$$\begin{aligned}
E_{\text{loss,wall,chamber}} &= E_{\text{loss,wall,front}} + E_{\text{loss,wall,back}} + E_{\text{loss,wall,side,left}} + E_{\text{loss,wall,side,right}} \\
&= \frac{60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{\frac{1}{3.99 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0254\text{m}}{0.04 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{1}{1.93 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}}} \times (1.313\text{m}^2) \\
&\quad + \frac{60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{\frac{1}{3.00 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0254\text{m}}{0.04 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{1}{1.84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}}} \times (2.1\text{m}^2) \\
&\quad + \frac{60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{\frac{1}{3.10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0254\text{m}}{0.04 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{1}{1.64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}}} \times (1.07\text{m}^2) \\
&\quad + \frac{60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{\frac{1}{3.10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0254\text{m}}{0.04 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{0.0003\text{m}}{222 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}} + \frac{1}{1.64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}}} \times (1.07\text{m}^2) \\
&= 28.07\text{W} + 41.66\text{W} + 21.39\text{W} + 21.39\text{W} \\
&= 112.50\text{W} \\
&= 112.50\text{W} \times (24 \times 60 \times 60)\text{s} \\
&= 9720.34\text{kJ}
\end{aligned}$$

ดังนั้น ความร้อนทั้งหมดสำหรับอบแห้ง

$$\begin{aligned}
E_{\text{total}} &= E_{\text{evap,water}} + E_{\text{sensible,water}} + E_{\text{banana}} + E_{\text{loss}} \\
&= 50094.54\text{kJ} + 2666.68\text{kJ} + 786\text{kJ} + 9720.34\text{kJ} \\
&= 63262.66\text{kJ} \\
&= (63262.66\text{kJ}) / (24 \times 60 \times 60\text{s}) \\
&= 0.732\text{kW}
\end{aligned}$$

2. อัตราการไหลของอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้งหาได้จาก

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ

ความร้อนทั้งหมดสำหรับอบแห้ง, E_{total} (จากข้อ 1)	0.732 kW
อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, T_i	60°C
อุณหภูมิอากาศปล่อยทิ้ง, T_o	55°C

ความร้อนจำเพาะของอากาศ, $C_{p,a}$ (Yunus, 2004)

1.007 kJ/kg °C

$$\begin{aligned}\dot{m}_a &= \frac{E_{total, chamber}}{c_{p,a}(T_i - T_o)} \\ \dot{m}_a &= \frac{0.732 kW}{1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} (60^\circ C - 55^\circ C)} \\ &= 0.15 kg/s\end{aligned}$$

3. คำนวณปริมาณการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง, M_f สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$M_f = \frac{E_{total}}{(\eta_h)(LHV)}$$

โดยที่

$$E_{total} = 0.73 kW, LHV = 8910 \frac{kJ}{kg} (45\% wb), \eta_h = 30\%$$

ดังนั้น

$$M_f = \frac{E_{total}}{(\eta_h)(LHV)} = \frac{0.00073 MJ (3600s)}{(0.3) \left(\frac{8.91 MJ}{kg} \right) (h)} = 0.986 \frac{kg \text{ of wood}}{h}$$

หาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตา

$$\dot{M}_{gt} = \dot{M}_a + \dot{M}_{gf}$$

โดยที่

$$\dot{M}_{gf} = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตา}$$

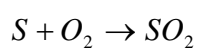
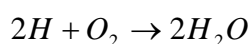
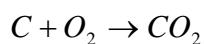
\dot{M}_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้เผาไหม้

\dot{M}_{gf} = อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนเกิดจากเชื้อเพลิง

หาค่า \dot{M}_a

องค์ประกอบของไม้ยางพาราประกอบด้วย คาร์บอน 55.96% ไฮโดรเจน 9.68% ออกซิเจน 33.51% ซัลเฟอร์ 0.07% (วีรัชย์, 2551)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงต้องใช้อากาศทางทฤษฎีคำนวณจากสมการ



โดยที่ ธาตุแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลดังนี้

C = 12, H = 1, S = 32,

ต้องการออกซิเจนสำหรับทำปฏิกิริยาทางเคมีดังกล่าว ซึ่งไม้พื้นมีออกซิเจนอยู่แล้ว 33.51%

ดังนั้นต้องการออกซิเจนเพิ่ม = $(2.67C + 8H + S) - O$

$$= [(0.5596*2.67)+(0.0968*8)+(0.0007*1)]-0.3351$$

$$= 1.93 \frac{\text{kg of oxygen}}{\text{kg of wood}}$$

ปริมาณของอากาศแห่งที่ต้องการ (อากาศจะมีออกซิเจนอยู่ 23% โดยน้ำหนัก)

ดังนั้น อากาศที่ต้องการตามทฤษฎี

$$A_{th} = \frac{1.93 \text{ kg}}{0.23}$$

$$A_{th} = 8.41 \frac{\text{kg of air}}{\text{kg of wood}}$$

อัตราการใช้อากาศในการเผาไหม้ทางทฤษฎี, \dot{M}_{Ath} จะเท่ากับ

$$\begin{aligned}\dot{M}_{Ath} &= \left(8.41 \frac{\text{kg of air}}{\text{kg of wood}}\right) \left(0.98 \frac{\text{kg of wood}}{h}\right) \\ &= 8.29 \frac{\text{kg of air}}{h}\end{aligned}$$

กำหนดให้ excess air 50%

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้เผาไหม้, \dot{M}_a

$$\begin{aligned}\dot{M}_a &= \left(8.29 \frac{\text{kg of air}}{h}\right) + 0.5 \left(8.29 \frac{\text{kg of air}}{h}\right) \\ &= 12.44 \frac{\text{kg of air}}{h}\end{aligned}$$

หาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนเกิดจากเชื้อเพลิง, \dot{M}_{gf}

$$\dot{M}_{gf} = \dot{M}_f [1 - (1 - MC)A] \text{ โดยที่ เชื้อเพลิงมีน้ำเกาะอยู่ร้อยละ } A ; (A=1.83\%)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\dot{M}_f &= \text{อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง (0.98 kg-fuel/h)} \\ A &= \text{ร้อยละของน้ำเกาะ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{M}_{gf} &= \left(0.98 \frac{\text{kg of wood}}{h}\right) (1 - (1 - 0.818)(0.0183)) \\ &= 0.9828 \frac{\text{kg of wood}}{h}\end{aligned}$$

หาอัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซร้อนที่ออกจากเตา, \dot{M}_{gt}

$$\begin{aligned}
 \dot{M}_{gt} &= \dot{M}_a + \dot{M}_{gf} \\
 &= (12.43 \frac{\text{kg of air}}{h}) + (0.9828 \frac{\text{kg}}{h}) \\
 &= 13.42 \frac{\text{kg}}{h} \\
 &= 0.00373 \frac{\text{kg}}{s}
 \end{aligned}$$

หาความเร็วที่ผ่านท่อในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$V_t = \frac{\dot{M}_{gt}}{\rho A}$$

$$\text{โดยที่ } \rho_{@250^{\circ}\text{C}} = 0.6746 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, A = \frac{(21)(\pi(0.0381)^2)}{4} \text{m}^2, \dot{M}_{gt} = 0.00373 \frac{\text{kg}}{s}$$

$$V_t = \frac{0.00373 \frac{\text{kg}}{s}}{(0.6746 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (\frac{(21)(\pi(0.0381)^2)}{4} \text{m}^2)}$$

$$V_t = 0.23 \text{ m/s}$$

4. การคำนวณและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคำนวณ

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเปลือก, D_s	400 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ, D_t	38.1 mm
ความหนาผนังท่อ, L_{tw}	2.5 mm
ระยะระหว่างท่อ, L_{tp}	57 mm
มุมระหว่างท่อ, θ_{tp}	90°
เปอร์เซ็นต์ตัดของแผ่นกั้น, B_c	25%
ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นช่วงกลาง, L_{bc}	180 mm
ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นทางเข้า, L_{bi}	180 mm
ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นทางออก, L_{bo}	180 mm

จำนวนท่อทั้งหมด, N_t	21 ท่อ
อุณหภูมิทางเข้าเปลือก, T_{si}	30°C
อุณหภูมิทางออกเปลือก, T_{so}	70°C
อุณหภูมิทางเข้าท่อ, T_{ti}	250°C
อุณหภูมิทางออกท่อ, T_{to}	130°C

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งไหลตามกัน สามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการ

$$E_{total} = UA\Delta T_m$$

หา U ได้จาก

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{L_{tw}}{k_{tw}} + \frac{1}{h_t} \left(\frac{A_o}{A_i} \right)}, \frac{A_o}{A_i} = \left(\frac{\pi D_t}{\pi (D_t - 2L_{tw})} \right)$$

โดยที่

E_{total}	= ความร้อนทั้งหมดสำหรับอบแห้ง
U	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
ΔT_m	= ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม
L_{tw}	= ความหนาของท่อ
k_{tw}	= ค่าการนำความร้อนของท่อ
A_o	= พื้นที่ภายนอกท่อ
A_i	= พื้นที่ภายในท่อ
h_s	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเปลือก
h_t	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อ

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของท่อ, h_t
โดยหาค่า Reynolds number ได้จาก

$$Re_D = \frac{V_t D_t}{\nu}$$

เปิดตาราง A-15 ที่อุณหภูมิ 250 °C (Yunus, 2004)

$$k = 0.04104 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}, \nu = 0.00004091 \frac{m^2}{s}, Pr = 0.6946, \rho = 0.6746 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_t = 0.23 \frac{m}{s} \text{ (จาก ข้อ 3)}$$

จะได้ค่า Reynolds number ดังนี้

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{(0.23 \frac{m}{s})(0.0381m)}{0.00004091 \frac{m^2}{s}} \\ &= 213.26 \end{aligned}$$

ซึ่งเป็นการไหลแบบ laminar สามารถหาค่า Nusselt number สำหรับนำไปหา h_t ได้จาก

$$Nu_D = 4.36 = \frac{h_t D_t}{k}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} h_t &= \frac{4.36(0.04104 \frac{W}{m \cdot K})}{0.0381m} \\ &= 4.7 \frac{W}{m^2 K} \end{aligned}$$

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเปลือก, h_s

$$h_s = h_i (J_c J_l J_b J_s J_r)$$

โดยที่

h_i = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในอุดมคติฝั่งท่อ

J_c = ปัจจัยการแก้ปัญหาสำหรับแผ่นกั้นของการถ่ายเทความร้อน

J_l = ปัจจัยการแก้ปัญหาสำหรับผลกระทบแผ่นกั้นรั้วของการถ่ายเทความร้อน

J_b = ปัจจัยการแก้ปัญหาสำหรับการไหลอ้อมกลุ่มท่อของการถ่ายเทความร้อน

J_s = ปัจจัยการแก้ปัญหาสำหรับระยะห่างแผ่นกั้นทางเข้าและทางออกของการถ่ายเทความร้อน

J_r = ปัจจัยการแก้ปัญหาสำหรับความชันอุณหภูมิการไหลแบบราบเรียบของการถ่ายเทความร้อน

$$h_i = j_i C_{p,s} \dot{m}_s (\text{Pr})_s^{-\frac{2}{3}} (\Phi_s)^{0.14}$$

หาอัตราการไหลเชิงมวลของเปลือก, \dot{m}_s ได้จาก

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_a}{S_m}$$

โดยที่ $\dot{m}_a = 0.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ (จาก ข้อ 2)

และหาพื้นที่หน้าตัดการไหล S_m ได้จาก

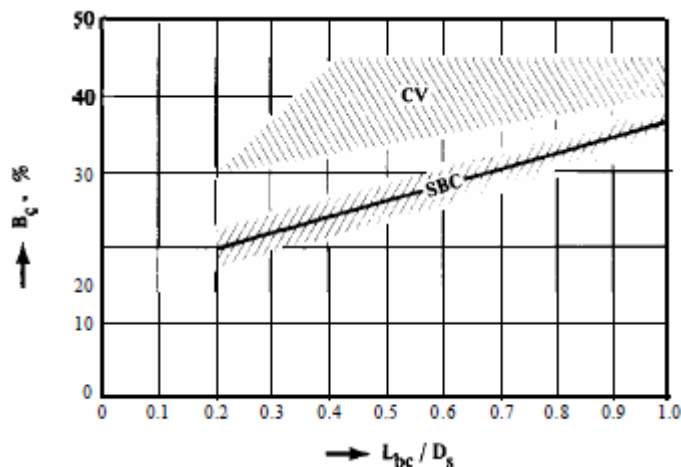
$$S_m = L_{bc} \left[L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp}} (L_{tp} - D_t) \right]$$

$$\begin{aligned} L_{bb} &= D_s - D_{oil} \\ &= (400 - 293) \text{mm} \\ &= 107 \text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{ctl} &= D_{oil} - D_t \\ &= (293 - 38.1) \text{mm} \\ &= 254.9 \text{mm} \end{aligned}$$

จาก $B_c = 25\%$ จะได้ $\frac{L_{bc}}{D_s} = 0.45$ จากรูปที่ ก2

ดังนั้น $L_{bc} = 180\text{mm}$



รูปที่ ก2 Recommended segmental baffle cut values B_c as a function of L_{bc}/D_s ratio. SBC, segmental baffle cuts in no-phase change flow; CV, baffle cuts applicable to condensing vapors

ที่มา: E. U. Schlunder (1983)

จาก $\frac{L_p}{D_t}$ มีค่า 1.25 เป็นอย่างน้อย และมีค่า 1.5 เป็นอย่างมาก

ดังนั้น

$$\begin{aligned} L_p &= 1.5D_t \\ &= 1.5(38.1\text{mm}) \\ &= 57\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_m &= (180\text{mm})\left[107\text{mm} + \frac{254.9\text{mm}}{57\text{mm}}(57\text{mm} - 38.1\text{mm})\right] \\ &= 34473.51\text{mm}^2 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= \frac{0.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{34473.51\text{mm}^2} \left(10^6 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2}\right) \\ &= 4.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \end{aligned}$$

หา Re_s, Pr_s

$$T_{t,av} = \frac{T_{ti} + T_{to}}{2} = \frac{(250 + 130)^\circ C}{2} = 190^\circ C$$

$$T_{s,av} = \frac{T_{si} + T_{so}}{2} = \frac{(30 + 70)^\circ C}{2} = 50^\circ C$$

เปิดตาราง A-15 ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ (Yunus, 2004)

$$\text{จะได้ } \mu_{s,av} = 0.01963 \frac{kg}{ms}, C_{p,s,av} = 1007 \frac{J}{kgK}, k_{s,av} = 0.02735 \frac{W}{mK}$$

$$Re_s = \frac{D_t \dot{m}_s}{\mu_{s,av}}$$

$$= \frac{(38.1mm)(4.4 \frac{kg}{m^2 s})}{0.01963 \frac{kg}{ms}}$$

$$= 8540$$

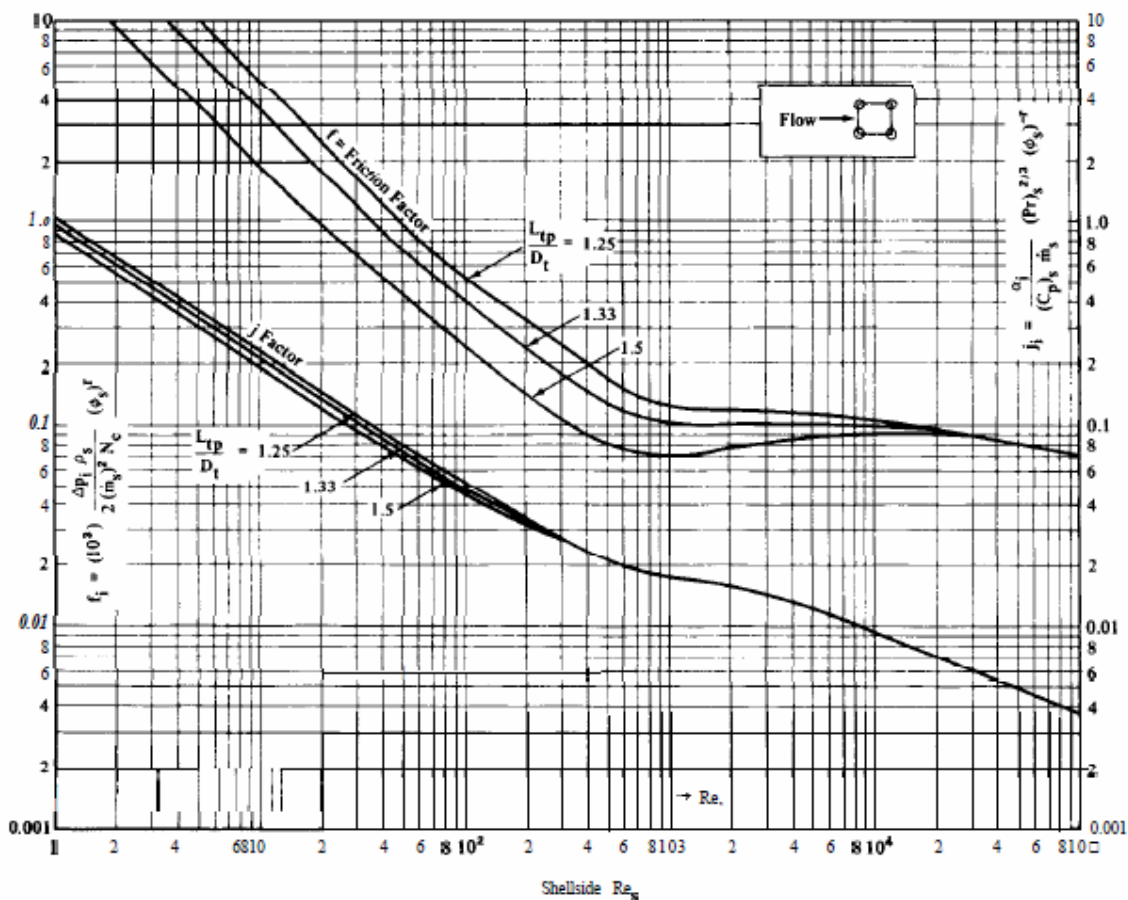
$$Pr_s = \frac{C_{p,s} \mu_s}{k_s} \times 10^{-3}$$

$$= \frac{(1007 \frac{J}{kgK})(0.01963 \frac{kg}{ms})}{0.02735 \frac{W}{mK}} \times (10^{-3})$$

$$= 0.72$$

หา j_i

$$\text{จาก } Re_s = 8540, \frac{L_p}{D_t} = 1.5 \text{ จะได้ } j_i = 0.01 \text{ จากรูปที่ ก3}$$



รูปที่ ก3 Ideal tube bank j_i and f_i factors for 90 in-line layout
ที่มา: E. U. Schlunder (1983)

หาอุณหภูมิผนังท่อ, T_w

$$\begin{aligned}
 T_w &= T_{t,av} + \left(\frac{T_{s,av} - T_{t,av}}{1 + \frac{h_t}{h_s}} \right) \\
 &= 190^\circ C + \left(\frac{(50 - 190)^\circ C}{1 + \frac{4.7 \frac{W}{m^2 K}}{30 \frac{W}{m^2 K}}} \right) \\
 &= 68.96^\circ C
 \end{aligned}$$

เปิดตาราง A-15 ที่อุณหภูมิ $68.96^\circ C$ (Yunus, 2004)

$$\mu_{s,w} = 0.02047m \frac{kg}{ms}$$

หาค่า

$$\begin{aligned}\Phi_s &= \frac{\mu_s}{\mu_{s,w}} \\ &= \frac{0.01963m \frac{kg}{ms}}{0.02047m \frac{kg}{ms}} \\ &= 0.96\end{aligned}$$

ตั้งน้จกสมการ

$$\begin{aligned}h_i &= j_i C_{p,s} \dot{m}_s (\text{Pr})_s^{-\frac{2}{3}} (\Phi_s)^{0.14} \\ &= 0.01(1007 \frac{J}{kgK})(4.4 \frac{kg}{m^2s})(0.72)^{-\frac{2}{3}} (0.96)^{0.14} \\ &= 54.8 \frac{W}{m^2K}\end{aligned}$$

หาปัจจัยการแก้ปัญหสำหรับแผ่นก้นของการถ่ายเทความร้อน, J_c

$$\begin{aligned}J_c &= 0.55 + 0.72F_c \\ F_c &= 1 - 2F_w \\ F_w &= \frac{\theta_{ctl}}{360} - \frac{\sin \theta_{ctl}}{2\pi} \\ \theta_{ctl} &= 2 \cos^{-1} \left\{ \frac{D_s}{D_{ctl}} \left[1 - 2 \left(\frac{B_c}{100} \right) \right] \right\} \\ \theta_{ctl} &= 2 \cos^{-1} \left\{ \frac{400mm}{254.9mm} \left[1 - 2 \left(\frac{25}{100} \right) \right] \right\} \\ &= 76.63^\circ \\ F_w &= \frac{76.63}{360} - \frac{\sin 76.63}{2\pi} \\ &= 0.058\end{aligned}$$

$$F_c = 1 - 2(0.058)$$

$$= 0.884$$

ดังนั้น

$$J_c = 0.55 + 0.72(0.884)$$

$$= 1.18$$

หาปัจจัยการแก้ไขปัญหาสำหรับผลกระทบแผ่นกั้นรั้วของการถ่ายเทความร้อน, J_l

$$J_l = 0.44(1 - r_s) + [1 - 0.44(1 - r_s) \exp(-2.2r_{lm})]$$

$$r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}}$$

$$r_{lm} = \frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_m}$$

$$S_{sb} = 0.00436 D_s L_{sb} (360 - \theta_{ds})$$

$$\theta_{ds} = 2 \cos^{-1} \left[1 - 2 \frac{B_c}{100} \right]$$

$$S_{tb} = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D_i + L_{tb})^2 - D_i^2] \right\} (N_{tt}) (1 - F_w)$$

$$\theta_{ds} = 2 \cos^{-1} \left[1 - 2 \frac{B_c}{100} \right]$$

$$= 120^\circ$$

$$S_{sb} = 0.00436 (400 \text{ mm}) (4.7 \text{ mm}) (360 - 120)$$

$$= 1967.23 \text{ mm}^2$$

$$S_{tb} = \left\{ \frac{\pi}{4} [(38.1 \text{ mm}) + (0.8 \text{ mm})^2 - (38.1 \text{ mm})^2] \right\} (21) (1 - 0.058)$$

$$= 957.06 \text{ mm}^2$$

$$r_s = \frac{1967.23 \text{ mm}^2}{1967.23 \text{ mm}^2 + 957.06 \text{ mm}^2}$$

$$= 0.67$$

$$r_{lm} = \frac{1967.23 \text{ mm}^2 + 957.06 \text{ mm}^2}{34473.51 \text{ mm}^2}$$

$$= 0.085$$

$$J_l = 0.44(1 - 0.67) + [1 - 0.44(1 - 0.67) \exp(-2.2(0.085))]$$

$$= 1.02$$

หาปัจจัยการแก้ปัญหสำหรับกรไหลอ้อมกลุ่มท่อของการถ่ายเทความร้อน, J_b

เปิดจากรูปที่ ก4

$$F_{sbp} = \frac{S_b}{S_m}$$

$$S_b = L_{bc}[(D_s - D_{oil}) + L_{pl}]$$

$$L_{pl} = \frac{L_p}{2} = \frac{(L_p - D_t)}{2}$$

$$= \frac{(57mm - 38.1mm)}{2}$$

$$= 9.45mm$$

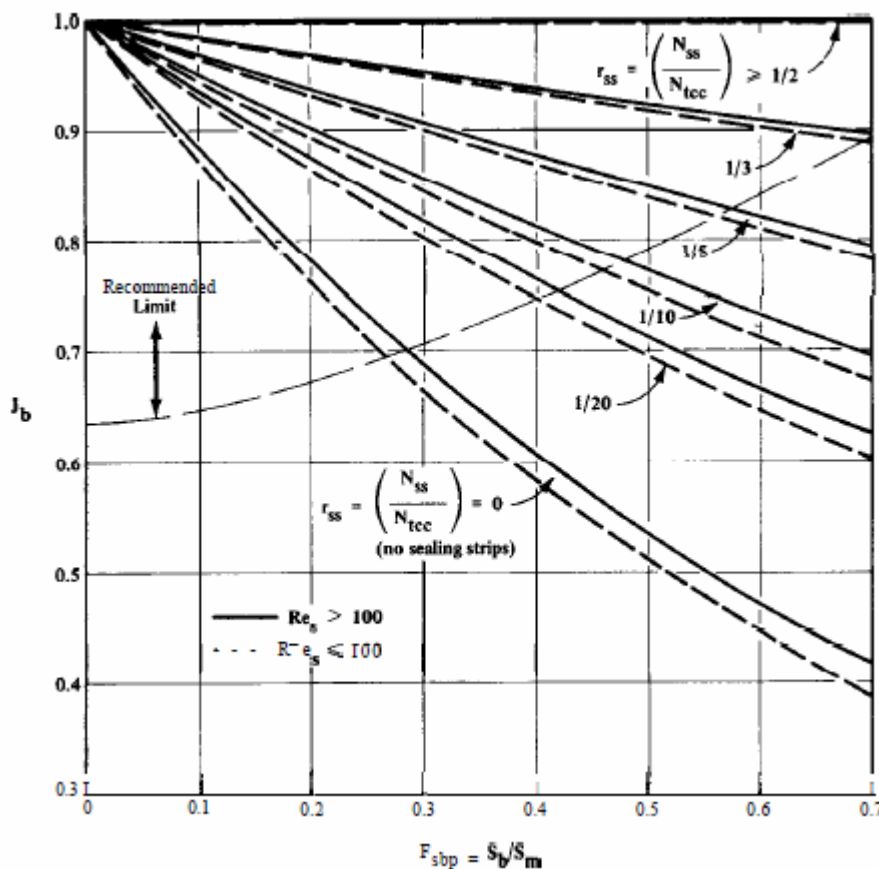
$$S_b = 180mm[(400mm - 293mm) + 9.45mm]$$

$$= 20961mm^2$$

$$F_{sbp} = \frac{20961mm^2}{34473.51mm^2}$$

$$= 0.608$$

$$r_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_{tcc}}, \text{ เนื่องจาก } N_{ss} = 0 \text{ ดังนั้น } r_{ss} = 0$$



รูปที่ ๓4 Heat transfer correction factor J_b for shell-to-bundle bypass as a function of F_{sbp} . With effect of sealing strips per tube rows crossed, r_{ss}

ที่มา: E. U. Schlunder (1983)

จะได้ $J_b = 0.47$

หาปัจจัยการแก้ปัญหสำหรับระยะห่างแผ่นกันทางเข้าและทางออกของการถ่ายเทความร้อน, J_s
 เนื่องจาก กำหนดให้ $L_{bi} = L_{bo} = L_{bc}$ จะได้ $J_s = 1$

หาปัจจัยการแก้ปัญหสำหรับความชันอนุกรมการไหลแบบราบเรียบของการ, J_r
 เนื่องจาก $Re > 100$ จะได้ $J_r = 1$

ดังนั้นจากสมการ

$$h_s = h_i (J_c J_l J_b J_s J_r)$$

$$h_s = 54.8 \frac{W}{m^2 K} ((1.18)(1.02)(0.47)(1)(1))$$

$$= 31 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_s} + \frac{L_{tw}}{k_{tw}} + \frac{1}{h_t} \left(\frac{A_o}{A_i} \right)}, \quad \frac{A_o}{A_i} = \left(\frac{\pi D_t}{\pi(D_t - 2L_{tw})} \right)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{31 \frac{W}{m^2 K}} + \frac{2.5 \times 10^{-3} m}{60.5 \frac{W}{mK}} + \frac{1}{4.7 \frac{W}{m^2 K}} \left(\frac{\pi(38.1mm)}{\pi(38.1mm - 2(2.5mm))} \right)}$$

$$= 3.6 \frac{W}{m^2 K}$$

เพราะฉะนั้นคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการ

$$E_{total} = UA\Delta T_m$$

อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยของของไหลทั้งสองเชิงลวงหาได้จาก

$$\Delta T_m = \frac{(T_{ii} - T_{si}) - (T_{to} - T_{so})}{\ln[(T_{ii} - T_{si}) / (T_{to} - T_{so})]}$$

$$\Delta T_m = \frac{(250^\circ C - 30^\circ C) - (130^\circ C - 70^\circ C)}{\ln[(250^\circ C - 30^\circ C) / (130^\circ C - 70^\circ C)]}$$

$$= 123.14^\circ C$$

จาก $E_{total} = 732.31W, U = 3.6 \frac{W}{m^2 C}$

เพราะฉะนั้น

$$A = \frac{732.31W}{\left(3.6 \frac{W}{m^2 C} \right) (123.14^\circ C)}$$

$$A = 1.65m^2$$

กำหนดใช้ท่อ 1.5 นิ้ว ยาว 0.72 เมตร

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

$$n = \frac{A}{A(\pi DL)} = \frac{1.65m^2}{(22/7)(0.0381m)(0.72m)} = 19.13$$

เพราะฉะนั้น $n = 21$ ท่อ

5. การคำนวณหาความดันสูญเสีย

5.1. การคำนวณหาความดันสูญเสียบริเวณช่องอากาศของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

ขนาดช่องอากาศ $0.15m \times 1.75m$ แผงรับรังสียาว $2.6m$

สมมติให้อากาศ มีอุณหภูมิ $40^\circ C$ จะได้

$$\rho_{air@40^\circ C} = 1.127 \frac{kg}{m^3}, v_{air@40^\circ C} = 1.702 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$V = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40^\circ C} A}$$

$$= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.127 \frac{kg}{m^3})(0.15m \times 1.75m)}$$

$$= 0.51 \frac{m}{s}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2(0.15m)(1.75m)}{0.15m + 1.75m} = 0.28m$$

$$Re = \frac{VD}{v} = \frac{(0.51 \frac{m}{s})(0.28m)}{1.702 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 8390.13$$

$$\text{แผ่นไม้อัด} \quad \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.5mm}{280mm} = 1.79 \times 10^{-3}$$

จากสูตร

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}}\right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log\left(\frac{1.79 \times 10^{-3}}{3.7} + \frac{2.51}{8390.13 \sqrt{f}}\right)$$

$$\begin{aligned}
 f &= 0.035 \\
 h_L &= f \frac{LV^2}{D2g} \\
 &= 0.035 \frac{(2.6m)(0.51 \frac{m}{s})^2}{(0.28m)2(9.81 \frac{m}{s^2})} \\
 &= 0.0043m \\
 P &= \rho gh_L \\
 &= (1.127 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(0.0043m) \\
 &= 0.047Pa
 \end{aligned}$$

5.2. อากาศจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์เข้าท่อ

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40oC} A} \\
 &= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.127 \frac{kg}{m^3})(\frac{\pi(0.152m)^2}{4})} \\
 &= 7.33 \frac{m}{s}
 \end{aligned}$$

Pipe Inlet :sharp-edged : $K_L = 0.50$

$$\begin{aligned}
 h_L &= \frac{K_L V^2}{2g} \\
 &= \frac{0.5(7.33 \frac{m}{s})^2}{2(9.81 \frac{m}{s^2})} \\
 &= 1.37m \\
 P &= \rho gh_L \\
 &= (1.127 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(1.37m) \\
 &= 15.15Pa
 \end{aligned}$$

5.3. อากาศเข้าท่อเล็ก 16 ท่อในอุปกรณ์กักเก็บความร้อน

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40^{\circ}C} A} \\
 &= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.127 \frac{kg}{m^3}) (\frac{16 \times \pi \times (0.0381m)^2}{4})} \\
 &= 7.29 \frac{m}{s}
 \end{aligned}$$

Pipe Inlet : sharp-edged : $K_L = 0.5$

$$\begin{aligned}
 h_L &= \frac{K_L V^2}{2g} \\
 &= \frac{0.5(7.29 \frac{m}{s})^2}{2(9.81 \frac{m}{s^2})} \\
 &= 1.35m
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \rho g h_L \\
 &= (1.127 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(1.35m) \\
 &= 14.93Pa
 \end{aligned}$$

5.4. อากาศไหลภายในท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40^{\circ}C} A} \\
 &= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.127 \frac{kg}{m^3}) (\frac{16 \times \pi \times (0.0381m)^2}{4})} \\
 &= 7.29 \frac{m}{s} \\
 Re &= \frac{VD}{\nu} = \frac{(7.29 \frac{m}{s})(0.0381m)}{1.702 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} \\
 &= 16319
 \end{aligned}$$

$$\text{Stainless steel : } \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.002\text{mm}}{38.1\text{mm}} = 5.25 \times 10^{-5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log\left(\frac{5.25 \times 10^{-5}}{3.7} + \frac{2.51}{16319\sqrt{f}}\right)$$

$$f = 0.027$$

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g}$$

$$= 0.027 \frac{(1\text{m})(7.29 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{(0.0381\text{m})2(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})}$$

$$= 1.92\text{m}$$

$$P = \rho g h_L$$

$$= (1.127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1.92\text{m})$$

$$= 21.22\text{Pa}$$

5.5. อากาศไหลออกจากอุปกรณ์กักเก็บความร้อน

สมมติให้อากาศมีอุณหภูมิ 40°C

$$V = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40^\circ\text{C}} A}$$

$$= \frac{0.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{(1.127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \left(\frac{16 \times \pi \times (0.0381\text{m})^2}{4} \right)}$$

$$= 7.29 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Pipe Exit : sharp-edged $K_L = \alpha = 1.05$ for fully developed turbulent flow

$$\begin{aligned}
 h_L &= \frac{K_L V^2}{2g} \\
 &= \frac{1.05(7.29 \frac{m}{s})^2}{2(9.81 \frac{m}{s^2})} \\
 &= 2.84m \\
 P &= \rho g h_L \\
 &= (1.127 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(2.84m) \\
 &= 31.4Pa
 \end{aligned}$$

5.6. การคำนวณหาความดันสูญเสียบริเวณอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\begin{aligned}
 N_{icc} &= \frac{D_s}{L_{pp}} [1 - 2(\frac{B_c}{100})] \\
 &= \frac{400mm}{57mm} [1 - 2(\frac{25}{100})] \\
 &= 3.51 \\
 N_{icw} &= \frac{0.8}{L_{pp}} [D_s (\frac{B_c}{100}) - \frac{D_s - D_{ctl}}{2}] \\
 &= \frac{0.8}{57mm} [400mm(\frac{25}{100}) - \frac{400mm - 254.9mm}{2}] \\
 &= 0.39 \\
 N_b &= \frac{L_{ti}}{L_{bc}} - 1 = \frac{720mm}{180mm} - 1 \\
 &= 3 \\
 S_{wg} &= \frac{\pi}{4} (D_s)^2 (\frac{\theta_{ds}}{360} - \frac{\sin \theta_{ds}}{2\pi}) \\
 &= \frac{\pi}{4} (400mm)^2 (\frac{120}{360} - \frac{\sin 120}{2\pi}) \\
 &= 24567.39mm^2 \\
 S_{wt} &= N_t F_w (\frac{\pi}{4} D_t^2) \\
 &= (21)(0.058)(\frac{\pi}{4} (38.1mm)^2) \\
 &= 1388.63mm^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_w &= S_{wg} - S_{wt} \\
 &= 24567.39\text{mm}^2 - 1388.63\text{mm}^2 \\
 &= 23178.76\text{mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_w &= \frac{\dot{m}_a}{\sqrt{S_m S_w}} \\
 &= \frac{0.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 10^6}{\sqrt{(34473.51\text{mm}^2)(23178.76\text{mm}^2)}} \\
 &= 5.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}
 \end{aligned}$$

หา f_i จากค่า $Re = 8540$ จะได้ว่า $f_i = 0.09$

หา R_l

$$R_l = \exp[-1.33(1 + r_s)(r_{lm})^p]$$

Where $p = [-0.15(1 + r_s) + 0.81] = [-0.15(1 + 0.67) + 0.81] = 0.56$

$$\begin{aligned}
 R_l &= \exp[-1.33(1 + 0.67)(0.085)^{0.56}] \\
 &= 0.57
 \end{aligned}$$

หา R_b

$$R_b = \exp[-C_{bh} F_{sbp} (1 - \sqrt[3]{2r_{ss}})]$$

$C_{bh} = 1.25$ for turbulent and transition flow, $Re > 100$

$$\begin{aligned}
 R_b &= \exp[-1.25(0.608)(1 - \sqrt[3]{2(0)})] \\
 &= 0.47
 \end{aligned}$$

หา R_s

จาก $L_{bi} = L_{bo} = L_{bc}$ จะได้ว่า $R_s = 2$

หา

$$\begin{aligned}
 \Delta p_{bi} &= 2(10^{-3}) f_i (N_{tcc}) \frac{(\dot{m}_s)^2}{\rho_s} (\Phi_s)^{-0.14} \\
 &= 2(10^{-3})(0.09)(3.51) \frac{(4.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}})^2}{0.6746 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} (0.96)^{-0.14} \\
 &= 0.018\text{kPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta p_c &= \Delta p_{bi} (N_b - 1) R_b R_l \\
 &= (0.018\text{kPa})(3 - 1)(0.47)(0.57) \\
 &= 0.0096\text{kPa}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta p_w &= N_b (2 + 0.6 N_{tcw}) \frac{\dot{m}_w^2}{2 \rho_s} 10^{-3} R_l \\
&= 3(2 + 0.6(0.39)) \frac{(5.3 \frac{kg}{m^2 s})^2}{2(0.6746 \frac{kg}{m^3})} 10^{-3} (0.57) \\
&= 0.08 kPa \\
\Delta p_e &= \Delta p_{bi} (1 + \frac{N_{tcw}}{N_{tcc}}) R_b R_s \\
&= (0.018 kPa) (1 + \frac{0.39}{3.51}) (0.47) (2) \\
&= 0.019 kPa \\
\Delta p_s &= \Delta p_c + \Delta p_w + \Delta p_e \\
&= 0.0096 kPa + 0.08 kPa + 0.019 kPa \\
&= 108.6 Pa
\end{aligned}$$

5.7. การคำนวณหาความดันสูญเสียบริเวณห้องอบแห้ง

แยกคิด 3 ช่วง

ช่วงที่ 1 ช่วงก่อนเข้าห้องอบแห้ง

$$\begin{aligned}
V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho A} \\
&= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.059 \frac{kg}{m^3})(1m \times 0.4m)} \\
&= 0.35 \frac{m}{s} \\
P_v &= \rho \left(\frac{V}{1.414} \right)^2 \\
&= (1.059 \frac{kg}{m^3}) \left(\frac{0.35 \frac{m}{s}}{1.414} \right)^2 \\
&= 0.065 Pa
\end{aligned}$$

จาก $C_o = 80.94$

$$\begin{aligned}\Delta P &= C_o P_v \\ &= 80.94(0.065 Pa) \\ &= 5.26 Pa\end{aligned}$$

ช่วงที่ 2 ห้องอบแห้ง

$0.7m \times 1m$ ห้องอบยาว $0.7m$

สมมติให้อากาศ มีอุณหภูมิ $60^\circ C$ จะได้ $\rho_{air@40oC} = 1.059 \frac{kg}{m^3}$, $\nu_{air@40oC} = 1.896 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$

$$\begin{aligned}V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40oC} A} \\ &= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.059 \frac{kg}{m^3})(0.7m \times 1m)} \\ &= 0.2 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2(0.7m)(1m)}{0.7m+1m} = 0.82m$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.2 \frac{m}{s})(0.82m)}{1.896 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 8649.8$$

$$\text{แผ่น Galvanized iron } \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.15mm}{820mm} = 1.83 \times 10^{-4}$$

จากสูตร

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{f}} &= -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{f}} &= -2.0 \log\left(\frac{3.17 \times 10^{-4}}{3.7} + \frac{2.51}{8649.8 \sqrt{f}}\right)\end{aligned}$$

$$f = 0.032$$

$$\begin{aligned}h_L &= f \frac{LV^2}{D2g} \\ &= 0.032 \frac{(0.7m)(0.2 \frac{m}{s})^2}{(0.82m)2(9.81 \frac{m}{s^2})} \\ &= 5.57 \times 10^{-5} m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \rho g h_L \\
 &= (1.059 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(5.57 \times 10^{-5} \text{m}) \\
 &= 5.7 \times 10^{-4} \text{Pa}
 \end{aligned}$$

ช่วงที่ 3 บริเวณหลังคา

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho A} \\
 &= \frac{0.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{(1.059 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0.2\text{m} \times 0.2\text{m})} \\
 &= 3.54 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\
 P_v &= \rho \left(\frac{V}{1.414} \right)^2 \\
 &= (1.059 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \left(\frac{3.54 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.414} \right)^2 \\
 &= 6.6 \text{Pa}
 \end{aligned}$$

จาก $C_o = 0.24$

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= C_o P_v \\
 &= 0.24(6.6 \text{Pa}) \\
 &= 1.58 \text{Pa}
 \end{aligned}$$

ความดันในห้องอบรวม เท่ากับ $5.26 \text{Pa} + 5.7 \times 10^{-4} \text{Pa} + 1.58 \text{Pa} = 6.84 \text{Pa}$

ภายในช่องอ 90

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40^\circ\text{C}} A} \\
 &= \frac{0.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{(1.059 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \left(\frac{\pi(0.152\text{m})^2}{4} \right)} \\
 &= 7.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

$K=0.9$

$$\begin{aligned}
 h_L &= \frac{K_L V^2}{2g} \\
 &= \frac{0.9(7.8 \frac{m}{s})^2}{2(9.81 \frac{m}{s^2})} \\
 &= 2.79m \\
 P &= \rho g h_L \\
 &= (1.059 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(2.79m) \\
 &= 29Pa
 \end{aligned}$$

ภายในท่อ

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{\dot{m}_a}{\rho_{air@40^{\circ}C} A} \\
 &= \frac{0.15 \frac{kg}{s}}{(1.059 \frac{kg}{m^3})(\frac{\pi(0.152m)^2}{4})} \\
 &= 7.8 \frac{m}{s} \\
 Re &= \frac{VD}{\nu} = \frac{(7.8 \frac{m}{s})(0.152m)}{1.896 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}} = 62531.64
 \end{aligned}$$

$$\text{ท่อเหล็ก} \quad \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.26mm}{152mm} = 1.7 \times 10^{-3}$$

จากสูตร

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{\sqrt{f}} &= -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \\
 \frac{1}{\sqrt{f}} &= -2.0 \log\left(\frac{1.7 \times 10^{-3}}{3.7} + \frac{2.51}{62531.64\sqrt{f}}\right) \\
 f &= 0.025
 \end{aligned}$$

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g}$$

$$= 0.025 \frac{(3m)(7.8 \frac{m}{s})^2}{(0.152m)2(9.81 \frac{m}{s^2})}$$

$$= 1.53m$$

$$P = \rho gh_L$$

$$= (1.059 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})(1.53m)$$

$$= 15.9Pa$$

รวม

$$P = 0.047Pa + 15.15Pa + 14.93Pa + 21.22Pa + 31.4Pa + 108.6Pa + 6.84Pa + 6 \times 29Pa + 15.9Pa$$

$$= 388.09Pa$$

6. หาความดันสถิตย์ของพัดลม, P_{fs}

ซึ่งหาได้จากผลต่างของความดันรวมของพัดลม, P_{ft} และความดันจลน์ของอากาศที่ทางออก,

$$P_{v,outlet}$$

$$P_{fs} = P_{ft} - P_{v,outlet}$$

ความดันรวมของพัดลม, P_{ft} สามารถหาได้จาก

$$P_{ft} = (P_{s,outlet} + P_{v,outlet}) - (P_{s,inlet} + P_{v,inlet})$$

โดยที่

$$P_{s,outlet} = \text{ความดันสถิตย์ของอากาศทางออก}$$

$$P_{v,outlet} = \text{ความดันจลน์ของอากาศทางออก}$$

$$P_{s,inlet} = \text{ความดันสถิตย์ของอากาศทางเข้า}$$

$$P_{v,inlet} = \text{ความดันจลน์ของอากาศทางเข้า}$$

ดังนั้นสามารถหา ความดันสถิตย์ของพัดลม จากสมการ

$$P_{fs} = P_{s,outlet} - (P_{s,inlet} + P_{v,inlet})$$

โดยที่

$$P_{s,outlet} = P_{s,inlet} + P_{v,inlet} + P_{loss} - P_{v,outlet}$$

เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned}
 P_{fs} &= P_{loss} - P_{V,outlet} \\
 &= 388.09 Pa - (1.059 \frac{kg}{m^3}) \frac{(3.54 \frac{m}{s})^2}{2} \\
 &= 388.09 - 6.6 Pa \\
 &= 381.49 Pa
 \end{aligned}$$

Safety factor = 2

$$= 762.98 Pa$$

ความดันสถิตยของพัดลม เท่ากับ 762.98 Pa

ที่ น้ำ 25 °C มีความหนาแน่น $\rho_{w@25^{\circ}C} = 997.1 \frac{kg}{m^3}$

$$\begin{aligned}
 h_w &= \frac{P}{\rho g} \\
 &= \frac{762.98 Pa}{(997.1 \frac{kg}{m^3})(9.81 \frac{m}{s^2})} \\
 &= 0.078 m
 \end{aligned}$$

แรงดัน 1000 mm.Aq. เท่ากับ แรงส่งน้ำสูง 1 เมตร

$$h_w = 78 mm.Aq$$

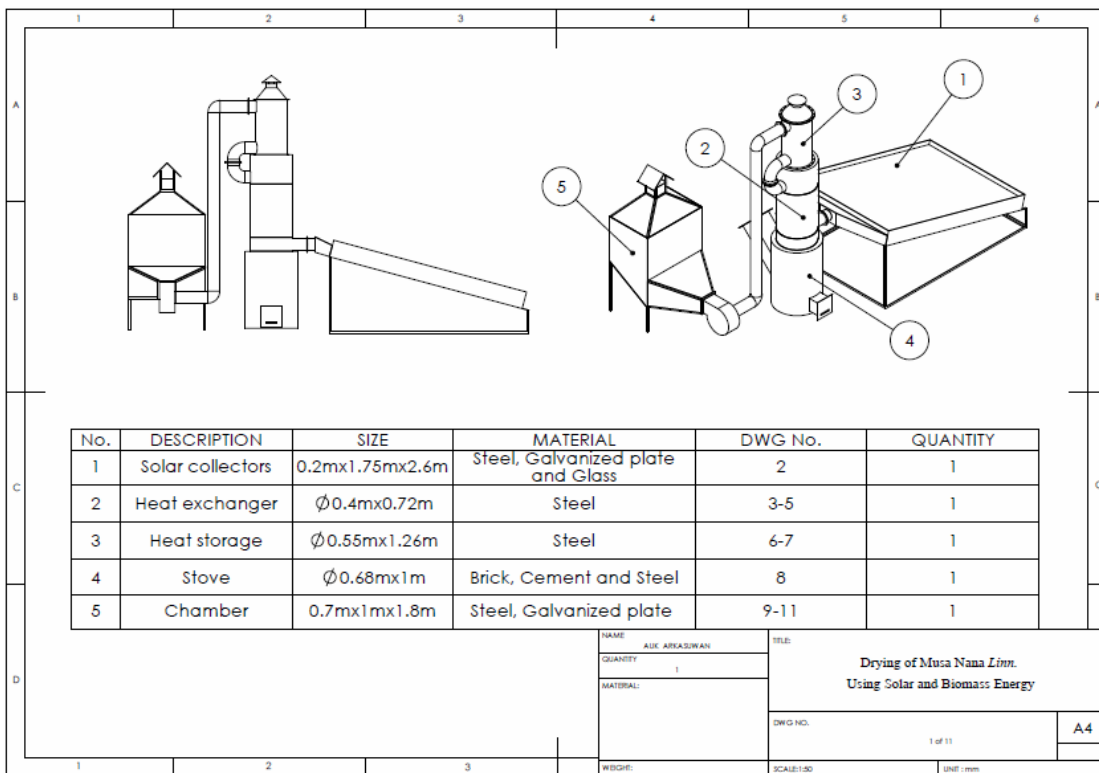
อัตราการไหลที่ใช้

$$\begin{aligned}
 Q &= 0.137 \frac{m^3}{s} \\
 &= 8.22 \frac{m^3}{min} \\
 &= 8.22 CMM
 \end{aligned}$$

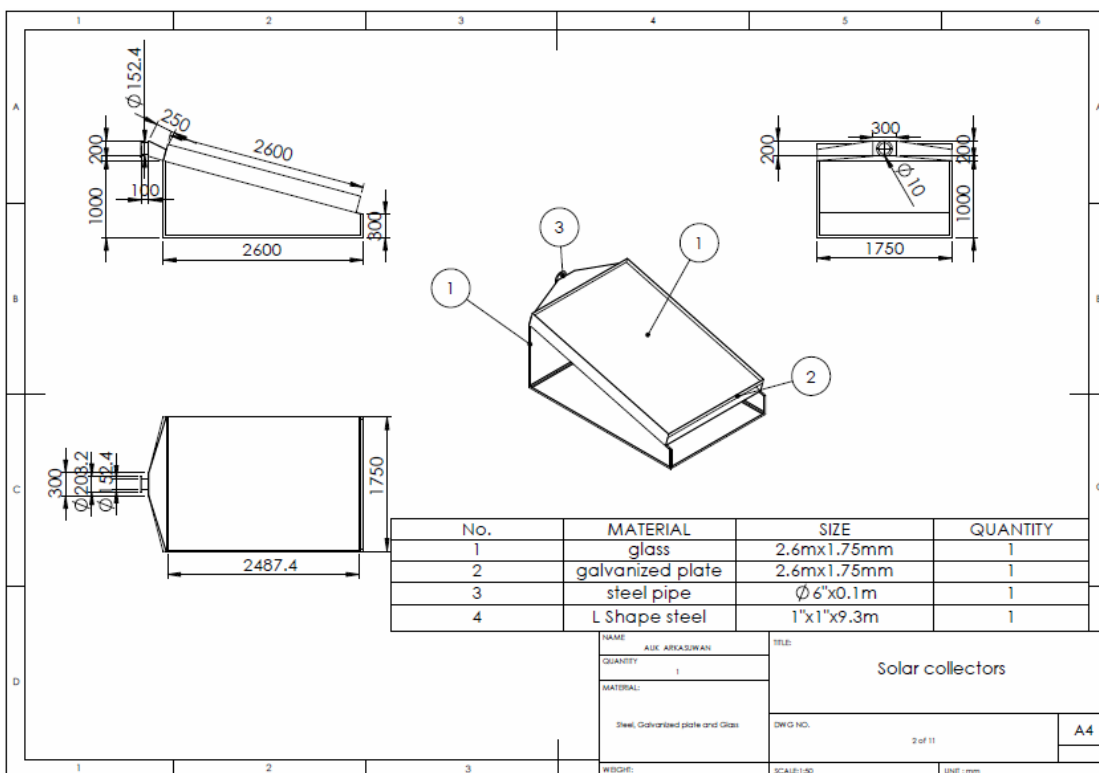
ดังนั้นจึงเลือกใช้ Backward Curved Fan ขนาด 1 hp ความดัน 110 mm.Aq. อัตราการไหล 35 CMM

ภาคผนวก ข

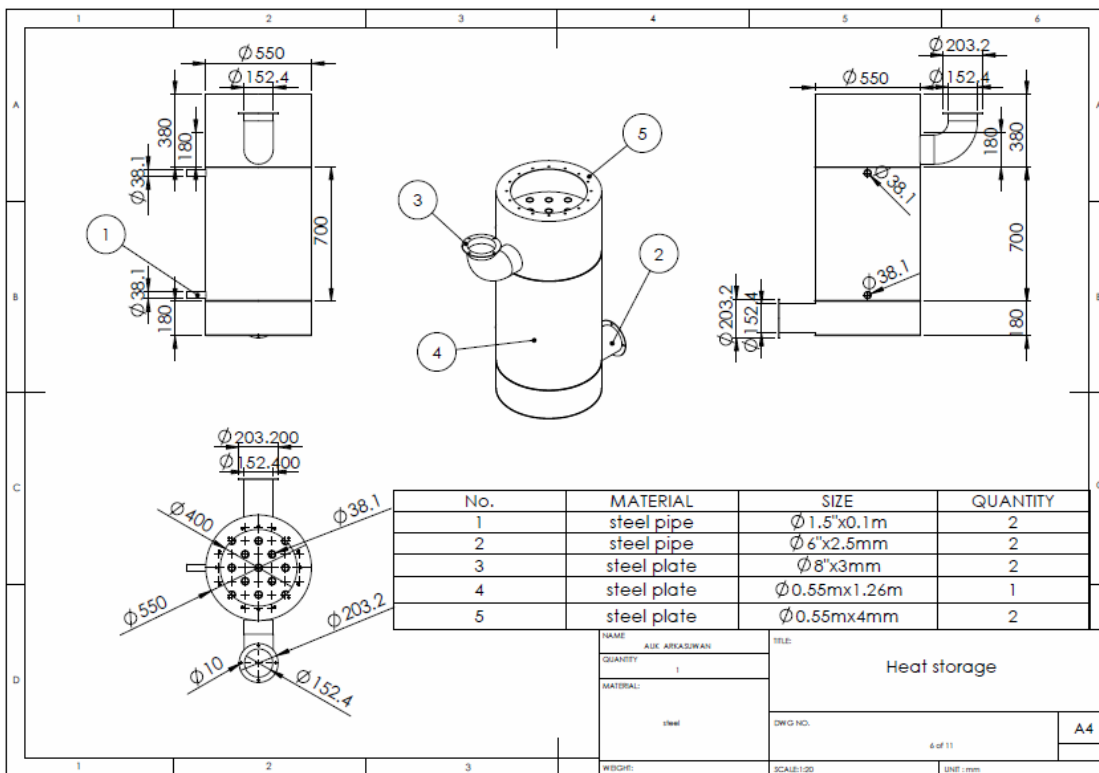
แบบเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล



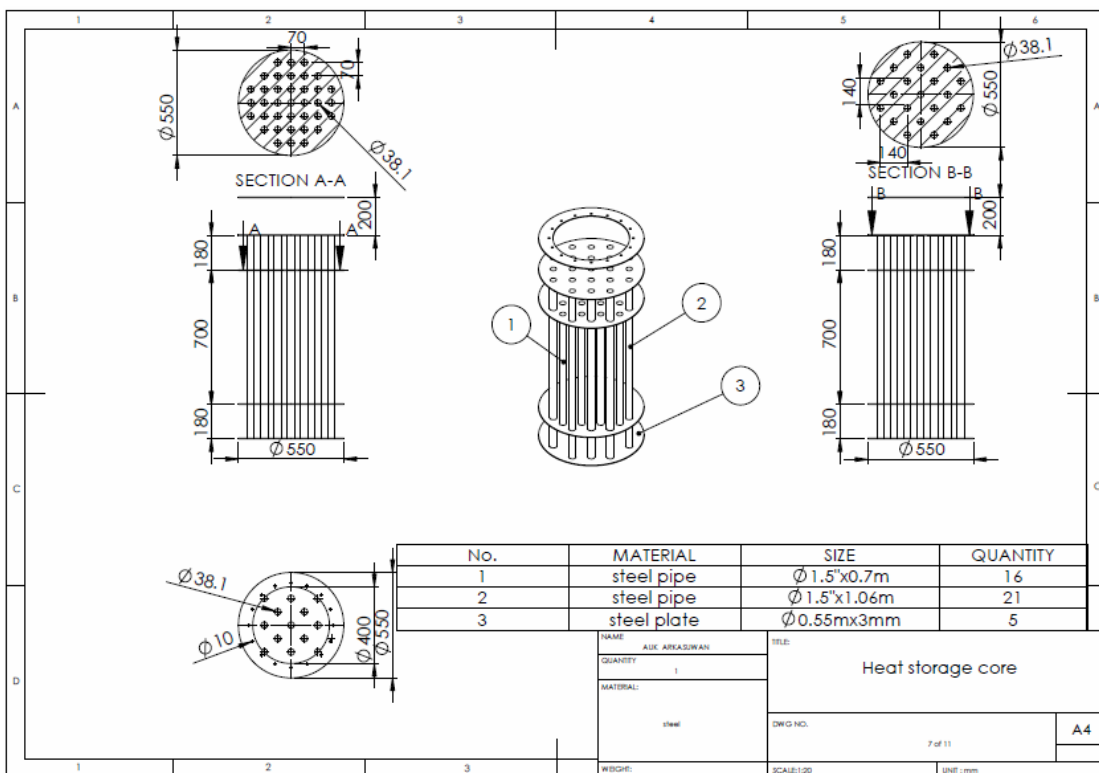
รูปที่ ข 1 อุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานชีวมวล



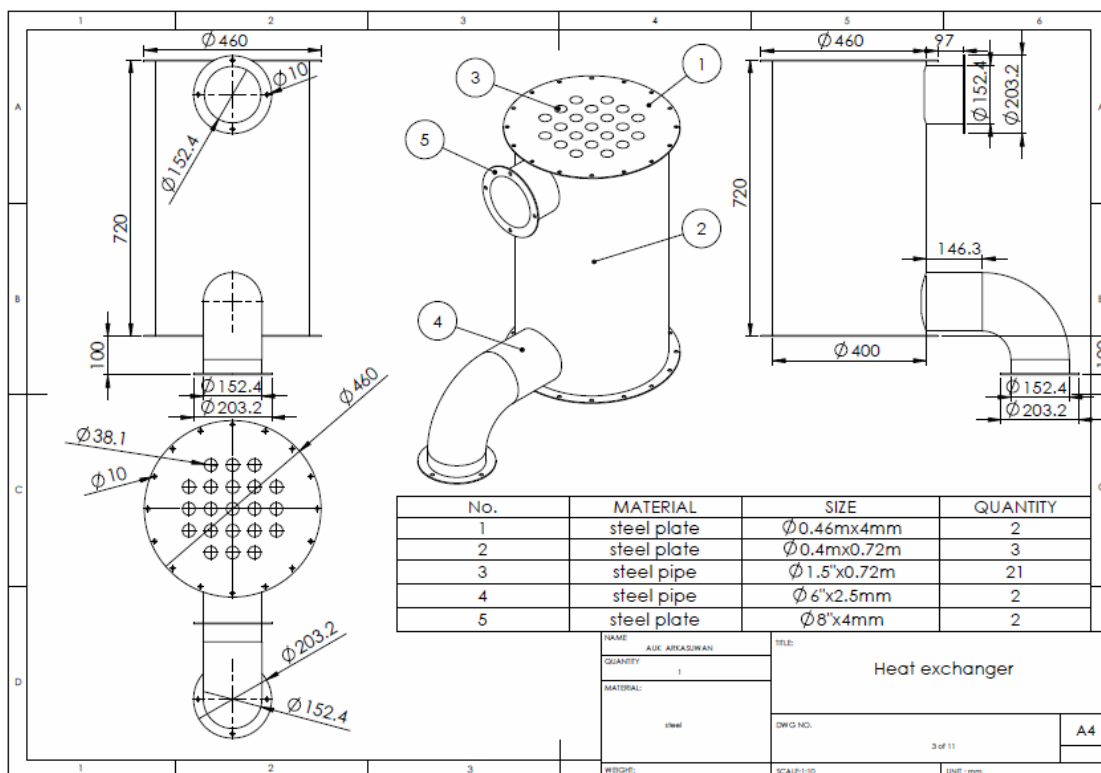
รูปที่ ข 2 แผงรับรังสีแสงอาทิตย์



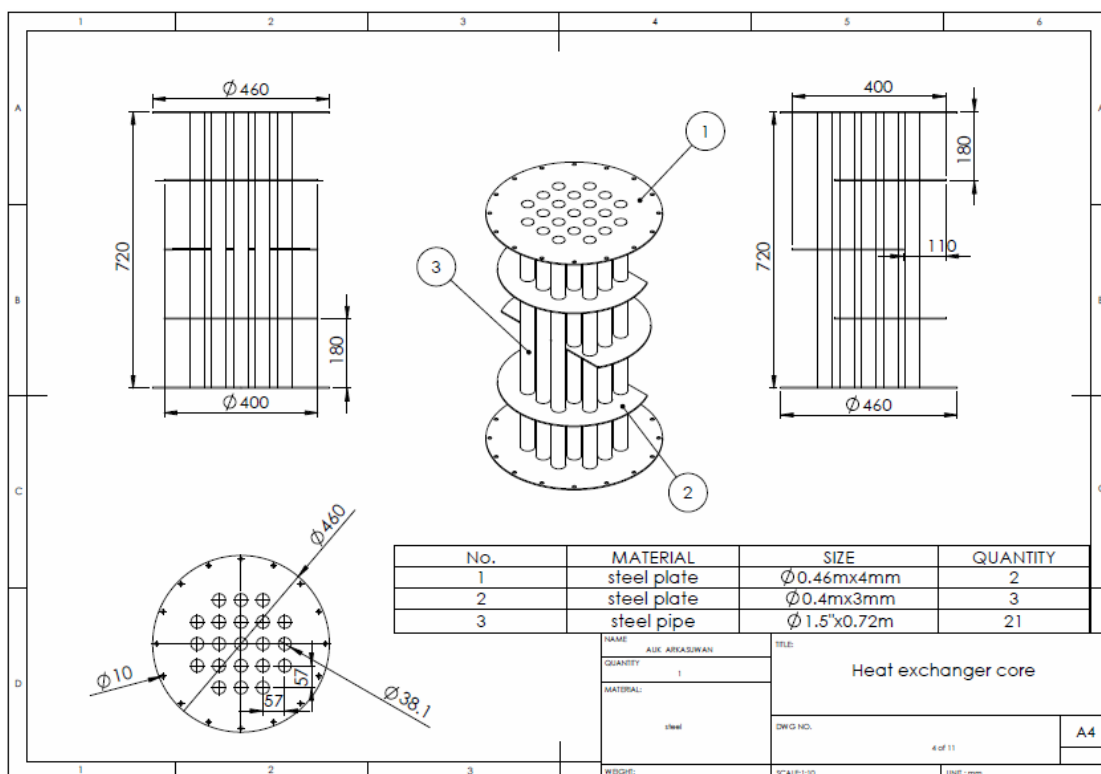
รูปที่ ข 3 อุปกรณ์กักเก็บความร้อน



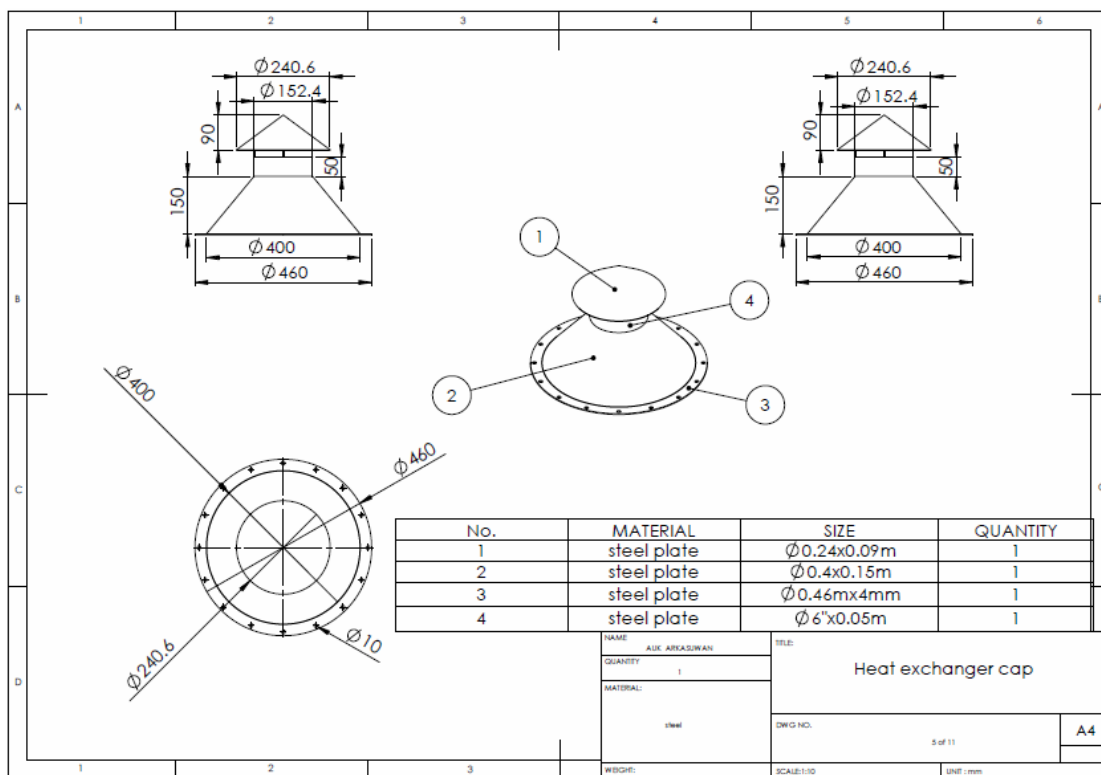
รูปที่ ข 4 กลุ่มท่อภายในอุปกรณ์กักเก็บความร้อน



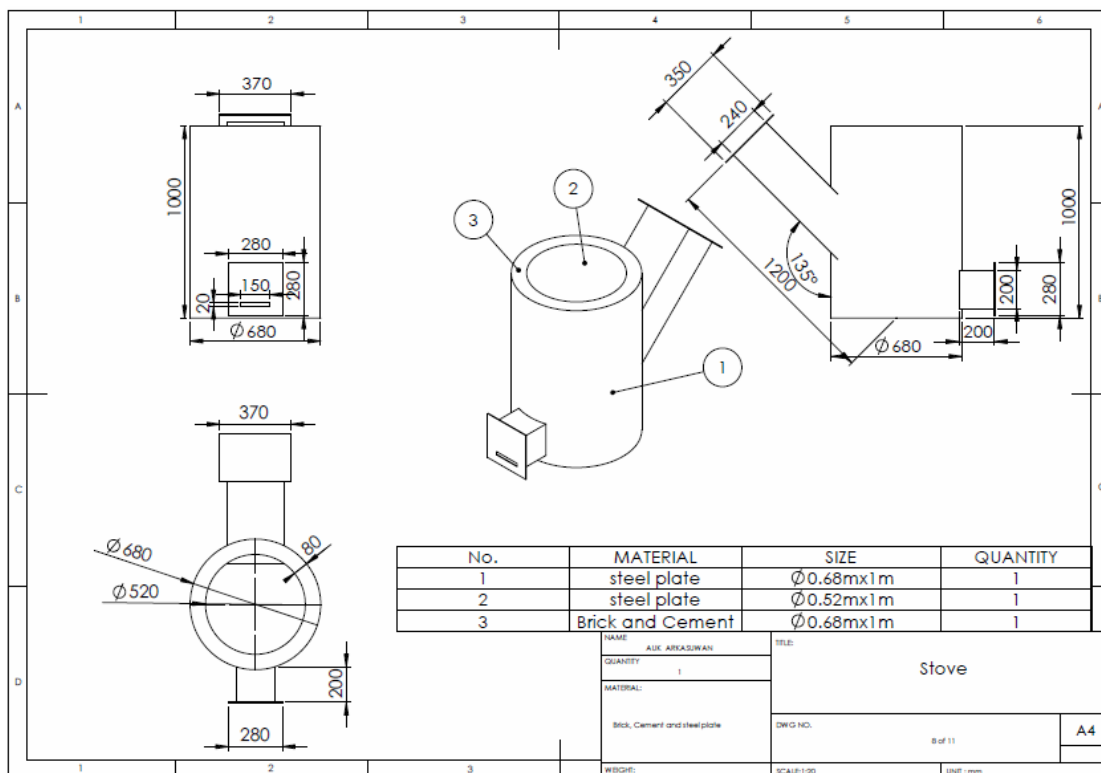
รูปที่ ข 5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



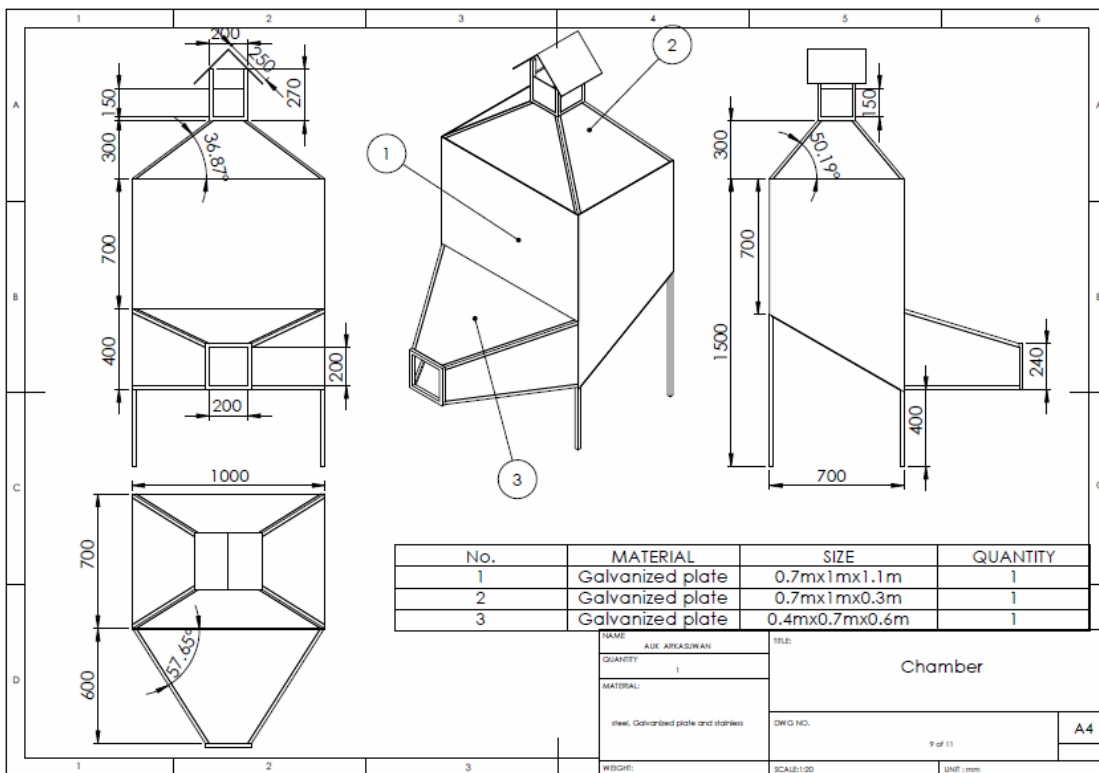
รูปที่ ข 6 กลุ่มท่อภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



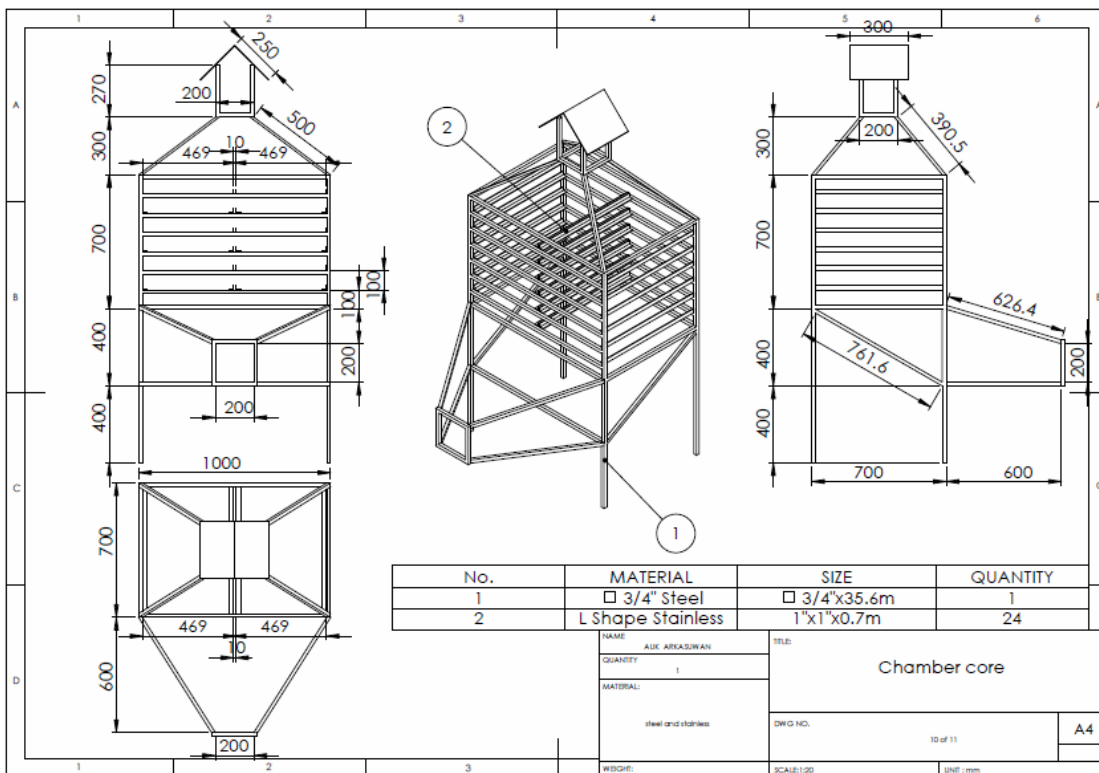
รูปที่ ข 7 ปล่องระบายไอเสียของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



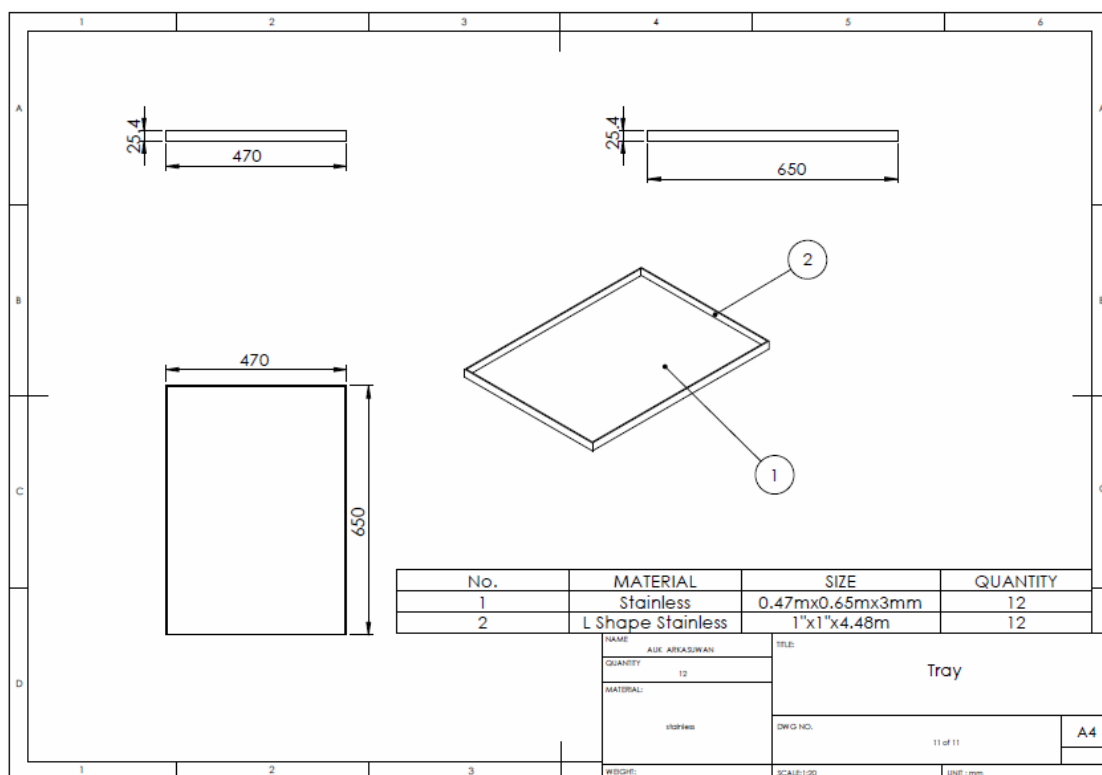
รูปที่ ข 8 เตาเผาไม้ฟืน



รูปที่ 9 ห้องอบแห้ง



รูปที่ 10 โครงสร้างภายในของห้องอบแห้ง



รูปที่ 11 ถาดวางถ้วยเก็บมือนาง

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองเครื่องอบแห้งกล้วยเล็บมือนางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล

ตารางที่ ค 1 ข้อมูลอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่างๆและอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555

	Time (hr)	Temperature (°C)							
		T1	T2	T3	T4	T5	Tch,ave	T13	T17
1 day	10:00	32.1	41.1	37.5	37.4	36.7	31.5	31.3	34.3
	11:00	32.5	36.7	39.8	41.7	41.8	37.0	34.4	37.1
	12:00	34.2	38.9	49.0	53.8	52.2	45.4	41.2	44.8
	13:00	35.4	41.4	59.1	65.4	63.7	57.1	51.5	53.8
	14:00	36.2	43.5	54.8	58.2	58.3	55.1	50.8	56.5
	15:00	36.5	42.4	65.4	71.4	68.7	61.9	56.2	57.4
	16:00	35.8	39.1	55.1	60.4	60.3	57.8	54.1	60.7
	17:00	35.8	39.1	48.5	51.1	51.4	50.0	47.8	61.2
	18:00	33.5	34.8	52.7	56.5	54.8	51.6	49.0	60.4
	19:00	31.4	31.6	64.8	71.6	68.4	64.3	60.3	61.2
	20:00	29.9	29.5	62.2	68.5	66.4	64.5	61.1	72.3
	21:00	29.3	28.8	55.2	60.6	59.4	58.4	56.1	77.2
	22:00	28.3	27.9	43.0	46.0	46.1	46.4	45.5	70.6
23:00	27.2	26.7	53.9	61.3	58.5	55.4	53.1	77.9	
2 day	0:00	26.7	26.3	55.1	60.7	59.5	58.9	57.1	73.8
	1:00	26.5	26.0	50.7	54.8	53.7	53.1	51.8	69.3
	2:00	26.4	25.9	50.0	54.5	53.1	52.0	50.8	66.1
	3:00	26.1	25.6	58.2	64.5	62.2	60.8	59.0	71.5
	4:00	25.8	25.3	46.1	49.2	49.0	50.0	49.5	70.7
	5:00	25.3	24.9	49.7	53.2	51.2	49.9	49.1	65.5
	6:00	25.0	24.5	50.3	54.7	54.2	55.0	54.5	64.7
	7:00	25.2	24.7	55.8	61.7	59.2	57.7	56.6	64.7
	8:00	26.0	25.7	46.4	50.2	50.3	51.3	51.0	66.0
	9:00	28.3	29.5	49.3	53.4	51.8	49.8	49.1	65.0

	10:00	32.2	36.5	62.6	68.0	66.6	64.5	63.2	65.4
	11:00	34.5	40.0	54.3	56.4	56.4	55.7	55.0	66.8
	12:00	35.8	42.4	56.3	58.7	57.8	55.8	55.1	65.8
	13:00	36.6	43.7	59.2	63.0	62.8	62.0	61.4	66.4
	14:00	36.9	43.6	53.0	55.1	55.5	55.5	55.2	65.5
	15:00	36.3	41.8	49.1	50.8	51.6	51.9	51.8	63.8
	16:00	36.7	41.5	46.7	47.6	48.3	48.1	48.0	60.7

ตารางที่ ค 2 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศร้อนตำแหน่งต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555

	Time (hr)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)			Solar radiation (W/m^2)
		T14	T15	T16	
1 day	10:00	58.8	37.7	38.5	399.8
	11:00	107.3	54.4	43.9	405.3
	12:00	191.9	89.9	59.6	510.5
	13:00	169.2	116.2	70.9	594.7
	14:00	84.4	89.5	60.1	639.5
	15:00	151.1	129.0	75.0	454.0
	16:00	161.5	89.3	65.4	301.0
	17:00	104.1	67.3	53.9	234.8
	18:00	118.2	101.1	60.1	
	19:00	136.7	142.0	77.0	
	20:00	140.7	131.2	73.4	
	21:00	118.4	110.2	64.6	
	22:00	104.7	74.4	49.1	
23:00	235.0	127.1	69.5		
2 day	0:00	120.8	115.7	66.2	
	1:00	109.1	106.4	59.0	
	2:00	110.2	110.1	58.5	
	3:00	213.5	122.5	70.1	
	4:00	91.9	93.3	53.5	
	5:00	111.6	110.5	57.5	
	6:00	106.4	101.4	59.9	
	7:00	137.4	126.0	66.8	
	8:00	90.3	86.7	53.2	
	9:00	133.7	99.7	57.1	363.4

	10:00	112.7	114.9	70.8	433.5
	11:00	81.0	81.1	58.1	523.2
	12:00	92.2	91.5	60.2	641.3
	13:00	91.6	95.0	65.2	646.8
	14:00	82.6	72.9	56.9	637.7
	15:00	79.6	62.3	53.1	469.5
	16:00	65.8	55.3	48.7	428.6

ตารางที่ ค 3 ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555

	Time (hr)	RH (%)		Velocity (m/s)	
		RH1	RH2	V1	V2
1 day	10:00	62.3	64.5	0.68	0.71
	12:00	51.2	28.1	0.62	0.65
	14:00	49.1	18.5	0.74	0.69
	16:00	44.5	26.4	0.65	0.73
	18:00	67.5	19.3	0.79	0.74
	20:00	80.4	20.4	0.75	0.77
	22:00	89.7	23.8	0.87	0.75
2 day	0:00	94.6	24.3	0.76	0.69
	2:00	92.5	14.7	0.88	0.79
	4:00	91.3	36.4	0.65	0.81
	6:00	91.8	31.3	0.84	0.65
	8:00	90.4	33.7	0.76	0.79
	10:00	58.9	24.4	0.58	0.68
	12:00	48.4	15.8	0.67	0.75
	14:00	47.2	24.4	0.72	0.7
	16:00	42.6	29.8	0.63	0.69

ตารางที่ ค 4 ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เฝ้ามัฟไฟนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555

	Time (hr)	MC (%d.b.)						
		MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MCave
1 day	10:00	272.5	295.6	269.0	292.0	293.9	319.8	289.8
	12:00	200.4	224.5	214.6	240.7	244.9	278.0	232.7
	14:00	161.0	182.9	178.1	206.2	209.3	245.6	196.0
	16:00	127.3	146.4	145.4	171.4	173.2	207.4	160.7
	18:00	106.7	124.2	126.2	150.6	151.6	183.4	139.4
	20:00	84.0	98.5	102.9	124.2	123.6	151.8	113.2
	22:00	73.8	85.3	90.4	109.3	108.4	133.1	99.2
2 day	0:00	63.1	71.8	77.3	93.7	92.1	113.0	84.5
	2:00	56.3	63.3	68.5	82.6	80.7	98.1	74.4
	4:00	51.9	57.2	61.9	73.6	71.1	85.3	66.4
	6:00	48.4	52.7	57.0	66.9	64.1	76.1	60.5
	8:00	45.3	48.7	52.3	60.0	56.8	66.0	54.6
	10:00	41.5	44.4	47.4	53.1	49.4	56.3	48.5
	12:00	39.3	41.6	44.3	48.6	44.5	49.5	44.6
	14:00	37.8	39.9	42.0	45.5	41.1	44.5	41.8
	16:00	36.9	38.9	41.2	43.8	39.5	42.1	40.4

ตารางที่ ค 5 ข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่างๆและอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555

Date	Time (hr)	Temperature (°C)							
		T1	T2	T3	T4	T5	Tch,ave	T13	T17
1 day	19:00	28.7	27.9	42.7	44.7	45.3	45.2	45.2	75.3
	20:00	28.7	28.2	41.6	44.3	44.3	42.5	41.1	73.4
	21:00	28.2	27.7	45.9	49.6	48.8	42.7	39.4	70.5
	22:00	28.0	27.3	41.3	43.9	44.2	40.8	38.3	70.5
	23:00	27.3	26.7	49.0	54.2	52.5	46.9	42.9	70.1
2 day	0:00	26.4	25.8	43.6	47.3	47.6	45.4	42.3	79.5
	1:00	26.0	25.5	46.0	50.0	48.4	44.7	41.6	78.1
	2:00	26.8	26.2	52.5	58.4	57.4	53.9	49.8	98.8
	3:00	26.4	25.8	40.5	43.0	43.6	43.0	41.3	88.9
	4:00	25.9	25.4	44.1	47.9	46.7	43.9	41.7	80.7
	5:00	25.7	25.2	47.0	51.8	51.3	49.6	47.1	92.2
	6:00	25.1	24.7	38.0	40.3	40.8	40.6	39.5	85.0
	7:00	25.2	24.8	41.0	44.4	44.0	42.3	40.8	77.7
	8:00	26.1	26.1	39.4	42.4	42.9	42.2	41.2	74.8
	9:00	29.0	32.3	43.7	46.8	46.9	44.5	43.3	73.1
	10:00	31.4	35.7	48.8	50.7	50.8	48.6	47.0	72.8
	11:00	33.9	41.7	49.7	50.9	51.2	48.8	47.1	73.1
	12:00	33.9	40.7	47.7	49.1	49.5	47.9	46.6	72.1
	13:00	35.1	44.2	52.8	54.6	54.4	51.8	50.0	69.8
14:00	35.2	44.3	53.9	55.9	56.0	54.4	52.8	70.2	
15:00	34.8	43.5	49.7	51.0	51.7	51.3	50.6	70.7	
16:00	33.6	39.8	45.1	46.1	47.2	47.4	47.2	69.0	
17:00	31.2	33.6	42.8	45.2	45.5	45.2	44.9	66.2	
18:00	29.3	29.7	44.5	47.6	47.7	47.6	47.0	64.7	

	19:00	27.9	27.6	43.5	48.7	48.3	47.4	46.2	65.9
	20:00	27.8	27.5	44.1	48.8	48.3	47.3	46.2	68.1
	21:00	28.0	27.7	44.3	48.2	48.5	48.2	47.2	70.8
	22:00	27.6	27.1	45.1	49.4	48.5	47.4	46.5	71.5
	23:00	28.3	28.1	46.3	50.3	50.2	49.6	48.5	73.3
3 day	0:00	27.7	27.3	41.4	44.3	44.8	44.8	44.2	74.0
	1:00	27.8	27.5	38.1	40.2	41.0	40.9	40.4	72.1
	2:00	27.6	27.4	50.4	55.9	54.0	51.7	50.3	69.9
	3:00	26.7	26.2	41.0	45.0	45.6	46.4	46.1	74.4
	4:00	26.1	25.6	52.2	58.1	55.9	53.7	52.3	76.5
	5:00	24.8	24.3	45.5	49.9	50.1	50.6	49.9	88.1

ตารางที่ 6 ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555

	Time (hr)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)			Solar radiation (W/m^2)
		T14	T15	T16	
1 day	19:00	98.4	74.7	46.6	
	20:00	121.6	76.4	46.9	
	21:00	125.9	105.1	52.7	
	22:00	98.4	83.2	45.6	
	23:00	166.2	118.1	57.4	
2 day	0:00	106.0	90.1	50.2	
	1:00	156.5	108.2	52.8	
	2:00	169.9	118.1	61.8	
	3:00	82.5	74.0	45.2	
	4:00	144.0	104.2	50.7	
	5:00	130.8	106.5	54.8	
	6:00	81.9	71.3	42.6	
	7:00	114.0	93.8	47.1	
	8:00	97.6	79.4	45.0	
	9:00	91.1	80.4	49.7	551.2
	10:00	125.5	95.0	51.1	439.5
	11:00	108.3	80.1	50.1	758.7
	12:00	97.1	71.6	49.8	639.5
	13:00	105.8	88.0	55.7	789.8
14:00	106.2	88.8	57.4	744.7	
15:00	82.8	70.5	53.3	702.0	
16:00	66.0	59.2	48.5	539.0	
17:00	100.1	72.9	48.6	241.4	
18:00	122.8	96.1	50.4		

	19:00	145.0	96.2	52.0	
	20:00	141.7	97.4	51.9	
	21:00	115.2	89.5	50.0	
	22:00	132.6	100.9	52.6	
	23:00	123.7	96.0	51.9	
3 day	0:00	98.6	77.2	45.9	
	1:00	82.0	65.3	41.1	
	2:00	200.0	124.5	58.2	
	3:00	116.0	85.8	47.8	
	4:00	206.3	128.9	61.1	
	5:00	126.6	94.8	52.2	

ตารางที่ 7 ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555

	Time (hr)	RH (%)		Velocity (m/s)	
		RH1	RH2	V1	V2
1 day	19:00	88.2	58.4	0.62	0.73
	21:00	87.3	63.8	0.55	0.56
	23:00	88.3	56.3	0.66	0.59
2 day	1:00	94.1	40.9	0.72	0.78
	3:00	94.7	41.8	0.68	0.71
	5:00	96.4	53.2	0.66	0.87
	7:00	97.2	45.4	0.74	0.62
	9:00	72.5	33.8	0.76	0.72
	11:00	64.2	37.8	0.51	0.67
	13:00	49.6	20.8	0.73	0.68
	15:00	40.9	32.3	0.7	0.74
	17:00	71.5	35.7	0.82	0.64
	19:00	87.1	45.2	0.61	0.71
	21:00	89.7	40.5	0.69	0.65
	23:00	88.9	41.3	0.72	0.67
3 day	1:00	88.1	30.8	0.77	0.81
	3:00	95.4	42.2	0.87	0.61
	5:00	93.3	32.3	0.81	0.74

ตารางที่ 8 ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เฝ้ามัไฟนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555

	Time (hr)	MC (%d.b.)						
		MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MCave
1 day	19:00	327.1	316.1	319.8	321.8	311.3	318.9	319.1
	21:00	234.0	241.3	262.1	270.0	267.6	283.4	259.7
	23:00	191.6	199.8	222.1	230.9	233.4	249.1	221.2
2 day	1:00	158.7	167.1	189.0	197.6	201.3	216.5	188.4
	3:00	140.0	148.1	169.4	176.8	180.7	194.7	168.3
	5:00	121.6	129.8	149.9	156.2	159.7	172.4	148.3
	7:00	109.6	117.8	137.3	142.7	146.0	157.6	135.2
	9:00	96.3	104.0	122.9	127.2	130.5	140.7	120.3
	11:00	83.6	91.0	108.9	111.8	115.0	124.1	105.7
	13:00	70.3	77.5	94.2	96.1	99.7	107.4	90.9
	15:00	59.5	66.1	81.2	82.1	85.7	91.9	77.8
	17:00	52.5	58.3	72.4	72.6	76.5	81.2	68.9
	19:00	46.9	52.4	65.0	64.7	68.9	72.5	61.8
	21:00	42.1	47.0	58.7	57.8	62.1	64.7	55.4
23:00	38.5	42.7	52.9	51.6	56.1	57.9	49.9	
3 day	1:00	34.9	38.7	48.3	46.4	50.9	51.4	45.1
	3:00	31.1	34.0	42.7	40.5	45.0	44.6	39.7
	5:00	28.2	30.3	38.0	35.8	40.1	38.8	35.2

ตารางที่ ค 9 ข้อมูลอุณหภูมิความร้อนตำแหน่งต่างๆและอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm (สลักขาด) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555

	Time (hr)	Temperature (°C)							
		T1	T2	T3	T4	T5	Tch,ave	T13	T17
1 day	19:00	26.9	29.4	45.1	53.4	30.8	30.5	30.5	72.0
	20:00	27.1	28.8	53.1	59.8	50.1	43.0	39.7	70.8
	21:00	27.1	26.5	53.1	58.2	57.6	52.5	47.7	81.8
	22:00	26.5	25.9	40.9	43.0	43.6	42.2	39.9	83.6
	23:00	26.4	25.9	43.7	47.4	46.7	43.8	40.9	77.7
2 day	0:00	26.1	25.6	38.7	41.3	42.0	41.3	39.3	76.5
	1:00	25.9	25.4	45.9	51.1	49.5	46.2	43.0	74.7
	2:00	25.8	25.3	48.6	55.0	54.2	51.9	48.3	81.7
	3:00	25.7	25.1	42.7	46.9	47.1	46.3	44.1	85.4
	4:00	25.3	24.8	47.0	51.4	50.0	47.4	44.7	82.4
	5:00	25.0	24.5	46.2	50.4	50.4	49.7	47.3	90.4
	6:00	24.6	24.1	38.5	41.0	41.3	40.9	39.9	87.1
	7:00	24.3	23.9	47.6	52.1	51.0	48.6	46.8	85.1
	8:00	25.8	25.7	43.9	47.3	47.6	46.7	45.7	90.5
	9:00	29.5	32.9	48.6	51.3	50.8	48.0	47.0	87.2
	10:00	31.4	36.1	51.4	53.5	53.5	51.6	50.3	88.2
	11:00	32.1	36.5	46.8	48.0	48.6	47.6	46.8	85.8
	12:00	34.5	43.1	49.2	50.1	50.7	49.5	48.6	81.0
	13:00	35.2	43.3	49.2	50.4	50.8	49.5	48.6	75.9
	14:00	35.7	44.4	50.5	51.7	52.4	51.5	50.8	72.2
15:00	34.6	40.2	47.1	48.5	49.3	49.0	48.6	69.6	
16:00	33.8	39.0	45.6	46.9	47.8	47.8	47.5	67.5	
17:00	31.9	34.1	45.4	47.9	48.3	48.1	47.8	65.9	
18:00	29.8	29.9	43.0	45.6	46.1	46.3	46.0	66.0	

	19:00	29.0	28.5	49.0	52.9	51.5	49.6	48.3	68.9
	20:00	28.8	28.2	54.4	59.4	58.6	57.8	56.3	85.7
	21:00	27.7	27.1	43.4	46.3	46.7	46.9	46.3	88.3
	22:00	27.0	26.5	54.9	59.4	57.6	55.8	54.2	88.6
	23:00	26.7	26.1	49.8	53.4	53.0	52.8	51.8	95.2
3 day	0:00	26.2	25.6	41.7	44.0	44.6	45.0	44.5	90.9
	1:00	25.6	25.0	44.5	47.9	47.1	46.3	45.6	83.6
	2:00	25.7	25.1	47.3	50.6	50.2	50.0	49.2	86.5
	3:00	25.5	24.9	41.0	43.4	44.0	44.8	44.5	87.4
	4:00	25.4	25.0	51.8	55.7	53.7	51.9	50.7	85.0
	5:00	24.8	24.3	48.4	52.3	52.2	52.9	52.2	95.4

ตารางที่ ค 10 ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่างๆ ของ การทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555

	Time (hr)	Temperature (°C)			Solar radiation (W/m ²)
		T14	T15	T16	
1 day	19:00	96.9	70.6	53.8	
	20:00	209.4	114.8	63.6	
	21:00	183.7	109.6	61.3	
	22:00	109.5	73.5	45.0	
	23:00	160.5	94.4	50.2	
2 day	0:00	97.4	73.3	43.5	
	1:00	221.5	110.2	54.4	
	2:00	193.7	110.6	59.6	
	3:00	145.6	87.5	50.5	
	4:00	198.8	107.8	54.2	
	5:00	155.1	98.3	53.4	
	6:00	107.1	74.5	43.4	
	7:00	204.7	114.4	55.2	
	8:00	133.2	87.9	49.7	
	9:00	143.0	92.0	53.6	508.8
	10:00	141.8	93.2	54.3	445.9
	11:00	92.9	73.4	49.2	495.8
	12:00	71.8	65.3	51.2	823.9
	13:00	85.4	67.4	52.1	733.8
	14:00	94.8	72.3	53.4	754.5
	15:00	92.3	68.6	50.3	473.8
	16:00	91.3	67.2	48.9	472.2
	17:00	121.2	83.1	51.1	187.8
18:00	126.5	80.9	47.8		

	19:00	216.9	104.9	55.1	
	20:00	212.3	112.5	61.9	
	21:00	122.7	81.1	48.2	
	22:00	226.0	119.1	61.6	
	23:00	165.6	101.6	55.1	
3 day	0:00	112.8	76.0	45.5	
	1:00	169.4	94.1	50.3	
	2:00	167.5	101.2	52.2	
	3:00	110.8	76.7	45.1	
	4:00	241.8	115.8	57.7	
	5:00	169.1	98.3	54.7	

ตารางที่ ค 11 ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm (สลั่บถาด) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555

	Time (hr)	RH (%)		Velocity (m/s)	
		RH1	RH2	V1	V2
1 day	19:00	88.2	54.2	0.87	0.73
	21:00	89.6	56.1	0.68	0.71
	23:00	90.4	52.3	0.62	0.58
2 day	1:00	90.5	35.7	0.55	0.79
	3:00	91.6	50.4	0.74	0.62
	5:00	92.2	44.5	0.71	0.59
	7:00	92.6	30.8	0.69	0.83
	9:00	77.2	30.8	0.73	0.68
	11:00	59.8	29.1	0.66	0.63
	13:00	52.5	28.9	0.73	0.79
	15:00	57.8	32.7	0.77	0.65
	17:00	61.2	30.4	0.58	0.75
	19:00	86.6	21.7	0.98	0.71
	21:00	93.8	31.5	0.65	0.7
	23:00	92.5	35.1	0.74	0.65
3 day	1:00	95.3	34.9	0.81	0.72
	3:00	94.8	33.7	0.62	0.77
	5:00	95.9	35	0.73	0.69

ตารางที่ ค 12 ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 30 kg เเผาไม้พื้นยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555

	Time (hr)	MC (%d.b.)						
		MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MCave
1 day	19:00	299.8	295.2	303.7	304.9	311.5	306.5	303.6
	21:00	196.1	203.4	239.2	257.1	268.4	273.1	239.6
	23:00	169.2	176.8	208.4	226.1	240.4	249.2	211.7
2 day	1:00	145.5	153.1	180.7	197.4	212.4	223.5	185.4
	3:00	125.3	133.0	157.2	172.4	186.9	198.4	162.2
	5:00	106.2	114.0	135.6	148.9	162.2	174.2	140.2
	7:00	95.7	103.7	121.2	133.9	141.8	152.9	124.9
	9:00	85.8	93.6	107.5	119.6	123.6	134.0	110.7
	11:00	74.1	81.8	91.6	103.0	104.1	113.2	94.6
	13:00	66.4	74.0	81.5	92.1	91.7	101.2	84.5
	15:00	58.3	65.3	71.0	80.6	78.8	87.5	73.6
	17:00	52.4	59.1	63.0	71.9	69.6	77.2	65.5
	19:00	46.3	52.4	54.7	63.1	59.9	66.6	57.2
	21:00	41.0	46.7	48.1	55.1	52.1	57.4	50.1
23:00	35.9	41.0	41.4	47.2	44.5	48.6	43.1	
3 day	1:00	33.3	37.8	38.0	42.8	40.3	43.8	39.3
	3:00	31.0	35.0	34.8	38.8	36.7	39.3	35.9
	5:00	28.0	31.5	31.0	33.9	32.6	34.5	31.9

ตารางที่ ค 13 ข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนตำแหน่งต่างๆและอุณหภูมิพาราฟิน ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm (สลั้บถาด) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556

	Time (hr)	Temperature (°C)							
		T1	T2	T3	T4	T5	Tch,ave	T13	T17
1 day	19:00	28.1	27.7	46.6	51.7	52.4	41.0	41.4	97.7
	20:00	27.6	27.0	51.0	54.8	52.9	41.5	41.7	93.0
	21:00	27.1	26.5	45.2	48.2	47.6	39.7	40.0	91.1
	22:00	27.4	26.7	56.3	60.1	57.5	45.4	45.4	86.9
	23:00	27.3	26.7	45.4	47.9	47.7	41.3	41.0	87.8
2 day	0:00	26.5	25.8	45.8	49.3	48.1	41.1	40.7	83.1
	1:00	26.1	25.4	44.9	47.4	46.9	41.3	40.8	83.3
	2:00	25.6	24.9	47.2	50.0	48.5	41.8	41.0	82.1
	3:00	24.8	24.0	45.1	48.2	47.7	43.0	42.2	85.6
	4:00	24.8	24.0	41.1	43.8	43.2	39.3	38.6	83.6
	5:00	24.8	23.8	58.3	62.6	59.5	50.5	48.4	87.3
	6:00	24.9	23.8	46.8	49.7	49.3	44.4	44.2	93.9
	7:00	24.5	23.6	46.3	49.1	47.6	42.1	41.4	85.4
	8:00	25.5	25.0	51.2	54.4	53.5	47.9	46.8	89.8
	9:00	28.0	28.9	45.7	47.9	47.3	43.0	42.3	86.9
	10:00	30.0	32.3	57.7	60.5	58.8	51.8	50.5	87.3
	11:00	32.2	37.2	50.7	52.0	51.7	47.6	46.9	88.7
	12:00	34.9	43.1	51.8	52.5	52.3	47.8	47.0	82.4
	13:00	35.8	44.7	50.9	51.3	51.5	48.0	47.6	77.5
14:00	36.3	46.0	50.4	50.8	51.2	48.1	47.6	73.3	
15:00	35.5	44.1	47.5	47.7	48.4	46.1	46.0	69.3	
16:00	35.0	41.3	44.6	44.9	45.9	44.4	44.7	65.8	
17:00	31.9	35.1	42.7	44.5	44.9	43.6	44.0	62.5	
18:00	29.3	29.4	41.4	43.9	44.2	43.2	43.0	61.0	

	19:00	28.8	28.4	48.4	52.3	50.7	46.8	45.5	61.3
	20:00	28.0	27.4	44.2	47.0	47.2	46.4	45.8	67.6
	21:00	27.7	27.2	42.5	45.0	44.5	42.7	42.1	69.8
	22:00	27.4	26.7	55.7	59.5	57.5	53.7	52.0	74.6
	23:00	26.8	26.1	46.3	49.2	49.0	48.5	48.0	85.3
3 day	0:00	26.5	25.7	40.0	41.9	42.1	41.6	41.2	80.6
	1:00	25.7	24.8	41.0	44.4	43.9	42.5	41.7	75.6
	2:00	25.2	24.4	38.8	41.0	41.1	40.8	40.3	74.1
	3:00	24.9	24.0	39.9	41.7	41.6	40.8	40.1	72.7
	4:00	24.6	23.8	48.2	51.9	50.1	47.3	45.9	74.2
	5:00	24.5	23.5	45.7	48.9	48.3	47.6	46.9	82.1
	6:00	24.1	23.3	43.0	46.8	45.9	44.5	43.6	81.4
	7:00	24.1	23.2	45.4	48.3	47.9	47.3	46.5	83.7
	8:00	25.5	24.9	45.5	47.7	47.2	46.2	45.4	85.4
	9:00	28.6	30.3	44.8	46.8	46.8	45.6	45.4	83.4

ตารางที่ ค 14 ข้อมูลอุณหภูมิก๊าซร้อนตำแหน่งต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาต่างๆ ของ การทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้พื้นยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556

	Time (hr)	Temperature (°C)			Solar radiation (W/m ²)
		T14	T15	T16	
1 day	19:00	55	73.4	57.1	
	20:00	192.1	104.6	57.7	
	21:00	150.2	87.6	50.5	
	22:00	248.3	118.5	62.0	
	23:00	152.2	85.0	49.4	
2 day	0:00	189.9	99.3	51.7	
	1:00	168.0	93.3	49.2	
	2:00	194.6	103.6	51.7	
	3:00	170.5	96.4	50.3	
	4:00	147.3	85.4	45.6	
	5:00	279.8	131.0	64.5	
	6:00	177.5	94.0	51.6	
	7:00	208.7	99.5	51.4	
	8:00	210.1	104.1	55.8	
	9:00	162.2	86.2	49.9	508.8
	10:00	235.0	113.2	61.1	294.0
	11:00	142.0	80.5	52.7	552.2
	12:00	115.0	71.4	52.6	877.2
	13:00	93.6	64.5	51.9	875.4
	14:00	79.3	59.6	51.5	840.2
	15:00	67.7	54.7	49.0	742.8
	16:00	59.8	51.0	46.6	609.4
	17:00	91.7	65.9	47.4	300.6
18:00	124.6	78.4	46.3		

	19:00	202.1	103.8	53.7	
	20:00	142.7	88.6	48.9	
	21:00	149.8	87.6	46.7	
	22:00	232.9	120.0	60.6	
	23:00	158.0	94.3	51.0	
3 day	0:00	126.3	76.8	43.2	
	1:00	149.0	88.5	47.0	
	2:00	132.7	77.8	42.7	
	3:00	140.3	82.8	42.7	
	4:00	224.6	110.8	53.7	
	5:00	171.4	98.2	50.4	
	6:00	165.6	91.7	49.2	
	7:00	194.2	96.9	50.3	
	8:00	184.2	96.0	48.4	
	9:00	131.6	79.5	47.6	

ตารางที่ ค 15 ข้อมูลค่าความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เผาไม้ฟืนยาว 35 cm (สลักถาด) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556

	Time (hr)	RH (%)		Velocity (m/s)	
		RH1	RH2	V1	V2
1 day	19:00	77.5	54.6	0.63	0.66
	21:00	80.3	55.8	0.69	0.75
	23:00	83.1	56.5	0.74	0.69
2 day	1:00	87.4	57.6	0.7	0.73
	3:00	91.5	50.3	0.8	0.76
	5:00	88.6	35.8	0.63	0.68
	7:00	97.1	39.8	0.72	0.76
	9:00	79.5	34.6	0.57	0.66
	11:00	58.2	32.9	0.67	0.71
	13:00	46.9	29.7	0.64	0.65
	15:00	37.8	27	0.74	0.69
	17:00	59.5	34.7	0.63	0.68
	19:00	76.7	28.1	0.71	0.75
	21:00	80.3	39.2	0.81	0.71
	23:00	84.5	36.3	0.69	0.73
3 day	1:00	91.4	40.6	0.72	0.75
	3:00	95.2	42.3	0.68	0.66
	5:00	95.5	36.2	0.76	0.74
	7:00	97	33.8	0.71	0.72
	9:00	73.8	34.9	0.65	0.67

ตารางที่ ค 16 ข้อมูลความชื้นในกล้วย ณ เวลาต่างๆ ของการทดลองอบกล้วย 60 kg เฝ้ามัฟฟินยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556

	Time (hr)	MC (%d.b.)						
		MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MCave
1 day	19:00	293.7	302.4	295.9	298.0	297.2	294.9	297.0
	21:00	200.7	214.1	253.4	258.1	264.3	267.3	243.0
	23:00	160.7	173.0	217.3	220.1	234.7	241.4	207.9
2 day	1:00	138.5	149.3	191.2	193.5	214.2	219.9	184.4
	3:00	120.6	130.1	169.6	171.0	195.8	200.1	164.5
	5:00	103.9	112.3	149.9	150.4	178.6	182.6	146.3
	7:00	95.1	103.1	137.3	137.1	155.3	157.5	130.9
	9:00	86.5	93.9	122.5	122.0	130.7	131.5	114.5
	11:00	78.8	85.4	109.3	108.0	110.8	110.5	100.5
	13:00	71.6	77.2	96.7	95.6	94.8	94.0	88.3
	15:00	65.9	70.4	85.4	85.0	81.9	81.1	78.3
	17:00	61.4	65.1	77.5	76.9	72.6	71.8	70.9
	19:00	57.6	60.4	70.7	69.6	64.4	63.5	64.4
	21:00	53.1	56.2	64.3	63.2	57.6	56.7	58.5
23:00	48.4	50.5	56.7	54.2	48.3	47.4	50.9	
3 day	1:00	46.1	47.5	50.7	49.6	43.8	43.1	46.8
	3:00	44.0	45.0	45.9	45.8	40.3	39.7	43.4
	5:00	41.2	41.3	41.2	40.4	35.3	34.9	39.0
	7:00	39.2	38.7	37.5	36.8	32.0	31.7	36.0
	9:00	37.0	35.9	34.4	33.3	28.7	28.6	33.0

ภาคผนวก ง
การคำนวณสมรรถนะ

ง 1 การทดลองอบกล้วย 30 kg เฝ้ามัไฟนยาว 1 m ในวันที่ 11-12 มิถุนายน 2555

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

การคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{dryer} = \frac{m_L L}{IA + m_{wood} (HV)_{wood} + E_e}$$

โดยที่

- η_{dryer} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของเครื่องอบแห้ง
 m_L = ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
 L = ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
 I = ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m²)
 A = พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (m²)
 m_{wood} = ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
 $(HV)_{wood}$ = ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg)
 E_e = ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

คำนวณจากการทดลอง 30 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 30 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 54.6 °C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2370$ kJ/kg

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ - มวลกล้วยหลังอบ

$$= 30.1 \text{ kg} - 9.3 \text{ kg} = 20.8 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 25,000 kJ/m² พื้นที่รับแสง 4.55 m²

ใช้ไม้ฟืนจำนวน 71.6 kg มีความชื้น 17.6 %d.b. ให้ค่าความร้อน 15200 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม 0.75 kw x (30x60x60)s = 81,000 kJ

$$\eta_{dryer} = \frac{20.8 \text{ kg} \times 2370 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{25000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{ m}^2 + 71.6 \text{ kg} \times 15200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 81000 \text{ kJ}}$$

$$= 0.038$$

$$= 3.8\%$$

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

การคำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\eta_{solar} = \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA}$$

โดยที่

- η_{solar} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์
- m_a = ปริมาณอากาศที่เข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (kg)
- c_p = ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg°C)
- I = ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m²)
- A = พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์
- T_2 = อุณหภูมิอากาศที่ออกจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (°C)
- T_1 = อุณหภูมิอากาศที่เข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (°C)

และค่า m_a หาได้จากสูตร

$$m_a = \rho V a t$$

โดยที่

- A = พื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหลเข้าอากาศของแผงรับแสงอาทิตย์
มีค่าเท่ากับ (m²)
- ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)
- V = ความเร็วของอากาศเฉลี่ยที่ทางเข้าแผงรับรังสี (m/s)
- t = เวลา (s)

หาอัตราการไหลเชิงมวล โดยมีค่าต่างๆดังนี้

$$V = 0.72 \text{ m/s} \quad A = 1.75 \times 0.12 \text{ m}^2 \quad \rho = 1.159 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= (1.159 \text{ kg/m}^3) \times (0.72 \text{ m/s}) \times (1.75 \times 0.12 \text{ m}^2) \\ &= 0.175 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางวัน ช่วงเวลา 10.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_1 = 35.2^\circ\text{C} \quad T_2 = 40.2^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 7 \text{ hr} \quad IA = 51339 \text{ kJ}$$

คำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

$$\begin{aligned} \eta_{solar} &= \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA} \\ &= \frac{0.175 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (7 \times 60 \times 60) \text{ s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (40.2 - 35.2)^\circ\text{C}}{51339 \text{ kJ}} \\ &= 0.433 \\ &= 43.3\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-16.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_1 = 35.5^\circ\text{C} \quad T_2 = 41.3^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 7 \text{ hr} \quad IA = 62341 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \eta_{solar} &= \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA} \\ &= \frac{0.175 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (7 \times 60 \times 60) \text{ s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (41.3 - 35.5)^\circ\text{C}}{62341 \text{ kJ}} \\ &= 0.413 \\ &= 41.3\% \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\eta_{biomass} = \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}}$$

โดยที่

- $\eta_{biomass}$ = ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนด้วยชีวมวล
- m_a = ปริมาณอากาศที่เข้าสู่ระบบแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนด้วยชีวมวล (kg)
- c_p = ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg°C)
- m_{wood} = ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
- $(HV)_{wood}$ = ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg)
- T_2 = อุณหภูมิอากาศที่เข้าอุปกรณ์เก็บกักความร้อน (°C)
- T_4 = อุณหภูมิอากาศที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางวัน ช่วงเวลา 10.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 40.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_4 = 57.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \quad t = 7 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 18 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 15200 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} \eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.175 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (7 \times 60 \times 60) \text{ s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \times (57.4 - 40.2)^{\circ}\text{C}}{18 \text{ kg} \times 15200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\ &= 0.279 \\ &= 27.9\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 17.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 27.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_4 = 57.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} \quad t = 16 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 44.2 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 15200 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.175 \frac{kg}{s} \times (16 \times 60 \times 60) s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (57.4 - 27.4)^\circ C}{44.2 kg \times 15200 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.453 \\ &= 45.3\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-16.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 41.3^\circ C \quad T_4 = 57.4^\circ C \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ C \quad t = 7 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 9.4 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 15200 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.175 \frac{kg}{s} \times (7 \times 60 \times 60) s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (57.4 - 41.3)^\circ C}{9.4 kg \times 15200 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.500 \\ &= 50.0\%\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\text{Actual heat transfer rate}}{\text{Maximun possible heat transfer rate}} \\ &= \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}}\end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \text{ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล} \\ T_{h,i} - T_{h,o} &= \text{ผลต่างอุณหภูมิก่อนเข้าระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและหลังผ่าน} \\ &\text{ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน } (T_{14} - T_{16})\end{aligned}$$

$T_{h,i} - T_{c,i} =$ ผลต่างมากที่สุดของอุณหภูมิในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีว
มวล ($T_{14} - T_2$)

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางวัน ช่วงเวลา 10.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 40.2^\circ\text{C} \quad T_{14} = 121.8^\circ\text{C} \quad T_{16} = 61.2^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{121.8^\circ\text{C} - 61.2^\circ\text{C}}{121.8^\circ\text{C} - 40.2^\circ\text{C}} \\ &= 0.7426 \\ &= 74.26\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 17.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 27.4^\circ\text{C} \quad T_{14} = 121.8^\circ\text{C} \quad T_{16} = 61.2^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{121.8^\circ\text{C} - 61.2^\circ\text{C}}{121.8^\circ\text{C} - 27.4^\circ\text{C}} \\ &= 0.6419 \\ &= 64.19\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-16.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 41.3^\circ\text{C} \quad T_{14} = 121.8^\circ\text{C} \quad T_{16} = 61.2^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{121.8^\circ\text{C} - 61.2^\circ\text{C}}{121.8^\circ\text{C} - 41.3^\circ\text{C}} \\ &= 0.7528 \\ &= 75.28\% \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SEC = \frac{IA + m_{wood}(HV)_{wood} + E_e}{m_L}$$

โดยที่

- m_L = ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ (kg)
 I = ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงรับรังสี (kJ/m²)
 A = พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (m²)
 m_{wood} = ปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
 $(HV)_{wood}$ = ค่าความร้อนของไม้ฟืน (kJ/kg)
 E_e = ไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลมเป่าอากาศ (kJ)

คำนวณจากการทดลอง 30 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 30 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 54.6 °C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2370$ kJ/kg

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย} &= \text{มวลกล้วยก่อนอบ} - \text{มวลกล้วยหลังอบ} \\ &= 30.1 \text{ kg} - 9.3 \text{ kg} = 20.8 \text{ kg} \end{aligned}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 25,000 kJ/m² พื้นที่รับแสง 4.55 m²

ใช้ไม้ฟืนจำนวน 71.6 kg มีความชื้น 17.6 %d.b. ให้ค่าความร้อน 15200 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม 0.75 kw x (30x60x60)s = 81,000 kJ

แทนค่า

$$\begin{aligned} SEC_{alone} &= \frac{25000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{m}^2 + 71.6 \text{kg} \times 15200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 81000 \text{kJ}}{20.8 \text{kg}} \\ &= 61686 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 61.7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

เนื่องจากเผาไม้ฟืนเพราะอบแห้ง
ดังนั้น

$$SEC_{alone} = SEC_{total} = 61.7 \frac{MJ}{kg}$$

ง 2 การทดลองอบกล้วย 30 kg เฝ้ามัไฟนยาว 35 cm ในวันที่ 25-27 ตุลาคม 2555

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

คำนวณจากการทดลอง 34 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 34 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 46.9 °C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2390.2 \text{ kJ/kg}$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ – มวลกล้วยหลังอบ

$$= 30.2 \text{ kg} - 10 \text{ kg} = 20.2 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 17522 kJ/m^2 พื้นที่รับแสง 4.55 m^2

ใช้ไม้ไฟนจำนวน 74.9 kg มีความชื้น 19.9 %d.b. ให้ค่าความร้อน 14858 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม $0.75 \text{ kw} \times (34 \times 60 \times 60) \text{ s} = 91800 \text{ kJ}$

$$\begin{aligned} \eta_{dryer} &= \frac{20.2 \text{ kg} \times 2390.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{17522 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{ m}^2 + 74.9 \text{ kg} \times 14858 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 91800 \text{ kJ}} \\ &= 0.0376 \\ &= 3.76\% \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

หาอัตราการไหลเชิงมวล โดยมีค่าต่างๆดังนี้

$$V = 0.7 \text{ m/s} \quad A = 1.75 \times 0.12 \text{ m}^2 \quad \rho = 1.170 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= (1.170 \text{ kg/m}^3) \times (0.7 \text{ m/s}) \times (1.75 \times 0.12 \text{ m}^2) \\ &= 0.172 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_1 = 33.6 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_2 = 40.4 \text{ }^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 8 \text{ hr} \quad IA = 79728 \text{ kJ}$$

คำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
 \eta_{solar} &= \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA} \\
 &= \frac{0.172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (8 \times 60 \times 60) \text{s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (40.4 - 33.6)^\circ\text{C}}{79728 \text{kJ}} \\
 &= 0.425 \\
 &= 42.5\%
 \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 26.5^\circ\text{C} \quad T_4 = 48.6^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 14 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 32.1 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 14858 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}
 \eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\
 &= \frac{0.172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (14 \times 60 \times 60) \text{s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (48.6 - 26.5)^\circ\text{C}}{32.1 \text{kg} \times 14858 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\
 &= 0.404 \\
 &= 40.4\%
 \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 40.4^\circ\text{C} \quad T_4 = 48.6^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 8 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 11.4 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 14858 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.172 \frac{kg}{s} \times (8 \times 60 \times 60)s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (48.6 - 40.4)^\circ C}{11.4kg \times 14858 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.241 \\ &= 24.1\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 2 ถึง 5.00 น. วันที่ 3 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 27.2^\circ C \quad T_4 = 48.6^\circ C \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ C \quad t = 12 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 31.4 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 14858 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.172 \frac{kg}{s} \times (12 \times 60 \times 60)s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (48.6 - 27.2)^\circ C}{31.4kg \times 14858 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.343 \\ &= 34.3\%\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลสามารถคำนวณได้ ดังนี้

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 26.5^\circ C \quad T_{14} = 120.2^\circ C \quad T_{16} = 50.9^\circ C$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{120.2^\circ C - 50.9^\circ C}{120.2^\circ C - 26.5^\circ C} \\ &= 0.7395 \\ &= 73.95\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 40.4^\circ\text{C} \quad T_{14} = 120.2^\circ\text{C} \quad T_{16} = 50.9^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{120.2^\circ\text{C} - 50.9^\circ\text{C}}{120.2^\circ\text{C} - 40.4^\circ\text{C}} \\ &= 0.8684 \\ &= 86.84\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 2 ถึง 5.00 น. วันที่ 3 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 27.2^\circ\text{C} \quad T_{14} = 120.2^\circ\text{C} \quad T_{16} = 50.9^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{120.2^\circ\text{C} - 50.9^\circ\text{C}}{120.2^\circ\text{C} - 27.2^\circ\text{C}} \\ &= 0.7451 \\ &= 74.51\% \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

คำนวณจากการทดลอง 34 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 34 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 46.9°C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2390.2 \text{ kJ/kg}$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ - มวลกล้วยหลังอบ

$$= 30.2 \text{ kg} - 10 \text{ kg} = 20.2 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 17522 kJ/m^2 พื้นที่รับแสง 4.55 m^2

ใช้ไม้ฟืนจำนวน 74.9 kg มีความชื้น $19.9 \% \text{ d.b.}$ ให้ค่าความร้อน 14858 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม $0.75 \text{ kw} \times (34 \times 60 \times 60) \text{ s} = 91800 \text{ kJ}$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 SEC_{continue} &= \frac{17522 \frac{kJ}{m^2} \times 4.55m^2 + 74.9kg \times 14858 \frac{kJ}{kg} + 91800kJ}{20.2kg} \\
 &= 63584 \frac{kJ}{kg} \\
 &= 63.6 \frac{MJ}{kg}
 \end{aligned}$$

ใช้ไม้พืนประมาณ 8 kg สำหรับป้อนความร้อนสะสมในพาราฟินก่อนอบกล้วยเล็บมือนาง

$$\begin{aligned}
 SEC_{total} &= \frac{17522 \frac{kJ}{m^2} \times 4.55m^2 + 82.9kg \times 14858 \frac{kJ}{kg} + 91800kJ}{20.2kg} \\
 &= 69468 \frac{kJ}{kg} \\
 &= 69.5 \frac{MJ}{kg}
 \end{aligned}$$

ง 3 การทดลองอบกล้วย 30 kg เฝ้ามัไฟนยาวยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 14-16 พฤศจิกายน 2555

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

คำนวณจากการทดลอง 34 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 34 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 48.3 °C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2386.8 \text{ kJ/kg}$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ - มวลกล้วยหลังอบ

$$= 30.1 \text{ kg} - 9.4 \text{ kg} = 20.7 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 15840 kJ/m^2 พื้นที่รับแสง 4.55 m^2

ใช้ไม้พินจำนวน 76.2 kg มีความชื้น 23.5 %d.b. ให้ค่าความร้อน 14322 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม $0.75 \text{ kw} \times (34 \times 60 \times 60) \text{ s} = 91800 \text{ kJ}$

$$\begin{aligned} \eta_{dryer} &= \frac{20.7 \text{ kg} \times 2386.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{15840 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{ m}^2 + 76.2 \text{ kg} \times 14322 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 91800 \text{ kJ}} \\ &= 0.0394 \\ &= 3.94\% \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

หาอัตราการไหลเชิงมวล โดยมีค่าต่างๆดังนี้

$$V = 0.71 \text{ m/s} \quad A = 1.75 \times 0.12 \text{ m}^2 \quad \rho = 1.171 \text{ kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= (1.171 \text{ kg/m}^3) \times (0.71 \text{ m/s}) \times (1.75 \times 0.12 \text{ m}^2) \\ &= 0.175 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_1 = 33.7 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_2 = 39.6 \text{ }^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 8 \text{ hr} \quad IA = 72076 \text{ kJ}$$

คำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}\eta_{solar} &= \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA} \\ &= \frac{0.175 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (8 \times 60 \times 60) \text{s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (39.6 - 33.7)^\circ\text{C}}{72076 \text{kJ}} \\ &= 0.415 \\ &= 41.5\%\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 26.1^\circ\text{C} \quad T_4 = 50.1^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 14 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 34.6 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 14322 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.175 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (14 \times 60 \times 60) \text{s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (50.1 - 26.1)^\circ\text{C}}{34.6 \text{ kg} \times 14322 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\ &= 0.430 \\ &= 43.0\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 39.6^\circ\text{C} \quad T_4 = 50.1^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 8 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 10.1 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 14322 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.175 \frac{kg}{s} \times (8 \times 60 \times 60) s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (50.1 - 39.6)^\circ C}{10.1 kg \times 14322 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.368 \\ &= 36.8\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 2 ถึง 5.00 น. วันที่ 3 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 26.4^\circ C \quad T_4 = 50.1^\circ C \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ C \quad t = 12 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 31.5 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 14322 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.175 \frac{kg}{s} \times (12 \times 60 \times 60) s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (50.1 - 26.4)^\circ C}{31.5 kg \times 14322 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.400 \\ &= 40.0\%\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลสามารถคำนวณได้ ดังนี้

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 26.1^\circ C \quad T_{14} = 149.9^\circ C \quad T_{16} = 52.4^\circ C$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{149.9^\circ C - 52.4^\circ C}{149.9^\circ C - 26.1^\circ C} \\ &= 0.7875 \\ &= 78.75\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 39.6^\circ\text{C} \quad T_{14} = 149.9^\circ\text{C} \quad T_{16} = 52.4^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{149.9^\circ\text{C} - 52.4^\circ\text{C}}{149.9^\circ\text{C} - 39.6^\circ\text{C}} \\ &= 0.8839 \\ &= 88.39\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 2 ถึง 5.00 น. วันที่ 3 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 26.4^\circ\text{C} \quad T_{14} = 149.9^\circ\text{C} \quad T_{16} = 52.4^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{149.9^\circ\text{C} - 52.4^\circ\text{C}}{149.9^\circ\text{C} - 26.4^\circ\text{C}} \\ &= 0.7894 \\ &= 78.94\% \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

คำนวณจากการทดลอง 34 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 34 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 48.3°C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2386.8 \text{ kJ/kg}$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ - มวลกล้วยหลังอบ

$$= 30.1 \text{ kg} - 9.4 \text{ kg} = 20.7 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 15840 kJ/m^2 พื้นที่รับแสง 4.55 m^2

ใช้ไม้ฟืนจำนวน 76.2 kg มีความชื้น $23.5 \% \text{ d.b.}$ ให้ค่าความร้อน 14322 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม $0.75 \text{ kw} \times (34 \times 60 \times 60) \text{ s} = 91800 \text{ kJ}$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 SEC_{continue} &= \frac{15840 \frac{kJ}{m^2} \times 4.55m^2 + 76.2kg \times 14322 \frac{kJ}{kg} + 91800kJ}{20.7kg} \\
 &= 60638 \frac{kJ}{kg} \\
 &= 60.6 \frac{MJ}{kg}
 \end{aligned}$$

ใช้ไม้พินประมาณ 8 kg สำหรับป้องกันความร้อนสะสมในพาราฟินก่อนอบกล้วยเล็บมือนาง

$$\begin{aligned}
 SEC_{total} &= \frac{15840 \frac{kJ}{m^2} \times 4.55m^2 + 84.2kg \times 14322 \frac{kJ}{kg} + 91800kJ}{20.7kg} \\
 &= 66173 \frac{kJ}{kg} \\
 &= 66.2 \frac{MJ}{kg}
 \end{aligned}$$

ง 4 การทดลองอบกล้วย 60 kg เฝ้ามัไฟนยาว 35 cm (สลับถาด) ในวันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2556

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

คำนวณจากการทดลอง 38 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 34 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 44.9 °C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2395 \text{ kJ/kg}$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ – มวลกล้วยหลังอบ

$$= 60.2 \text{ kg} - 21.1 \text{ kg} = 39.1 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 18365 kJ/m^2 พื้นที่รับแสง 4.55 m^2

ใช้ไม้ไฟนจำนวน 83.6 kg มีความชื้น 18.5 %d.b. ให้ค่าความร้อน 15066.2 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม $0.75 \text{ kw} \times (38 \times 60 \times 60) \text{ s} = 136800 \text{ kJ}$

$$\eta_{dryer} = \frac{39.1 \text{ kg} \times 2395 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{18365 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{ m}^2 + 83.6 \text{ kg} \times 15066.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 136800 \text{ kJ}}$$

$$= 0.0633$$

$$= 6.33\%$$

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

หาอัตราการไหลเชิงมวล โดยมีค่าต่างๆดังนี้

$$V = 0.71 \text{ m/s} \quad A = 1.75 \times 0.12 \text{ m}^2 \quad \rho = 1.173 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_a = (1.173 \text{ kg/m}^3) \times (0.7 \text{ m/s}) \times (1.75 \times 0.12 \text{ m}^2)$$

$$= 0.172 \text{ kg/s}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_1 = 33.9 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_2 = 40.4 \text{ }^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 8 \text{ hr} \quad IA = 83560 \text{ kJ}$$

คำนวณประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
 \eta_{solar} &= \frac{m_a c_p (T_2 - T_1)}{IA} \\
 &= \frac{0.172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (8 \times 60 \times 60) \text{s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (40.4 - 33.9)^\circ\text{C}}{83560 \text{kJ}} \\
 &= 0.388 \\
 &= 38.8\%
 \end{aligned}$$

ประสิทธิภาพระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลของเครื่องอบแห้งสามารถคำนวณได้ ดังนี้

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 25.4^\circ\text{C} \quad T_4 = 49.3^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 14 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 37.4 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 15066.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}
 \eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\
 &= \frac{0.172 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times (14 \times 60 \times 60) \text{s} \times 1.007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (49.3 - 25.4)^\circ\text{C}}{37.4 \text{kg} \times 15066.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\
 &= 0.37 \\
 &= 37\%
 \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 40.4^\circ\text{C} \quad T_4 = 49.3^\circ\text{C} \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad t = 8 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 6.9 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 15066.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.172 \frac{kg}{s} \times (8 \times 60 \times 60) s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (49.3 - 40.4)^\circ C}{6.9 kg \times 15066.2 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.427 \\ &= 42.7\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 2 ถึง 9.00 น. วันที่ 3 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 25.8^\circ C \quad T_4 = 49.3^\circ C \quad C_p = 1.007 \text{ kJ/kg}^\circ C \quad t = 16 \text{ hr}$$

$$m_{wood} = 39.3 \text{ kg} \quad (HV)_{wood} = 15066.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\eta_{biomass} &= \frac{m_a c_p (T_4 - T_2)}{m_{wood} (HV)_{wood}} \\ &= \frac{0.172 \frac{kg}{s} \times (16 \times 60 \times 60) s \times 1.007 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times (49.3 - 25.8)^\circ C}{39.3 kg \times 15066.2 \frac{kJ}{kg}} \\ &= 0.396 \\ &= 39.6\%\end{aligned}$$

ประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวล

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยชีวมวลสามารถคำนวณได้ ดังนี้

คิดจากการทดลองวันที่ 1 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 1 ถึง 9.00 น. วันที่ 2 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 25.4^\circ C \quad T_{14} = 162.2^\circ C \quad T_{16} = 51^\circ C$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{162.2^\circ C - 51^\circ C}{162.2^\circ C - 25.4^\circ C} \\ &= 0.8128 \\ &= 81.28\%\end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางวัน ช่วงเวลา 9.00-17.00 น. มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 40.4^\circ\text{C} \quad T_{14} = 162.2^\circ\text{C} \quad T_{16} = 51^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{162.2^\circ\text{C} - 51^\circ\text{C}}{162.2^\circ\text{C} - 40.4^\circ\text{C}} \\ &= 0.913 \\ &= 91.30\% \end{aligned}$$

คิดจากการทดลองวันที่ 2 กลางคืน ช่วงเวลา 19.00 น. วันที่ 2 ถึง 5.00 น. วันที่ 3 มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$T_2 = 25.8^\circ\text{C} \quad T_{14} = 162.2^\circ\text{C} \quad T_{16} = 51^\circ\text{C}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{T_{14} - T_{16}}{T_{14} - T_2} \\ &= \frac{162.2^\circ\text{C} - 51^\circ\text{C}}{162.2^\circ\text{C} - 25.8^\circ\text{C}} \\ &= 0.8152 \\ &= 81.52\% \end{aligned}$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ของเครื่องอบแห้ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

คำนวณจากการทดลอง 38 ชั่วโมง

ใช้เวลาอบแห้งผลิตภัณฑ์ 34 ชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอบตลอดการทดลอง 44.9°C

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ $L = 2395 \text{ kJ/kg}$

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย = มวลกล้วยก่อนอบ - มวลกล้วยหลังอบ

$$= 60.2 \text{ kg} - 21.1 \text{ kg} = 39.1 \text{ kg}$$

วัดปริมาณพลังงานสะสมของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการทดลองได้ 18365 kJ/m^2 พื้นที่รับแสง 4.55 m^2

ใช้ไม้พื้นจำนวน 83.6 kg มีความชื้น $18.5 \% \text{d.b.}$ ให้ค่าความร้อน 15066.2 kJ/kg

ใช้ไฟฟ้ากับพัดลม $0.75 \text{ kw} \times (38 \times 60 \times 60) \text{ s} = 136800 \text{ kJ}$

แทนค่า

$$\begin{aligned} SEC_{continue} &= \frac{18365 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{m}^2 + 83.6 \text{kg} \times 15066.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 136800 \text{kJ}}{39.1 \text{kg}} \\ &= 37849 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 37.8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

ใช้ไม้ฟืนประมาณ 8 kg สำหรับป้อนความร้อนสะสมในพาราฟินก่อนอบกล้วยเล็บมือนาง

$$\begin{aligned} SEC_{total} &= \frac{18365 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 4.55 \text{m}^2 + 91.6 \text{kg} \times 15066.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 136800 \text{kJ}}{39.1 \text{kg}} \\ &= 40931 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 40.9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

ภาคผนวก จ
มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกล้วยอบ
(มผช.1060/2546)

1. ขอบข่าย

1.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ครอบคลุมเฉพาะกล้วยอบที่ทำจากกล้วยที่สามารถนำมาอบได้ เช่น กล้วยน้ำว้า กล้วยเล็บมือนาง กล้วยไข่ กล้วยหักมุก กล้วยหอม ที่บรรจุในภาชนะบรรจุ

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1 กล้วยอบ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำกล้วยทั้งผลหรือกล้วยที่ตัดแต่งเป็นรูปทรงตามต้องการ มาทำให้แห้งโดยใช้พลังงานจากแสงแดดหรือแหล่งพลังงานอื่น อาจปรุงแต่งรสก่อนหรือหลังการทำให้แห้งด้วยส่วนประกอบอื่น เช่น น้ำผึ้ง หรือวัตถุปรุงแต่งกลิ่นรสอื่นก็ได้ อาจเป็นกล้วยทั้งผล เป็นชิ้น หรือเป็นแผ่น

3. คุณลักษณะที่ต้องการ

3.1 ในภาชนะทั่วไป

ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีรูปทรงและขนาดใกล้เคียงกัน

3.2 สี

ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้

3.3 กลิ่นรส

ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ ปราศจากกลิ่นอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน

3.4 ลักษณะเนื้อสัมผัส

ต้องนุ่ม มีความหยุ่นตัว ไม่แข็งกระด้าง

เมื่อตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนตามข้อ 8.1 แล้ว ต้องได้คะแนนเฉลี่ยของแต่ละลักษณะจากผู้ตรวจสอบทุกคนไม่น้อยกว่า 3 คะแนน และไม่มีลักษณะใดได้ 1 คะแนน จากผู้ตรวจสอบคนใดคนหนึ่ง

3.5 สิ่งแปลกปลอม

ต้องไม่พบสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่ส่วนประกอบที่ใช้ เช่น เส้นผม ขนสัตว์ ดิน ทราย กรวด สิ่งปฏิกูลจากสัตว์ เช่น แมลง หนู นก

3.6 วัตถุเจือปนอาหาร

3.6.1 ห้ามใช้วัตถุกันเสียทุกชนิด

3.6.2 หากมีการใช้วัตถุปรุงแต่งกลิ่นรส ให้ใช้ได้ตามชนิดและปริมาณที่กฎหมายกำหนด

3.7 วอเตอร์แอกทิวิตี

ต้องไม่เกิน 0.75

หมายเหตุ วอเตอร์แอกทิวิตี เป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเนอายุการเก็บอาหารและเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของอาหาร โดยทำหน้าที่ควบคุมการอยู่รอด การเจริญ และการสร้างพิษของจุลินทรีย์

3.8 จุลินทรีย์

3.8.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ต้องไม่เกิน 1×10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.8.2 เอสเชอริเชีย โคลิ โดยวิธีเอ็มพีเอ็น ต้องน้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม

3.8.3 สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ต้องไม่พบในตัวอย่าง 0.1 กรัม

3.8.4 ยีสต์และรา ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม

4. สุขลักษณะ

4.1 สุขลักษณะในการทำกล้วยอบให้เป็นไปตามคำแนะนำตามภาคผนวก ก.

5. การบรรจุ

5.1 ให้บรรจุกล้วยอบในภาชนะบรรจุที่สะอาด แห้ง ผนึกได้เรียบร้อย และสามารถป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งสกปรกภายนอกได้

5.2 น้ำหนักสุทธิของกล้วยอบในแต่ละภาชนะบรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก

6. เครื่องหมายและฉลาก

6.1 ที่ภาชนะบรรจุกล้วยอบทุกหน่วย อย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้อย่างชัดเจน

- (1) ชื่อเรียกผลิตภัณฑ์ เช่น กล้วยตาก กล้วยอบน้ำผึ้ง กล้วยอบแผ่น กล้วยอบม้วน
- (2) ชนิดและปริมาณวัตถุเจือปนอาหาร (ถ้ามี)
- (3) น้ำหนักสุทธิ

(4) ชื่อแนะนำในการเก็บรักษา

(5) วัน เดือน ปีที่ทำ และวัน เดือน ปีที่หมดอายุ หรือข้อความว่า “ควรบริโภคก่อน (วัน เดือน ปี)”

(6) ชื่อผู้ทำ หรือสถานที่ทำ พร้อมสถานที่ตั้ง หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

7 การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

7.1 รุ่น ในที่นี้ หมายถึง กล้วยอบที่มีส่วนประกอบเดียวกัน ที่ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน ในระยะเวลาเดียวกัน

7.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้

7.2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบสิ่งแปลกปลอม การบรรจุ และเครื่องหมายและฉลาก ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.5 ข้อ 5. และข้อ 6. จึงจะถือว่ากล้วยอบรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัส ให้ใช้ตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบตามข้อ 7.2.1 แล้ว จำนวน 3 หน่วยภาชนะบรรจุ เมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.1 ถึงข้อ 3.4 จึงจะถือว่ากล้วยอบรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.2.3 การชักตัวอย่างและการยอมรับ สำหรับการทดสอบวัตถุเจือปนอาหาร วอเตอร์แอกทิวิตี และจุลินทรีย์ ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกัน จำนวน 5 หน่วยภาชนะบรรจุ นำมาทำเป็นตัวอย่างรวมเมื่อตรวจสอบแล้วตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 3.6 ถึงข้อ 3.8 จึงจะถือว่ากล้วยอบรุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

7.3 เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างกล้วยอบต้องเป็นไปตามข้อ 7.2.1 ข้อ 7.2.2 และข้อ 7.2.3 ทุกข้อ จึงจะถือว่ากล้วยอบรุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนนี้

8. การทดสอบ

8.1 การทดสอบลักษณะทั่วไป สี กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัส

8.1.1 ให้แต่งตั้งคณะผู้ตรวจสอบ ประกอบด้วยผู้ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบกล้วยอบอย่างน้อย 5 คน แต่ละคนจะแยกกันตรวจและให้คะแนนโดยอิสระ

8.1.2 วางตัวอย่างกล้วยอบในงานกระเบื้องขาว ตรวจสอบโดยการตรวจพินิจและชิม

8.1.3 หลักเกณฑ์การให้คะแนน ให้เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การให้คะแนน

(ข้อ 8.1.3)

ลักษณะที่ตรวจสอบ	เกณฑ์ที่กำหนด	ระดับการตัดสิน (คะแนน)			
		ดีมาก	ดี	พอใช้	ต้องปรับปรุง
ลักษณะทั่วไป	ในภาชนะบรรจุเดียวกันต้องมีรูปทรงและขนาดใกล้เคียงกัน	4	3	2	1
สี	ต้องมีสีที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้	4	3	2	1
กลิ่นรส	ต้องมีกลิ่นรสที่ดีตามธรรมชาติของส่วนประกอบที่ใช้ ปราศจากกลิ่นอื่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นอับ กลิ่นหืน	4	3	2	1
ลักษณะเนื้อสัมผัส	ต้องนุ่ม มีความหยุ่นตัว ไม่แข็งกระด้าง	4	3	2	1

8.2 การทดสอบสิ่งแปลกปลอม ภาชนะบรรจุ และเครื่องหมายและฉลากให้ตรวจพินิจ

8.3 การทดสอบวัตถุเจือปนอาหาร

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.4 การทดสอบวอเตอร์แอคทีวิตี

ให้ใช้เครื่องวัดวอเตอร์แอคทีวิตี ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ (25 ± 2) องศาเซลเซียส

8.5 การทดสอบจุลินทรีย์

ให้ใช้วิธีทดสอบตาม AOAC หรือ BAM หรือวิธีทดสอบอื่นที่เป็นที่ยอมรับ

8.6 การทดสอบน้ำหนักสุทธิ

ให้ใช้เครื่องชั่งที่เหมาะสม

ภาคผนวก ก

สัญลักษณ์

(ข้อ 4.1)

ก.1 สถานที่ตั้งและอาคารที่ทำ

ก.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและที่ใกล้เคียง อยู่ในที่ที่จะไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนได้ง่าย โดย

ก.1.1.1 สถานที่ตั้งตัวอาคารและบริเวณโดยรอบ สะอาด ไม่มีน้ำขังและและสกปรก

ก.1.1.2 อยู่ห่างจากบริเวณหรือสถานที่ที่มีฝุ่น เขม่า ควัน มากผิดปกติ

ก.1.1.3 ไม่อยู่ใกล้เคียงกับสถานที่น่ารังเกียจ เช่น บริเวณเพาะเลี้ยงสัตว์ แหล่งเก็บหรือกำจัดขยะ

ก.1.2 อาคารที่ทำมีขนาดเหมาะสม มีการออกแบบและก่อสร้างในลักษณะที่ง่ายแก่การบำรุงรักษา การทำความสะอาด และสะดวกในการปฏิบัติงานโดย

ก.1.2.1 พื้น ฝาผนัง และเพดานของอาคารที่ทำ ก่อสร้างด้วยวัสดุที่คงทน เรียบ ทำความสะอาด และซ่อมแซมให้อยู่ในสภาพที่ดีตลอดเวลา

ก.1.2.2 แยกบริเวณที่ทำออกเป็นสัดส่วน ไม่อยู่ใกล้ห้องสุขา ไม่มีสิ่งของที่ไม่าใช้แล้วหรือไม่เกี่ยวข้องกับการทำอยู่ในบริเวณที่ทำ

ก.1.2.3 พื้นที่ปฏิบัติงาน ไม่แออัด มีแสงสว่างเพียงพอ และมีการระบายอากาศที่เหมาะสม

ก.2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ในการทำ

ก.2.1 ภาชนะหรืออุปกรณ์ในการทำที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ ทำจากวัสดุมีผิวเรียบ ไม่เป็นสนิม ล้างทำความสะอาดได้ง่าย

ก.2.2 เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่ใช้ สะอาด เหมาะสมกับการใช้งาน ไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อน ติดตั้งได้ง่าย มีปริมาณเพียงพอ รวมทั้งสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและทั่วถึง

ก.3 การควบคุมกระบวนการทำ

ก.3.1 วัตถุดิบและส่วนผสมในการทำ สะอาด มีคุณภาพดี มีการล้างหรือทำความสะอาดก่อนนำไปใช้

ก.3.2 การทำ การเก็บรักษา การขนย้าย และการขนส่ง ให้มีการป้องกันการปนเปื้อนและการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์

ก.4 การสุขาภิบาล การบำรุงรักษา และการทำความสะอาด

ก.4.1 น้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ และมือของผู้ทำ เป็นน้ำสะอาดและมีปริมาณเพียงพอ

ก.4.2 มีวิธีการป้องกันและกำจัดสัตว์นำเชื้อ แมลงและฝุ่นผง ไม่ให้เข้าไปในบริเวณที่ทำตามความเหมาะสม

ก.4.3 มีการกำจัดขยะ สิ่งสกปรก และน้ำทิ้ง อย่างเหมาะสม เพื่อไม่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนกลับลงสู่ผลิตภัณฑ์

ก.4.4 สารเคมีที่ใช้ล้างทำความสะอาด และใช้กำจัดสัตว์นำเชื้อและแมลง ใช้ในปริมาณที่เหมาะสม และเก็บแยกจากบริเวณที่ทำ เพื่อไม่ให้ปนเปื้อนลงสู่ผลิตภัณฑ์ได้

ก.5 บุคลากรและสุขลักษณะของผู้ทำ

ผู้ทำทุกคน ต้องรักษาความสะอาดส่วนบุคคลให้ดี เช่น สวมเสื้อผ้าที่สะอาด มีผ้าคลุมผมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นผมหล่นลงในผลิตภัณฑ์ ไม่ไว้เล็บยาว ล้างมือให้สะอาดทุกครั้งก่อนปฏิบัติงาน หลังการใช้ห้องสุขาและเมื่อมือสกปรก

ภาคผนวก ฉ**ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง**



AGRO-INDUSTRY DEVELOPMENT CENTER FOR EXPORT (ADCET)

FACULTY OF AGRO-INDUSTRY, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

HAT YAI, SONGKHLA 90112, THAILAND

Tel: 66-74-286391, 286310 Fax: 66-74-446730 , 213008

e-mail : adcet.psu@gmail.com website : adcet.psu.ac.th

รายงานผลทดสอบ

เลขที่ใบขอรับบริการ 0075/56

เลขที่ใบรายงานผลทดสอบ MICH0008/2013

วันที่รับตัวอย่าง 22 กุมภาพันธ์ 2556

ชื่อผู้ขอรับบริการ คุณอรุณ อาภาสุวรรณ

ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

ชื่อ / ชนิดของตัวอย่าง : ก๋วยเตี๋ยวมื้อนางสีเหลืองทอง ยบแห้ง

รายงานผลทดสอบ :

ชื่อ/รหัสตัวอย่าง	รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ (หน่วย)
ก๋วยเตี๋ยวมื้อนาง	a_w	เครื่องวัดค่า a_w ยี่ห้อ Aqualab	0.729
	Color	เครื่องวัดค่าสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex สภาวะการทดสอบ CIELab Scale D65/10° port size 0.50 นิ้ว	L^* = 47.58 a^* = 10.11 b^* = 36.46
	Total viable count	BAM 2001	< 250 CFU/g (70 estimated number)
	Yeast & Mold count	BAM 2001	< 150 CFU/g (35 estimated number)

- รายงานนี้รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์/ทดสอบเท่านั้น

- ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร


 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสวสมณี วัฒนจันทร์)
 ผู้บริหารวิชาการ
 ห้องปฏิบัติการทดสอบเคมี


 (ดร.นุณณาน สมภาวะผล)
 ผู้ช่วยผู้บริหารวิชาการ
 ห้องปฏิบัติการทดสอบทางจุลชีววิทยา

รายงานผลการทดสอบตามหนังสือเลขที่ ADCET/0130/2556 ลงวันที่ 4 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2556



AGRO-INDUSTRY DEVELOPMENT CENTER FOR EXPORT (ADCET)

FACULTY OF AGRO-INDUSTRY, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

HAT YAI, SONGKHLA 90112, THAILAND

Tel: 66-74-286391, 286310 Fax: 66-74-446730 , 213008

e-mail : adcet.psu@gmail.com website : adcet.psu.ac.th

รายงานผลทดสอบ

เลขที่ใบขอรับบริการ 0080/56

เลขที่ใบรายงานผลทดสอบ MI0034/2013

วันที่รับตัวอย่าง 26 กุมภาพันธ์ 2556

ชื่อผู้ขอรับบริการ คุณอรธร อากาศสุวรรณ

ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

ชื่อ / ชนิดของตัวอย่าง : ก๊วยเล็บบ่มือนางอบแห้งสีเหลืองทอง บรรจุถุงพลาสติกใส ปิดสนิท

รายงานผลทดสอบ :

ชื่อ/รหัสตัวอย่าง	รายการทดสอบ	วิธีทดสอบ	ผลทดสอบ (หน่วย)
ก๊วยเล็บบ่มือนาง	<i>Escherichia coli</i>	BAM 2002	< 3 MPN/g
	<i>Staphylococcus aureus</i>	BAM 2001	< 3 MPN/g

- รายงานนี้รับรองผลเฉพาะตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์/ทดสอบเท่านั้น
- ห้ามคัดถ่ายรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษร


 (ดร.ปิชนานันท์ สิตกานต์)
 ผู้อำนวยการฝ่ายวิชาการ
 ห้องปฏิบัติการทดสอบทางจุลชีววิทยา

รายงานผลการทดสอบตามหนังสือเลขที่ ADCET/0128/2556 ลงวันที่ 4 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2556

ศูนย์พัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรเพื่อการส่งออก

คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

การศึกษาสารกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง Study of Heat Storage Material

อรรถ อากาศสุวรรณ¹, พีระพงษ์ ทิมสกุล¹ และ ไพโรจน์ คีรีรัตน์¹

¹ สถาบันวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

* ติดต่อ: E-mail: somkit01@hotmail.com perapong.t@psu.ac.th และ kirirat.pairoj@gmail.com
โทรศัพท์: 0-7428-7036, โทรสาร: 0-7421-2893

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของสารกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง โดยเลือกใช้น้ำ และอิฐเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส และพาราฟินเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนแฝง โดยศึกษากรณีป้อนความร้อน และกรณีดึงความร้อนจากสารกักเก็บความร้อนแต่ละชนิด ซึ่งทดลองที่อัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 1.992 g/s กรณีน้ำและอิฐป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C สำหรับพาราฟินป้อนความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C อย่างเดียว กรณีดึงความร้อนออกจากสารกักเก็บความร้อนจะป้อนความร้อนให้สารกักเก็บความร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 70°C โดยให้อากาศที่ไหลเข้ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ ซึ่งพบว่าปริมาณความร้อนสามารถกักเก็บในพาราฟินมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำและอิฐตามลำดับ ในกรณีดึงความร้อน ปริมาณความร้อนที่ดึงจากพาราฟินมีค่ามากที่สุดและในเวลาที่ยาวนานที่สุดด้วย ดังนั้นพาราฟินจึงเป็นสารกักเก็บความร้อนที่ดีที่สุดที่จะนำไปออกแบบระบบการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ต่อไป

คำหลัก: กักเก็บความร้อน, พาราฟิน, ความร้อนสัมผัส, ความร้อนแฝง

Abstract

This research was to study the heat transfer characteristics of sensible-heat and latent-heat storage materials. Water and brick were used for study on sensible heat and paraffin for latent heat characteristics. The studies include charging and discharging of the heat. Mass flow rate of the air was 1.992 g/s. The charging process was conducted at inlet temperatures of 70, 80 and 90°C for water and brick, and 90°C for paraffin. Temperature of the discharging process for paraffin was 70°C and temperature of inlet air was ambient. Results show that the best thermal storage material is paraffin. The discharge rate of paraffin is maximum heat and the period is longest. It thus is considered the best thermal storage material to be used subsequently for banana drying of many agricultural products.

Keywords: Heat energy storage, Paraffin, Sensible heat, Latent heat

1. บทนำ

การสะสมพลังงานความร้อนเป็นวิธีการนำความร้อนมาเก็บไว้ในสารกักเก็บความร้อนแล้วค่อย ๆ ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา มซิเมนต์ซอร์ธ และคณะ [1] ศึกษาการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ร่วมกับการใช้เชื้อเพลิงจากไม้ฟืน โดยใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่มีระบบเก็บกักความร้อนพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืน 1.7% ซึ่งค่อนข้างต่ำเพราะพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งเหลือจากการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ได้กักเก็บไว้เพื่อใช้ประโยชน์ อนาคต และคณะ [2] ศึกษากระบวนการสะสมพลังงานความร้อนแบบไม่เปลี่ยนเฟสในช่วงอุณหภูมิ 50–150 °C โดยใช้ไขมันที่ผ่านการใช้งานแล้วร่วมกับก้อนหินเป็นตัวกลางสะสมความร้อนศึกษาการเปลี่ยนแปลงความร้อนเข้าและกรณีดึงความร้อนออก พบว่าระบบกักเก็บความร้อนด้วยสารตัวกลางชนิดไม่เปลี่ยนสถานะ ควรเลือกสารตัวกลางเก็บสะสมความร้อนที่มีค่าความจุความร้อน (C_p) หรือค่าความหนาแน่น (ρ) สูง เนื่องจากอัตราส่วนโดยปริมาตรก้อนหินกับน้ำมันส่งผลต่อการเก็บสะสมความร้อนโดยการเพิ่มปริมาณก้อนหินจะทำให้ความสามารถในการกักเก็บความร้อนสูงขึ้น ในปัจจุบันได้นำระบบเก็บกักความร้อนใช้สำหรับการอบผลิตภัณฑ์การเกษตรมากขึ้น

ณัฐพล [3] สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้รางพาราโบลคร่วมกับระบบกักเก็บความร้อนแบบเปลี่ยนเฟส ซึ่งใช้พาราฟินเป็นสารกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนแฝง ซึ่งช่วยยืดระยะเวลาอบแห้งได้ งานวิจัยด้านอบแห้งได้นำระบบกักเก็บความร้อนสัมผัสมาใช้เช่น El-Sebaei et al. [4] ศึกษาตู้อบแห้งแสงอาทิตย์แบบโดยอ้อมใช้แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ดินเหนียว หิน และทรายเป็นสารกักเก็บความร้อนพบว่าผลิตภัณฑ์แห้งเร็วกว่าตู้อบแห้งที่ไม่มีสารกักเก็บความร้อน Bena and Fuller [5] ศึกษาตู้อบแห้งแสงอาทิตย์แบบโดยตรงร่วมกับใช้ไม้ฟืนเสริมมีอัตราเป็นตัวกักเก็บความร้อนพบว่าสามารถกักเก็บความร้อนได้ 5 ชั่วโมงซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศเกิน 10°C Madhlopa and Ngwalo [6]

สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรับแสง โดยอ้อมร่วมกับการใช้ความร้อนจากชีวมวล ซึ่งกักเก็บความร้อนโดยใช้หิน กรวดและซีเมนต์เป็นตัวดูดซับด้วยความร้อนสัมผัสจากเตาเผาและแสงอาทิตย์ ไพโรจน์ และคณะ [7] พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ โดยสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไม้ฟืน 3 แบบ คือ แบบตู้ แบบอุโมงค์ และแบบชั้นบันได้มีชุดกักเก็บความร้อน โดยใช้ฉนวนวัสดุกักเก็บความร้อน ซึ่งประสิทธิภาพการกักเก็บความร้อนของเครื่องอบแห้งทั้ง 3 แบบ มีค่าประมาณ 13-58% ควรพัฒนาระบบเผาไหม้และเก็บกักความร้อนเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งให้สูงขึ้น

ปัจจุบันการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งนำระบบกักเก็บความร้อนมาใช้มากขึ้น เพื่อประหยัดพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง งานวิจัยนี้จึงศึกษาศาสตร์กักเก็บความร้อนซึ่งหาง่ายและราคาถูกสำหรับอบผลิตภัณฑ์เกษตร โดยเลือกใช้ไขมันสถานะของเหลวและอิฐในสถานะของแข็งเป็นสารสะสมความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส และพาราฟินซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 60°C เป็นสารสะสมความร้อนในรูปของความร้อนแฝง

2. ทฤษฎี

การกักเก็บความร้อนเป็นการสะสมพลังงานความร้อนในสารตัวกลาง รูปแบบการสะสมพลังงานได้แก่ การสะสมความร้อนด้วยความร้อนสัมผัส และการสะสมความร้อนด้วยความร้อนแฝง ซึ่งการกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนสัมผัสในงานวิจัยนี้ใช้สมการที่ 1 เพื่อหาปริมาณความร้อนสัมผัส

$$Q_s = mC_p\Delta T \quad (1)$$

เมื่อ Q_s คือ ปริมาณความร้อนสัมผัส (kJ), m คือ มวลของสารกักเก็บความร้อน (kg), C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารกักเก็บความร้อน (kJ/kg·K) โดยที่ค่า C_p ของอิฐมีค่าเท่ากับ 0.79 kJ/kg·K ส่วนค่า C_p ของน้ำมันมีค่าเท่ากับ 4.2 kJ/kg·K, ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิที่สารกักเก็บความร้อน (K)

สำหรับการกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนแฝง พลังงานจะถูกกักเก็บในรูปของความร้อนแฝงโดยปริมาณความร้อนจำนวนหนึ่งที่ทำให้วัสดุสะสมความร้อน แล้วทำให้วัสดุนั้นเปลี่ยนเฟส ซึ่งการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนชนิดเปลี่ยนเฟสซับซ้อนมากกว่าชนิดเฟสเดียว เนื่องจาก ปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลง ความต้านทานทางความร้อนที่ไม่แน่นอนระหว่างภาวะบรรจุกับของแข็งในช่วงเปลี่ยนเฟส และแรงลอยตัวของของเหลวที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็งก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ยากต่อการคำนวณ มีวิธีการที่สำคัญสำหรับตรวจสอบทฤษฎีและการทดลองหลายวิธี [8] วิธีเอนทัลปีเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด [9] ในการแก้ปัญหาในช่วงของอุณหภูมิจึงสะดวกในการแก้ปัญหารูปทรงที่ซับซ้อนโดยกำหนด ฟังก์ชันเอนทัลปีเป็นตัวแปรตามซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสามารถเขียน H-T curve สำหรับวัสดุเปลี่ยนเฟส เช่น พาราฟิน ด้วยช่วงอุณหภูมิที่เปลี่ยนดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแบ่งได้ 5 ช่วง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้ [9]

(i) ช่วงเฟสของแข็ง (solid phase)

$$H = C_{ps}T, \quad T \leq T_{(p-a1)} \quad (2)$$

(ii) ช่วงเปลี่ยนอุณหภูมิจากของแข็งแทรกของแข็ง (solid-solid phase)

$$H = C_{ps}T + \frac{L_p}{a1 - a2}(T - T_{(p-a1)}), \quad (3)$$

$$T_{(p-a1)} < T < T_{(p+a2)}$$

(iii) ช่วงของแข็งเปลี่ยนอุณหภูมิต่ออยู่ใต้อุณหภูมิหลอมเหลว

$$H = C_{ps}T + L_p, \quad T_{(p+a2)} \leq T \leq T_{(m-e1)} \quad (4)$$

(iv) ช่วงเปลี่ยนอุณหภูมิจากของแข็งเป็นของเหลว (solid-liquid phase)

$$H = C_{pl}T + L_p + \frac{L}{e1 + e2}(T - T_{(m-e1)}), \quad (5)$$

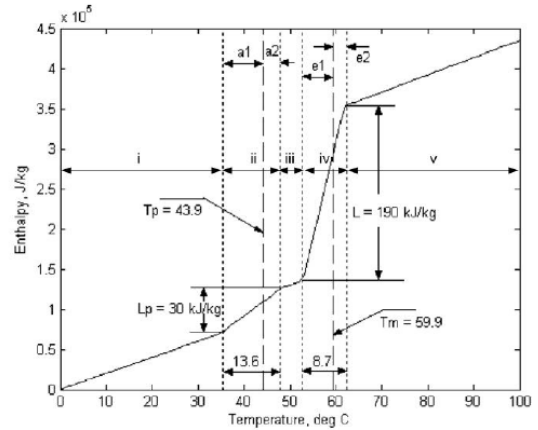
$$T_{(m-e1)} < T < T_{(m+e2)}$$

(v) ช่วงเฟสของเหลว (liquid phase)

$$H = C_{pl}T + L_p + L, \quad T \geq T_{(m+e2)} \quad (6)$$

เมื่อ H คือ เอนทัลปี (kJ/kg), โดยที่งานวิจัยนี้เลือกพาราฟินเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อน

แฝง ใช้ค่าเอนทัลปี จากสมการ 2-6 คำนวณหาความร้อนสะสมในพาราฟิน ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพเชิงความร้อนของพาราฟินแสดงดัง ตารางที่ 1



รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เอนทัลปีกับ อุณหภูมิ [9]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพเชิงความร้อนของพาราฟิน [9]

Property	Values
Melting point, T_m	$59.9^\circ C$
Melting range, $(dT)_m$	$8.7^\circ C$
Solid-solid phase change temperature, T_p	$43.9^\circ C$
Solid-solid phase change range, $(dT)_p$	$13.6^\circ C$
Specific heat of Solid, $C_{ps} (< 40^\circ C)$	$2.0 \frac{kJ}{Kg \cdot K}$
Specific heat of Liquid, $C_{pl} (> 60^\circ C)$	$2.15 \frac{kJ}{Kg \cdot K}$
Latent heat of melting, L	$190 \frac{kJ}{kg}$
Latent heat of solid-solid change, L_p	$30 \frac{kJ}{kg}$
Density of solid, $\rho_s (at 15^\circ C)$	$910 \frac{kg}{m^3}$
Density of liquid, $\rho_l (at 70^\circ C)$	$790 \frac{kg}{m^3}$

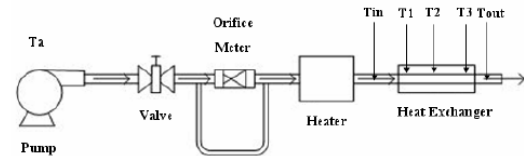
ดังนั้นพลังงานสะสมในพาราฟิน สามารถคำนวณจากสมการที่ 7 ดังนี้ [10]

$$\begin{aligned}
 q_{PCM} = & \int_{T_{initial}}^{T_{p-a1}} mC_{ps} dT + \int_{T_{p-a1}}^{T_{p+a2}} mC_{ps} dT \\
 & + mL_p + \int_{T_{m-e1}}^{T_{m+e2}} mC_{pl} dT + mL \\
 & + \int_{T_{m+e2}}^{T_{final}} mC_{pl} dT
 \end{aligned} \tag{7}$$

3. อุปกรณ์การทดลอง

การจำลองและทดสอบระบบกักเก็บความร้อนเพื่อศึกษาระบบกักเก็บความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat) โดยเลือกใช้น้ำและอิฐเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัส และพาราฟินเป็นวัสดุสะสมความร้อนในรูปของความร้อนแฝงด้วยชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย บั๊มทำหน้าที่จ่ายอากาศผ่าน วาล์วซึ่งทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลภายในท่อ โดยมีมาตรวัดการไหลแบบออริฟิซ (orifice meter) สำหรับอ่านค่าอัตราการไหลในการทดลองควบคุมอัตราการไหลที่ 1.992 g/s ให้ความร้อนอากาศด้วยฮีตเตอร์ในห้องอุ่นอากาศ อากาศร้อนไหลเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ กระจบกกักเก็บความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาว 0.5 เมตรหุ้มปิดด้วยฉนวนแอโรเฟล็กซ์ (Aeroflex) หนา 1 นิ้ว มีท่อผ่านกลางขนาด 1.5 นิ้ว ภายในระหว่างท่อ 3 นิ้ว กับ 1.5 นิ้ว ใช้บรรจุสารกักเก็บความร้อนชนิดต่างๆ วัดค่าอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลซึ่งวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ta) อุณหภูมิทางเข้า (Tin) อุณหภูมิทางออก (Tout) และอุณหภูมิในสารกักเก็บความร้อนวัด 3 ตำแหน่ง คือ T1, T2 และ T3 ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยบันทึกข้อมูลด้วย Data logger (Wisco, DL2200) ทดลองในกรณีเปื้อนความร้อนซึ่งใช้อากาศเป็นสื่อพาความร้อนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารกักเก็บความร้อน โดยทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 70, 80 และ 90°C สำหรับน้ำและอิฐ ส่วนพาราฟินทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 90°C ส่วนกรณีดึงความร้อน จะเปื้อนความร้อนให้สารกักเก็บความร้อนเมื่ออุณหภูมิ 70°C จากนั้นนำห้องอุ่นอากาศออกสำหรับดึงความร้อนสาร

กักเก็บความร้อนด้วยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ทั้งน้ำ อิฐ และพาราฟิน



รูปที่ 2 ชุดทดลองระบบเก็บกักความร้อน

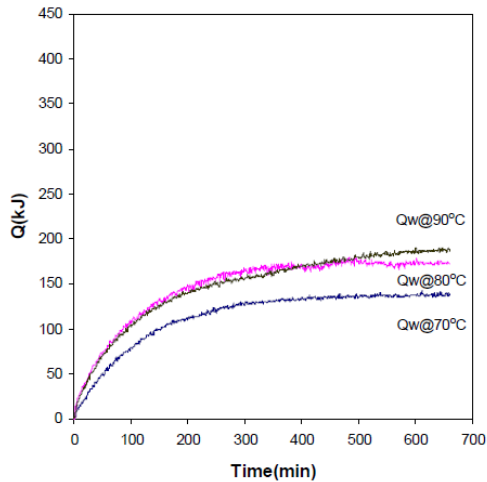
4. ผลและการวิจารณ์การทดลอง

การทดลองเปรียบเทียบสารกักเก็บความร้อน 3 ชนิด คือ น้ำ อิฐ และพาราฟิน ซึ่งทดลองในกรณีเปื้อนความร้อน และดึงความร้อน เมื่อ Qw, Qb, Qp คือปริมาณความร้อนสะสมของน้ำ อิฐ และพาราฟินตามลำดับ และ Qout,w, Qout,b, Qout,p คือปริมาณความร้อนดึงออกของน้ำ, อิฐ พาราฟินตามลำดับ

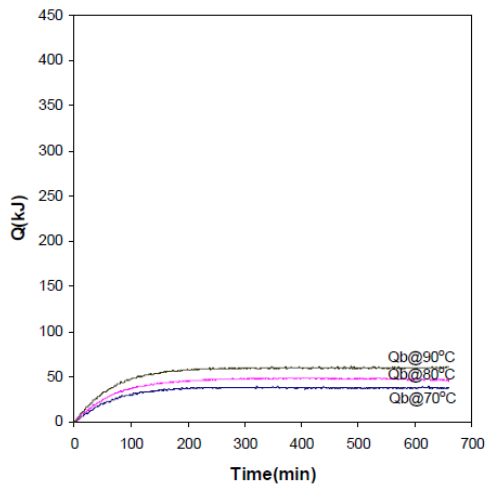
4.1 กรณีเปื้อนความร้อน

ทดลองเปื้อนความร้อน น้ำ และอิฐ ที่อุณหภูมิ 70, 80 และ 90°C เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3 ปริมาณความร้อนสะสมของน้ำที่อุณหภูมิ 70°C (Qw@70oc) 80°C (Qw@80oc) และ 90°C (Qw@90oc) และรูปที่ 4 ปริมาณความร้อนสะสมของอิฐที่อุณหภูมิ 70°C (Qb@70oc) 80°C (Qb@80oc) และ 90°C (Qb@90oc) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศเปื้อนเข้าน้ำและอิฐสามารถสะสมความร้อนได้มากขึ้น โดยเฉพาะอิฐจะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบสารกักเก็บความร้อนทั้ง 3 ชนิดที่อุณหภูมิ 90°C โดยพิจารณาปริมาณความร้อนสะสมของน้ำที่อุณหภูมิ 90 °C (Qw@90oc) ปริมาณความร้อนสะสมของอิฐที่อุณหภูมิ 90°C (Qb@90oc) และ ปริมาณความร้อนสะสมของพาราฟินที่อุณหภูมิ 90°C (Qp@90oc) ดังรูปที่ 5 พบว่าช่วงระยะเวลา 250 นาทีแรก สารกักเก็บความร้อนทั้ง 3 ชนิด คือ น้ำ อิฐ และพาราฟิน จะสะสมปริมาณความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส ปริมาณความร้อนสะสมของน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือพาราฟินและอิฐ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความจุความร้อนของน้ำมากที่สุด หลังจาก 250 นาทีแรกพาราฟินเริ่มดึงความร้อนมาช่วยสำหรับการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็น

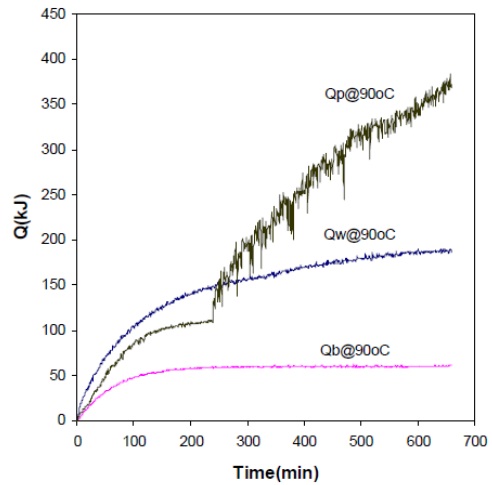
ของเหลว ทำให้ความร้อนสะสมของพาราฟินสูงกว่า ความร้อนสะสมของน้ำ จากการป้อนความร้อนเท่าๆกัน พาราฟินสามารถกักเก็บความร้อนได้มากที่สุดเหมาะ สำหรับใช้เป็นสารกักเก็บความร้อนเพื่อนำความร้อน ไปใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์กรณีป้อนความร้อน ระหว่างปริมาณความร้อนสะสมของน้ำกับเวลา



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์กรณีป้อนความร้อน ระหว่างปริมาณความร้อนสะสมของอิฐกับเวลา



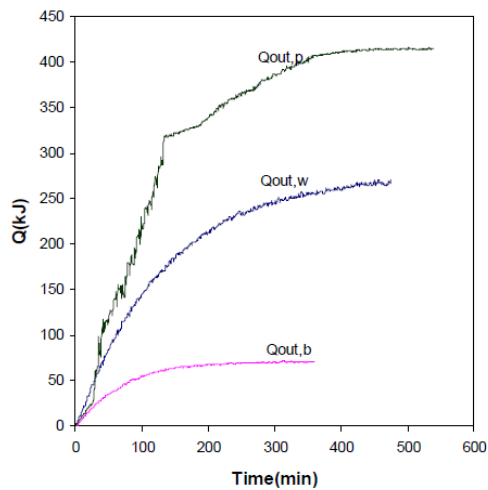
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์กรณีป้อนความร้อน ระหว่างปริมาณความร้อนสะสมของน้ำ, อิฐ และ พาราฟินกับเวลาที่อุณหภูมิ 90°C

4.2 กรณีดึงความร้อน

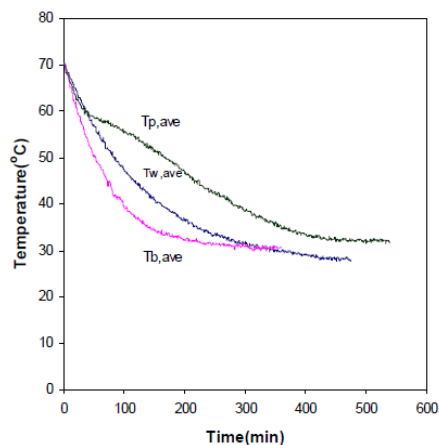
การทดลองดึงความร้อน จะป้อนความร้อนให้อุณหภูมิในสารเฉลี่ยประมาณ 70°C จากนั้นดึงความร้อนสะสมในสารกักเก็บความร้อนด้วยอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมประมาณ 30°C เมื่อพิจารณาความแตกต่างของน้ำ ($Q_{out,w}$) อิฐ ($Q_{out,b}$) และ พาราฟิน ($Q_{out,p}$) ในรูปที่ 6 และพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยกรณีดึงความร้อนออกของน้ำ ($T_{w,ave}$) อิฐ ($T_{b,ave}$) และ พาราฟิน ($T_{p,ave}$) ในรูปที่ 7 พบว่า ในช่วง 30 นาทีแรก อุณหภูมิของพาราฟิน ($T_{p,ave}$) จะลดลงเร็วใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำ ($T_{w,ave}$) แต่ปริมาณความร้อนที่ถูกดึงออกจากพาราฟิน ($Q_{out,p}$) น้อยกว่าปริมาณความร้อนที่ถูกดึงจากน้ำ ($Q_{out,w}$) เนื่องจากพาราฟินอยู่ในสถานะของเหลวมีค่าความจุความร้อนของพาราฟินมีค่าต่ำกว่าค่าความจุความร้อนของน้ำหลังจาก 30 นาทีแรก หลังจากเวลาที่ 30 อุณหภูมิของพาราฟินลดลงถึงอุณหภูมิ 60°C พาราฟินจะคายความร้อนออกเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งปริมาณความร้อนดึงออกของพาราฟิน ($Q_{out,p}$) จะมีค่ามากที่สุด และอุณหภูมิของพาราฟิน ($T_{p,ave}$) จะลดลงอย่างช้าๆ ใช้เวลานานที่สุด ส่วนปริมาณความร้อนดึงออกของอิฐ ($Q_{out,b}$) จะน้อยที่สุด อุณหภูมิของอิฐ ($T_{b,ave}$) ลดลงเร็ว

ที่สุด และใช้เวลาเร็วที่สุดสำหรับการคายความร้อนที่
สะสม

เนื่องจากช่วงเปลี่ยนสถานะจากของพาราฟิน
มีพลังงานสะสมมาก ส่งผลให้พาราฟินสามารถคาย
ความร้อนได้มาก ในระยะเวลานานเหมาะสำหรับช่วย
เพิ่มประสิทธิภาพเครื่องอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร
ซึ่งต้องการเผาไม้พินครั้งเดียวพลังงานส่วนหนึ่งกัก
เก็บในสารกักเก็บความร้อน และปล่อยความร้อนอย่าง
ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานช่วยลดภาระการเติม
เชื้อเพลิง



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์กรณีดึงความร้อน
ระหว่างปริมาณความร้อนดึงออกของน้ำ, อีจ และ
พาราฟินกับเวลา



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์กรณีดึงความร้อน
ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำ, อีจ และพาราฟิน กับ
เวลา

5. สรุป

พาราฟินสามารถกักเก็บความร้อนได้มาก
ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำและอีจ ซึ่งมีระยะเวลา
สำหรับการคายความร้อนนานที่สุด เหมาะสำหรับ
นำไปออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับ
อบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยผู้สนับสนุน
ทุนการวิจัย และ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ผู้
เอื้อเฟื้อ เครื่องมือและสถานที่ ขอขอบคุณนายอนุสรณ์
แอมไชสง ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] มชิมนต์ธรณ์ พรหมทอง, กานต์ บุญฤทธิ์,
ไพโรจน์ ศิริรัตน์, กำพล ประทีปชัยกุล และ พีระ
พงษ์ ทีฆสกุล (2546) การแห้งตัวของผลิตภัณฑ์
สมุนไพรโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
ผสมผสานกับพลังงานความร้อนจากไม้พิน การ
ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง
ประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546,
จังหวัดปราจีนบุรี
- [2] ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และ อติศักดิ์ ทองช่วย,
(2548) การศึกษาและจำลองระบบเก็บสะสม
พลังงานความร้อนแบบไม่เปลี่ยนเฟสในช่วง
อุณหภูมิ 50-150°C, วารสารวิชาการพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ ปีที่15 ฉบับที่ 2
- [3] ณัฐพล รุ่งประแสง, (2547) การอบกล้วยน้ำว้า
ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ราง
พาราโบลลิคร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบบ
เปลี่ยนเฟส, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะ
พลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรี

- [4] El-Sebaei, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., and El-Gohary, H. G. (2002) Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables, *Energy*, 27(9), 845-859.
- [5] Bena, B., and Fuller, R. J. (2002) Natural convection solar dryer with biomass back-up heater, *Solar Energy*, 72(1), 75-83.
- [6] Madhlopa, A., and Ngwalo, G. (2007) Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater, *Solar Energy*, 81, 449-462.
- [7] ไพโรจน์ คีรีรัตน์ พีระพงศ์ ทิมสกุล และกำพล ประทีปชัยกูร, (2549) รายงานฉบับสมบูรณ์การ พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ สำหรับกลุ่มเกษตรกร, ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [8] Felix Regin, A., Solanki, S. C., Saini J. S. (2008) Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2438-2458
- [9] Felix Regin, A., Solanki, S. C., Saini J. S. (2006) Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations, *Renewable Energy*, 31, 2025-2041
- [10] Felix Regin, A., Solanki, S. C., Saini J. S. (2009) An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation, *Renewable Energy*, 34, 1765-1773.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายอรรถ อากาศสุวรรณ		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210120047		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษย์ก้นกฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี 2552-2554

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อรรถ อากาศสุวรรณ, พีระพงษ์ ทิมสกุล และ ไพโรจน์ ศิริรัตน์, “การศึกษาสารกักเก็บความร้อนในรูปความร้อนสัมผัส และ ความร้อนแฝง”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่, 19-21 ตุลาคม 2554