



การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่ที่ปิดคลุมด้วยแผ่น
โพลีคาร์บอเนต

โดย

นายชนก ศรีทัศน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่ที่ปิดคลุมด้วยแผ่น
โพลีคาร์บอเนต

โดย

นายชนก ศรีทัศน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**An investigation of the performance of a large-scale greenhouse solar dryer using
polycarbonate cover**

**By
Chanoke Sritus**

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF SCIENCE

Department of Physics

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2008

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่ที่ปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ” เสนอโดย นายชนก ศรีทัศน์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
รองศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทน์ฉาย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จ้านงค์ ชำรงมาศ)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)
...../...../.....

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทน์ฉาย)
...../...../.....

49306202 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์/เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์/เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์

ชนัก ศรีทัศน์ : การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่ปิดคลุมด้วยแผ่น โพลีคาร์บอเนต. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร.เสริมจันทร์ฉาย. 98 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่ปิดคลุมด้วยแผ่น โพลีคาร์บอเนต โดยมีความกว้าง 7.5 เมตรและความยาว 20 เมตรสามารถอบแห้งผักและผลไม้ได้ครั้งละ 1 ตัน เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีโครงสร้างหลังคาเป็นรูปทรงพาราโบลาตั้งอยู่บนพื้นคอนกรีต และปิดคลุมด้วยแผ่น โพลีคาร์บอเนต โดยอากาศชั้นจากภายในเครื่องอบแห้งจะถูกดูดออกไปยังอากาศแวดล้อมภายนอกโดยใช้พัดลมขนาด 15 วัตต์ 9 ตัว โดยใช้กำลังไฟฟ้าจากแผง โซลาร์เซลล์ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าว โดยการอบแห้งกล้วย 1 ครั้ง และอบกาแฟ 5 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งแปรค่าระหว่าง 45 °C- 60 °C ระหว่างการอบแห้งกล้วย และ 45 °C- 55 °C ระหว่างการอบแห้งกาแฟ ในด้านของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพบว่า ต้องใช้เวลาในการอบแห้งกล้วย 5 วัน เมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติต้องใช้เวลา 7 วัน สำหรับกรณีกาแฟจะใช้เวลา 2 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การตากแดดตามธรรมชาติต้องใช้เวลา 4 วัน ผลลัพธ์ที่ได้อาจมีคุณภาพดี สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวลในเครื่องอบแห้งดังกล่าว และทำการแก้สมการสมดุลทางความร้อนและมวลด้วยวิธีเชิงตัวเลข เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองทั้งอุณหภูมิและความชื้นกับผลการทดลองพบว่ามีความสอดคล้องกัน แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์สำหรับใช้ในงานออกแบบเครื่องอบแห้งแบบดังกล่าวที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในสภาพภูมิอากาศต่างๆ

ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

49306202 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORD : SOLAR ENERGY/SOLAR DRYER/GREENHOUSE DRYER

CHANOKE SRITUS : AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF A LARGE-SCALE GREENHOUSE SOLAR DRYER USING POLYCARBONATE COVER. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SERM JANJAI,Ph.D. 98 pp.

In this work, the performance of a large-scale solar greenhouse dryer was investigated. The dryer consists of a parabolic roof structure covered with polycarbonate plates on a concrete floor. The dryer has the width of 7.5 m and the length of 20.0 m with the loading capacity for fruit and vegetable of 1 ton. Nine 15-watt dc fans power by three 50-w PV module were used to ventilate the dryer. To investigate the performance of this solar greenhouse dryer for drying banana and coffee, experimental runs were conducted. Of which one experimental run was conducted for drying banana and another five experimental run were conducted for drying coffee. The drying air temperature varied from 45 °C to 60 °C during drying banana while it varied from 45 °C to 55 °C during drying coffee. The drying time of banana in the solar greenhouse dryer was 5 days, whereas 7 days are required for natural sun drying under similar conditions. The drying time of coffee in the solar greenhouse dryer was 2 days, whereas 4 days are required for natural sun drying under similar conditions. Good quality dried products were obtained. A system of partial differential equations describing heat and moisture transfer during drying of banana and coffee in the solar greenhouse dryer was developed and this system of non-linear partial differential equations was solve numerically using the finite difference method. The simulated results agreed well with the experimental data for solar drying of banana and coffee. This model can used to provide the design data and is also essential for optimal design of the dryer for different climate conditions.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโทในหัวข้อเรื่อง การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ปิดคลุมด้วยแผ่น โพลีคาร์บอเนต โดยผู้วิจัย ได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ ช่วยให้คำแนะนำในด้านวิชาการ และจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณอาจารย์ จำนง ชำรงมาศ และอาจารย์ พุทธศักดิ์ อินทวิที่ช่วยในการอำนวยความสะดวกและให้การสนับสนุน งานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็น อย่างสูง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ๆ เพื่อนๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสมอมา

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยเหลือให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญรูป	ญ
สัญลักษณ์.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
2 หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีการอบแห้ง.....	3
2.1.1 สมบัติของวัตถุดิบ.....	3
2.1.1.1 ความชื้นของวัตถุดิบ.....	3
2.1.1.2 ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัตถุดิบ.....	4
2.1.1.3 ความชื้นสมดุล	4
2.1.1.4 ความร้อนแฝง.....	5
2.1.2 สมบัติของอากาศชื้น	6
2.1.3 การอบแห้ง.....	7
2.1.4 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง.....	10
2.1.5 ประเภทของการอบแห้ง.....	11
2.2 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	12
2.2.1 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ.....	12
2.2.2 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อน โดยบังคับอากาศ.....	13
2.3 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบเรือนกระจก	14
2.4 งานวิจัยและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านมา	16
3 การดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 ลักษณะและโครงสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์	23
3.1.1 โครงสร้างของเครื่องอบแห้ง.....	28

บทที่	หน้า
3.1.2 วัสดุปิดคลุม.....	28
3.1.3 ระบบระบายอากาศ.....	29
3.1.4 ชั้นวางผลิตภัณฑ์.....	30
3.2 การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้ง.....	31
3.2.1 อุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูล.....	31
3.3 การทดลอง.....	47
3.3.1 วิธีการทดลอง.....	47
3.3.2 ผลการทดลองอบกล้วย.....	39
3.3.2 ผลการทดลองอบกาแฟ.....	42
ก) การทดลองอบกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550)....	42
ข) การทดลองอบกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550)....	46
ค) การทดลองอบกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550)....	48
ง) การทดลองอบกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม พ.ศ. 2550).....	51
จ) การทดลองอบกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม พ.ศ. 2550).....	54
4 การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง.....	61
4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	61
1) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	62
2) สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง.....	63
3) สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์.....	64
4) สมการสมดุลพลังงานของพื้น.....	66
5) สมการสมดุลมวลของอากาศ.....	67
6) สมการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์.....	68
4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	70
4.2.1 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี.....	70
4.2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	70
4.2.3 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	71

บทที่	หน้า
4.3 การหา solution ของสมการแบบจำลอง.....	72
4.4 การทดสอบแบบจำลอง.....	75
5. สรุป.....	79
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก 1	84
ภาคผนวก 2	86
ภาคผนวก 3	92
ภาคผนวก 4	95
ประวัติผู้วิจัย	98

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภูมิน้ำประเภตต่างๆในวัตุขึ้น	4
2.2	sorption isotherm ของผลิตผลการเกษตรทั่วไป.....	5
2.3	การแปรค่าของความร้อนแฝงของผลิตผลการเกษตร.....	5
2.4	แผนภูมิอากาศขึ้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง.....	7
2.5	การถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้ง.....	8
2.6	การลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลิตผลการเกษตรทั่วไป.....	9
2.7	อัตราการแห้งของผลิตผลการเกษตรระหว่างการอบแห้ง.....	9
2.8	เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง	12
2.9	เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม.....	13
2.10	เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้พัดลม.....	13
2.11	เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมดูดอากาศ.....	14
2.12	หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์.....	15
2.13	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์สำหรับใช้อบแห้งสมุนไพร ที่พัฒนาโดย Muller และคณะ (1989)	16
2.14	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนา โดย Kamaruddin และคณะ (1996)	17
2.15	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ ที่พัฒนาโดย Aux และคณะ (1996)	18
2.16	รูปเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ แบบห้องเดี่ยว และห้องคู่ที่พัฒนาโดย Miguel และ Lui (1998).....	19
2.17	รูปภาพภายนอกและภายในของเครื่องอบแห้งอุโมงค์ลมแบบกรีนเฮาส์ ที่พัฒนาโดย Condori และคณะ (2000)	20
2.18	เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมกรีนเฮาส์ที่ใช้ rock Aed ดูดกลิ่นและ สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Kurlu และคณะ (2003).....	21
2.19	เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Koyuncu และ คณะ(2005).....	22
2.20	รูปเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย GAaha และคณะ(2006).....	22

รูปที่	หน้า
2.21 เครื่องอบแห้งแบบ indirect mode ที่ใช้ concrete, rock peAles ดูกกลิน และสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Madhlopa (2006).....	23
2.22 เครื่องอบแห้งดิน โคลนแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้ rock Aed ดูกกลินและ สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Salihoglu และคณะ (2006).....	24
2.23 เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2007).....	25
3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์.....	27
3.2 ลักษณะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	28
3.3 พัฒนาระบายอากาศ.....	29
3.4 แผงโซลาร์เซลล์.....	30
3.5 ชั้นตากผลิตภัณฑ์.....	30
3.6 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Elekthonik รุ่น EE23 B.....	32
3.7 เครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5.....	32
3.8 ไพรานอมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM3.....	33
3.9 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100	33
3.10 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP	34
3.11 เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์	34
3.12 เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์	35
3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42	35
3.14 ตำแหน่งของจุดวัดต่างๆ ในการทดลองอบแห้ง	36
3.15 กล้วยน้ำว่าสุกที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.16 กล้วยน้ำว่าที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง	38
3.17 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองอบแห้งกล้วย ระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2550.....	40
3.18 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างวันที่ 28-1 พฤศจิกายน 2007.....	40
3.19 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการอบแห้ง ระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2550.....	41
3.20 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2550.....	41

รูปที่	หน้า
3.21 การแปรค่าของความชื้นระหว่างการอบแห้ง	
ระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน 2550.....	41
3.22 เมล็ดกาแฟสดที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง.....	42
3.23 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550).....	43
3.24 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550).....	44
3.25 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550).....	44
3.26 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550).....	45
3.27 การแปรค่าของความชื้น	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (13-16 พฤศจิกายน 2550).....	45
3.28 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550).....	46
3.29 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550).....	47
3.30 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550).....	47
3.31 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550).....	48
3.32 การแปรค่าของความชื้น	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550).....	48
3.33 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550).....	49
3.34 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550).....	50
3.35 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง	
ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550).....	50

รูปที่	หน้า
3.36 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550).....	51
3.37 การแปรค่าของความชื้น ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550).....	51
3.38 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550).....	52
3.39 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550).....	53
3.40 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550).....	53
3.41 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550).....	54
3.42 การแปรค่าของความชื้น ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550).....	54
3.43 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550).....	55
3.44 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550).....	55
3.45 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550).....	56
3.46 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550).....	57
3.47 การแปรค่าของความชื้น ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550).....	58
4.1 การส่งผ่านความร้อนในปริมาตรควบคุมที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้ง.....	61
4.2 กราฟแสดงความชื้นสมดุลของกล้วยที่ได้จากการทดลอง.....	68
4.3 แผนภูมิสำหรับคำนวณอุณหภูมิ ความชื้น และตัวแปรในเครื่องอบแห้ง.....	74
4.4 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบกล้วยระหว่างวันที่ 28 ต.ค.- 1 พ.ย. พ.ศ. 2551.....	75

รูปที่	หน้า	
4.5	กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบกาแฟระหว่างวันที่ 13 - 14 พ.ย. พ.ศ. 2551.....	76
4.6	กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ในช่วงวันที่ 28 ต.ค.- 1 พ.ย. พ.ศ. 2551.....	76
4.7	กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ในช่วงวันที่ 13 - 14 พ.ย. พ.ศ. 2551.....	77
A1.1	การใช้งานเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์.....	84
B2.1	ส่วนโค้งของโครงเหล็กที่ใช้ประกอบเป็นโครงของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์	87
B2.2	ส่วนฐานของโครงเหล็กที่ใช้ประกอบเป็นโครงของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์	88
B2.3	แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้ง.....	88
B2.4	ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้ง.....	88-90
B2.5	การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์.....	91
B2.6	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่สร้างเสร็จแล้ว.....	91
C3.1	ผลกาแฟสดที่ใช้ในการทดลอง.....	94
D4.1	การกระจายตัวของการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง.....	95
D4.2	ภาพเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์.....	96
D4.3	การกระจายตัวของการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง.....	96

สัญลักษณ์

A_f	=	พื้นที่ของพื้น, [m ²]
A_c	=	พื้นที่ของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [m ²]
A_{in}	=	พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศเข้า, [m ²]
A_p	=	พื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [m ²]
A_{out}	=	พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศออก, [m ²]
A_T	=	พื้นที่ที่รับรังสีอาทิตย์, [m ²]
C_{pa}	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศในผลิตภัณฑ์, [J/kg-°C]
C_{pc}	=	ความร้อนจำเพาะของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [J/kg-°C]
C_{pg}	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศ ภายในเครื่องอบ, [J/kg-K]
C_{pl}	=	ความร้อนจำเพาะของของเหลวในผลิตภัณฑ์, [J/kg-K]
C_{pv}	=	ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในผลิตภัณฑ์, [J/kg-K]
C_{pw}	=	ความจุความร้อนจำเพาะของของเหลวในผลิตภัณฑ์, [J/kg-°C]
dM/dt	=	อัตราการแห้ง, [kg/s]
D	=	ระยะระหว่างพื้นกับแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [m]
D_p	=	ความหนาของผลิตภัณฑ์, [m]
F_p	=	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]
h_c	=	การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิวผลิต (thermal conductance of air film), [W/m ² -K]
$h_{c,c-a}$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
$h_{c,c-am}$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม, [W/m ² -K]
$h_{c,f-a}$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นกับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
$h_{c,f-\alpha}$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นกับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
$h_{c,p-a}$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
$h_{r,c-s}$	=	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากโพลีคาร์บอเนตไปยังท้องฟ้า, [W/m ² -K]
$h_{r,p-c}$	=	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังโพลีคาร์บอเนต, [W/m ² -K]
h_w	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม, [W/m ² -K]
H	=	อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศอบแห้ง, [kg/kg]

H_{in}	= อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศขาเข้า, [kg/kg]
H_{out}	= อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศขาออก, [kg/kg]
H_T	= ความเข้มรังสีอาทิตย์บนพื้นที่ราบ, [MJ / m ² -day]
I_t	= ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ, [W/m ²]
K	= ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant)
k	= ค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ, [W/m-K]
k_c	= ค่าสภาพการนำความร้อนของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [W/m-K]
K	= สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของพื้น, [W/m-K]
L	= ความร้อนที่ต้องใช้ระเหยน้ำ 1 kg, [MJ/kg]
L'	= ความร้อนแฝงของน้ำ, [J/kg]
L_c	= ความหนาของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [m]
L_p	= ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำในผลิตภัณฑ์, [J/kg]
m_a	= มวลของอากาศแห้ง, [kg]
m_c	= มวลของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [kg]
m_p	= มวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [kg]
$m_p(t)$	= มวลของกล้วยน้ำว้าที่เวลาใด, [kg]
m_s	= มวลแห้งของกล้วยน้ำว้า, [kg]
m_w	= มวลของน้ำที่ต้องการระเหย, [kg]
M_d	= ความชื้นมาตรฐานแห้ง, [kg/kg]
M_c	= ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของผลผลิต
M_f	= ความชื้นสุดท้ายของกล้วยที่ต้องการ, [% w.b.]
$M(t)$	= ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ, [% w.b.]
M_p	= ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [decimal d.b.]
M_w	= ความชื้นมาตรฐานเปียก, [kg/kg]
N_D	= จำนวนวันที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละครั้ง, [day]
Q_{dry}	= ปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องใช้, [MJ]
t	= เวลา, [s]
T_a	= อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง, [K]
T_{am}	= อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, [K]

T_c	= อุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [K]
T_{fl}	= อุณหภูมิของพื้นคอนกรีต, [K]
T_g	= อุณหภูมิของพื้นดิน, [K]
T_{in}	= อุณหภูมิของอากาศขาเข้า, [K]
T_p	= อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [K]
T_s	= อุณหภูมิท้องฟ้า, [K]
T_{sur}	= อุณหภูมิที่ผิวของผลผลิต, [$^{\circ}C$]
T_w	= อุณหภูมิของน้ำ, [K]
U_c	= สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [$W/m^2-^{\circ}C$]
U_{fl}	= สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของพื้นคอนกรีต, [$W/m^2-^{\circ}C$]
V	= ความเร็วลม, [m/s]
V_{in}	= ความเร็วลมขาเข้า, [m/s]
V_{out}	= ความเร็วลมขาออก, [m/s]
W	= ความกว้างของห้องอบ, [m]
x	= ระยะ, [m]
η	= ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งในฐานะที่เป็นแผงรับรังสี, [decimal]
α_c	= สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [decimal]
α_f	= สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้น, [decimal]
α_g	= สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของอากาศ, [decimal]
α_p	= สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]
ρ_a	= ความหนาแน่นของอากาศแห้ง, [kg/m^3]
ρ_p	= ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, [kg/m^3]
ρ_p	= ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของผลิตภัณฑ์, [kg/m^2]
σ	= ค่าคงที่สเตฟาน โบลต์ซมานน์ (Stefan-Boltzmann's constant)
ϵ_b	= สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแผ่นดูดกลืนรังสี, [decimal]
ν	= viscosity ของอากาศ, [m^2/s]
τ_c	= สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโพลีคาร์บอเนต, [decimal]

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

เอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นพื้นที่ที่สำคัญของโลกที่ผลิตผัก ผลไม้ เครื่องเทศ และสมุนไพร ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เหล่านี้ต้องทำการอบแห้งหรือตากแห้งก่อนการบริโภคหรือส่งไปจำหน่าย การอบแห้งจะช่วยลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในระดับที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ นอกจากนี้ยังเป็นการแปรรูปผลิตภัณฑ์ให้มีคุณสมบัติทางอาหารเหมาะสมกับการบริโภค การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง และต้องดำเนินการในระยะเวลาค่อนข้างสั้น วิธีการอบแห้งที่เกษตรกรนิยมใช้กันทั่วไปได้แก่ การตากแดดตามธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่ก็มักประสบปัญหาผลผลิตเสียหายระหว่างการตาก เช่นการถูกทำลายโดยสัตว์ นก หนู และแมลงต่างๆ รวมถึงการปนเปื้อนสิ่งสกปรกต่างๆ นอกจากนี้การตากแดดตามธรรมชาติจะขึ้นกับสภาพดินฟ้าอากาศซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ โดยความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงได้ช้าในช่วงที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก หรืออาจเสียหายจากการเปียกฝน การอบแห้งที่ความชื้นลดลงช้าเกินไปจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้โดยอาจเกิดราขึ้นระหว่างการอบแห้งซึ่งทำให้เกิดสารอัลฟาทอกซิลในผลิตภัณฑ์ ในการแก้ปัญหาดังกล่าว เกษตรกรจำเป็นต้องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่เหมาะสม ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งเชิงกลขึ้นมาหลายแบบ แต่เครื่องอบแห้งเหล่านี้มักมีราคาแพง ทำให้เกษตรกรรายย่อยไม่สามารถจัดหามาใช้ได้ จะมีเฉพาะผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดใหญ่เท่านั้นที่สามารถจัดหาเครื่องอบแห้งประเภทนี้มาใช้ได้ นอกจากนี้เครื่องอบแห้งเชิงกลต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งปัจจุบันมีราคาค่อนข้างสูง และการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การแก้ปัญหาการอบแห้งผลผลิตการเกษตรวิธีหนึ่งก็คือการใช้เทคโนโลยีการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

สืบเนื่องจากโครงการความร่วมมือระหว่างประเทศไทยและประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (สปป.ลาว) ด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้เชิญมหาวิทยาลัยศิลปากรให้ดำเนินการจัดสร้างเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่วิทยาลัยเกษตรและป่าไม้เมืองปากเซ แขวงจำปาสัก ประเทศ สปป.ลาว โดยผู้วิจัยได้ร่วมสร้างและได้ทำการทดลองศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าว ผู้วิจัยจึงขอเสนอผลการศึกษานี้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองการอบแห้งของเครื่องอบแห้งดังกล่าว

บทที่ 2

หลักทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทางวิชาการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรและผลงานวิจัยการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านมารายละเอียดดังนี้

2.1 หลักการทางวิชาการ

2.1.1 สมบัติของวัสดุชื้น (properties of moist materials)

2.1.1.1 ความชื้นของวัสดุชื้น

วัสดุชื้นประกอบด้วยของแข็ง (solid materials) และความชื้น โดยทั่วไปเป็นน้ำในสถานะของเหลว เราสามารถบอกปริมาณความชื้นของวัสดุชื้นในรูปของความชื้นมาตรฐานเปียกหรือมาตรฐานแห้ง ดังนี้

$$M_w = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (2.1)$$

$$M_d = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก, [kg/kg]

M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้ง, [kg/kg]

m_w = มวลของของเหลว ในปริมาตรที่พิจารณา, [kg]

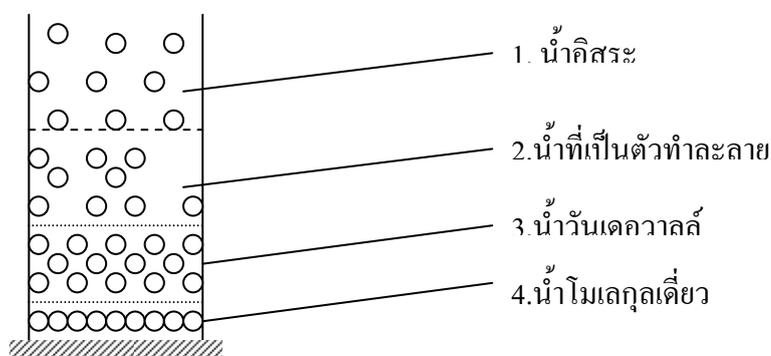
m_s = มวลของของแข็ง ในปริมาตรที่พิจารณา, [kg]

ความชื้นมาตรฐานเปียกมักนิยมใช้ในทางการค้า และสำหรับความชื้นมาตรฐานแห้งมักใช้ในการคำนวณ และการศึกษาในเชิงวิทยาศาสตร์

2.1.1.2 ลักษณะการเกาะตัวของน้ำบนวัตถุขึ้น

น้ำที่เกาะตัวกับของแข็งในวัตถุขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

- 1) น้ำอิสระ (free water)
- 2) น้ำสารละลาย (solvent water)
- 3) น้ำที่เกาะตัวโดยแรงแวนเดอวาลส์ (water attached with Van de Waal force)
- 4) น้ำโมเลกุลเดี่ยว (mono-molecule water)

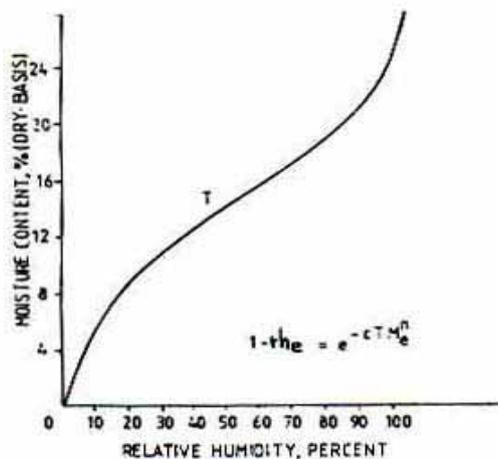


รูปที่ 2.1 แผนภูมิน้ำประเภทต่างๆในวัตถุขึ้น (Bakker Arkemar, 1974)

การเกาะของน้ำแบบน้ำอิสระจะอยู่ที่ชั้นนอกสุดของผิวของของแข็ง ส่วนการเกาะตัวของน้ำแบบอื่นจะอยู่ถัดลงมาจนถึงการเกาะตัวของน้ำแบบน้ำโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งอยู่ที่บริเวณผิวสัมผัสของของแข็ง และพบว่าในการแยกน้ำแบบอิสระจะใช้พลังงานน้อยที่สุด ส่วนน้ำแบบโมเลกุลเดี่ยวจะใช้พลังงานในการแยกน้ำออกจากวัตถุขึ้นมากที่สุด

2.1.1.3 ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

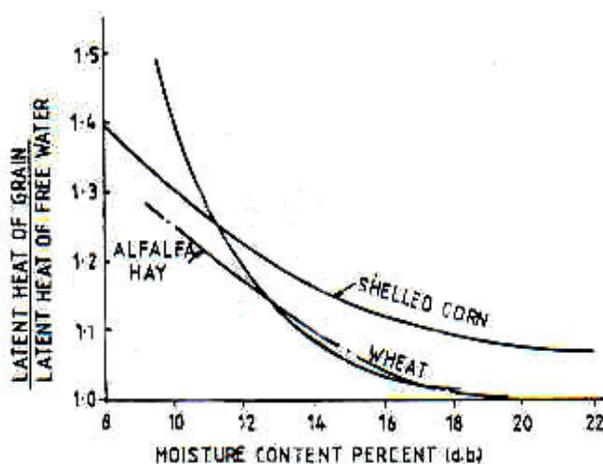
วัตถุขึ้นจะมีการรับและดูดความชื้นจากอากาศรอบๆ จนกระทั่งความชื้นมีค่าคงที่หรืออยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อม เรียกความชื้นนี้ว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ความชื้นสมดุลจะขึ้นกับธรรมชาติของวัตถุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งสามารถหาได้โดยการทดลอง โดยทั่วไปกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในสภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ จะเรียกว่า sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์เกษตรส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกราฟรูป sigmoid ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์การเกษตรทั่วไป (Sodha M.S., 1987)

2.1.1.4 ความร้อนแฝง (latent heat)

ความร้อนแฝง คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบซึ่งมีค่าขึ้นกับชนิดและความชื้นของวัตถุดิบ ตัวอย่างความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตร แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การแปรค่าของความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตร (Sodha M.S., 1987)

ความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตรสามารถเขียนในรูปของสูตรเอมไพริคัลได้ ดังนี้

$$\frac{L}{L'} = 1 + a \exp(-bM_d) \quad (2.3)$$

เมื่อ L = ความร้อนแฝงของวัตถุดิบ, [J/kg]

L' = ความร้อนแฝงของน้ำ, [J/kg]

M_d = ความชื้นของวัตถุดิบแห้ง [%]

a, b = ค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัตถุ

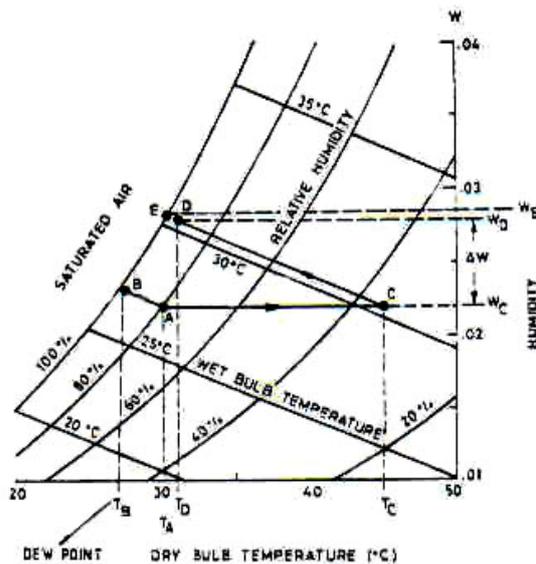
นอกจากนี้ยังมีสมบัติความร้อนอื่นๆ ของวัตถุดิบที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น ความร้อนจำเพาะ (specific heat) สภาพนำความร้อน (heat conductivity) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) และพื้นที่ผิวต่อปริมาตรวัตถุ เป็นต้น สมบัติเหล่านี้มักจะขึ้นกับความชื้นของวัตถุ และหาได้โดยการทดลอง

2.1.2 สมบัติของอากาศชื้น (properties of moist air)

อากาศซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปสู่วัตถุดิบ และพาความชื้นจากวัตถุดิบออกมาภายนอก จะประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำ ซึ่งมีสมบัติแสดงได้ด้วยตัวแปร 7 ตัว ดังนี้

- 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{ab})
- 2) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb})
- 3) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew-point temperature)
- 4) ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity, rh)
- 5) ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) หรืออัตราส่วนความชื้น (humidity ratio)
- 6) เอนทาลปี (enthalpy) เป็นพลังงานที่สะสมอยู่ในอากาศชื้น
- 7) ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) เป็นปริมาตรอากาศชื้นต่อน้ำหนักอากาศแห้ง

ตัวแปรทั้ง 7 มีความสัมพันธ์กันและสามารถแสดงเป็นแผนภูมิอากาศชื้น (psychometric chart) ดังรูปที่ 2.4 ในกระบวนการอบแห้ง สมบัติของอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงดังที่แสดงไว้ในแผนภูมิดังกล่าว



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภูมิอากาศชื้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

(Sodha M.S., 1987)

ในกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศจะลดลงเข้าหาอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีค่าคงที่ดังเส้น AB ในแผนภูมิอากาศชื้นของรูปที่ 2.4 เมื่ออากาศชื้นถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยไม่มีการเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำ อัตราส่วนความชื้นจะมีค่าคงที่แสดงได้ด้วยเส้นตรง AC ในรูปที่ 2.4 ถ้านำอากาศร้อนนี้ไปใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลง และความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอากาศถ่ายเทความร้อนให้กับวัตถุดิบและรับความชื้นจากวัตถุดิบ การเปลี่ยนแปลงของอากาศนี้แทนได้ด้วยเส้นตรง CD ในแผนภูมิอากาศชื้นรูปที่ 2.4

2.1.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

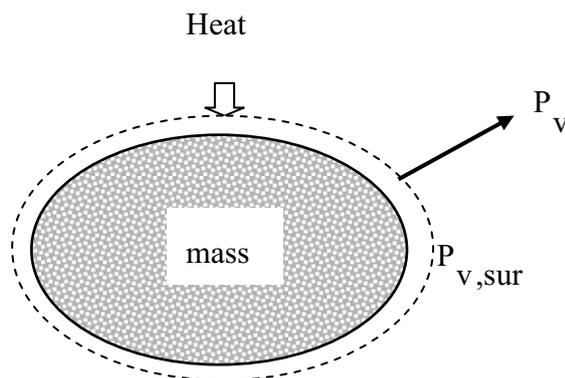
การอบแห้ง เป็นการแยกน้ำออกจากวัตถุดิบ (moist material) โดยการทำให้ น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอโดยอาศัยความร้อน สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมักเป็นการอบแห้งแบบการพาความร้อน (convective drying) โดยจะเป่าอากาศร้อนผ่านผลิตภัณฑ์ที่เป็นวัตถุดิบ ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัตถุ ทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำในวัตถุจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยออกมา การถ่ายเทมวลของน้ำจากวัตถุดิบไปยังอากาศจะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัตถุเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศ

$$P_{v,sur} = P_v \quad (2.4)$$

โดยที่

$$P_{v,sur} = \text{ความดันของไอน้ำที่ผิววัตถุ, [bar]}$$

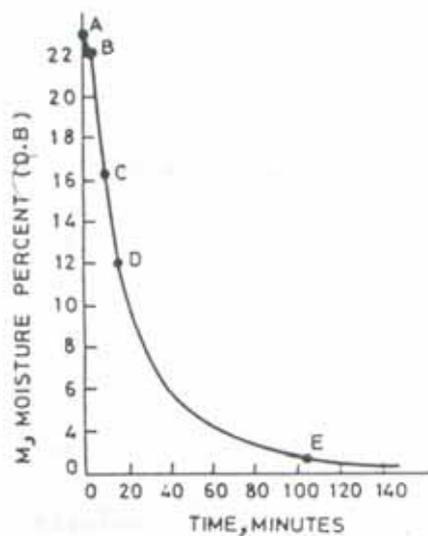
$$P_v = \text{ความดันไอน้ำในอากาศ, [bar]}$$



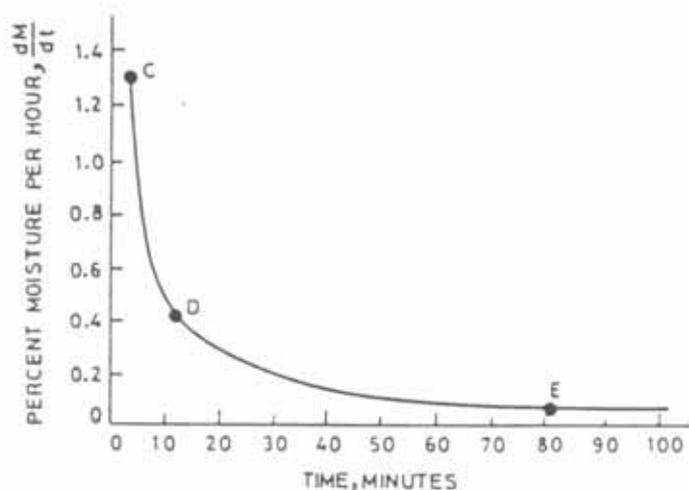
รูปที่ 2.5 การถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้ง (Sodha M.S., 1987)

การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัตถุขึ้นออกมาที่ผิว เป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและขึ้นกับโครงสร้างของวัตถุนั้น ตัวอย่างกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ การแพร่ (diffusion) การไหลภายในท่อเล็กในโครงสร้างของวัตถุ (capillary flow) การไหลจากความดันออสโมติก (osmotic pressure) และการไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เป็นต้น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายกระบวนการเหล่านี้มีความซับซ้อนมาก

ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การลดลงของความชื้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 หรือแสดงในรูปของอัตราการแห้ง (drying rate) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 การลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์การเกษตรทั่วไป (Sodha M.S., 1987)



รูปที่ 2.7 อัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์การเกษตรระหว่างการอบแห้ง (Sodha M.S., 1987)

โดยทั่วไปอัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์การเกษตรจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant-rate regime) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้ง และช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) ซึ่งต่อจากช่วงแรก

ในช่วงอัตราการแห้งคงที่การระเหยของน้ำจะเกิดที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ลักษณะการระเหยจะคล้ายกับการระเหยน้ำจากภาชนะ เราสามารถเขียนอัตราการแห้งในช่วงเวลานี้เป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_a - T_{sur}) \quad (2.5)$$

- เมื่อ dM/dt = อัตราการแห้ง, [kg/s]
- h_c = การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิวผลิตภัณฑ์
(thermal conductance of air film), [W/m²-K]
- A = พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์, [m²]
- L = ความร้อนแฝงของน้ำในผลิตภัณฑ์, [J/kg]
- T_a = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง, [°K]
- T_{sur} = อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์, [°K]

สำหรับช่วงที่อัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) โดยทั่วไปเราสามารถเขียนอัตราการแห้งในรูปสมการได้ดังนี้

$$dM/dt = -k(M-M_c) \quad (2.6)$$

- เมื่อ M_c = ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของผลิตภัณฑ์
- M = ความชื้นของผลิตภัณฑ์
- k = ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant)

2.1.4 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการอบแห้ง

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลดลงของความชื้นของวัตถุได้แก่

- 1) อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูง อัตราการแห้ง (drying rate) จะมีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ
- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถรับความชื้นที่ถ่ายเทจากวัตถุชิ้นได้มากกว่ากรณีที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง

3) ความเร็วอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขึ้น ถ้าความเร็วอากาศมีค่าสูงความชื้นจากวัตถุจะถ่ายเทออกมาสู่อากาศได้ดีกว่ากรณีอากาศที่อยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ แต่ผลดังกล่าวจะมีค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับผลจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.1.5 ประเภทของการอบแห้ง

การอบแห้งแบบพาความร้อน โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) การอบแห้งชั้นบาง (thin layer drying)

การอบแห้งแบบนี้ วัตถุขึ้นจะเรียงเป็นชั้นบางๆ หรือเพียงหนึ่งชั้นของเมล็ดพืชกรณีที่มีการอบเมล็ดพืชแบบชั้นบาง การลดลงของความชื้น สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (2.7)$$

เมื่อ $M(t)$ = ความชื้นขณะเวลา t

M_e = ความชื้นสมดุล

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น

k = ค่าคงที่การอบแห้ง

2) การอบแห้งชั้นหนา (deep bed drying)

เป็นการอบแห้งที่วัตถุวางซ้อนกันหลายชั้น ตัวอย่างเช่น การอบแห้งข้าวในเครื่องอบแห้งแบบใช้อากาศแวดล้อม (in-bin drying) ในการคำนวณการลดลงของความชื้นในเครื่องอบแห้ง โดยทั่วไปจะพิจารณาว่า การอบแห้งชั้นหนาประกอบด้วยการอบแห้งชั้นบางหลายๆ ชั้น เรียงซ้อนกัน และทำการหาสมการสมดุลของมวลและพลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้น (Bakker Arkema, 1974)

2.2 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying)

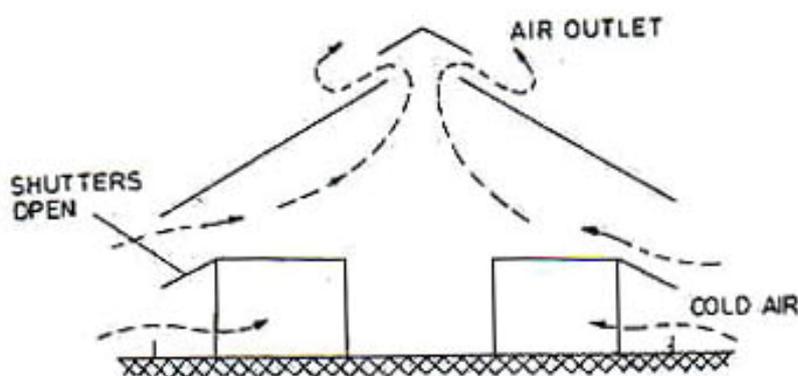
การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งผลผลิตโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะอาศัยการพาความร้อน (convective heat transfer) โดยทั่วไปสามารถแบ่งการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนได้เป็น 2 แบบ คือ แบบการไหลตามธรรมชาติ (natural convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงลอยตัวเนื่องจากการพาความร้อน และแบบการไหลเป็นแบบบังคับอากาศ (forced-convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงดันจากพัดลมในการพาความร้อน ไปยังผลผลิต นอกจากนี้ยังอาจแบ่งชนิดของการอบแห้งตามวิธีการรับรังสี โดยสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ แบบรับรังสีโดยตรง (direct) แบบรับรังสีโดยอ้อม (indirect) และแบบผสม (direct-indirect) สำหรับรายละเอียดของเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆจะกล่าวในรายละเอียดตามหัวข้อต่างๆดังนี้

2.2.1 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural-convection solar dryer)

เครื่องอบแห้งแบบนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

ก. แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct mode)

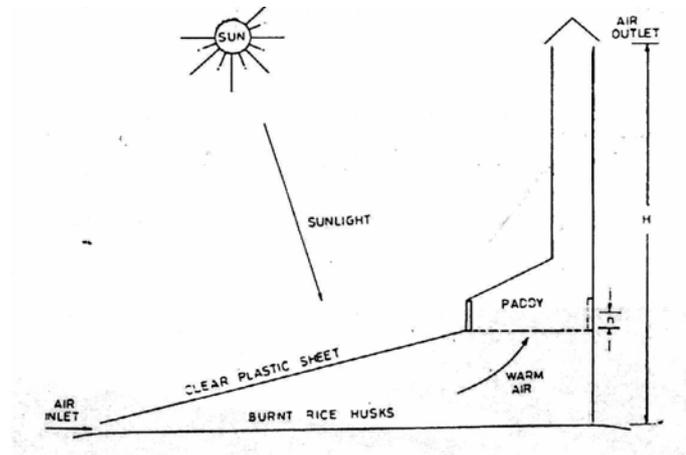
เครื่องอบแห้งแบบนี้ รังสีอาทิตย์จะตกลงบนผลผลิตที่ต้องการอบแห้งโดยตรง ความชื้นจากผลผลิตจะถูกพาขึ้นไปด้านบน โดยการไหลของอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ รังสีอาทิตย์จะส่งผ่านวัสดุโปร่งแสง ซึ่งอาจเป็นพลาสติกหรือกระจกก็ได้ แผ่นโปร่งแสงดังกล่าว ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ทั้งยังป้องกันฝุ่นละออง ฝน และแมลงรบกวนต่างๆด้วย



รูปที่ 2.8 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรง (Sodha M.S., 1987)

ข. เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode)

เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีแผงรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งทำงานโดยอาศัย การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) อากาศร้อนที่ได้จะลอยตัวและไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง

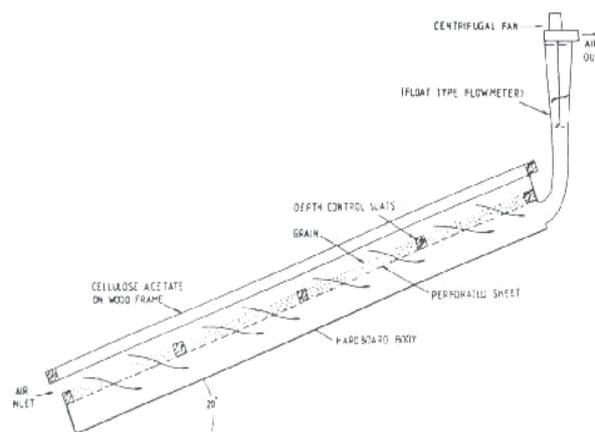


รูปที่ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Sodha M.S., 1987)

2.2.2 เครื่องอบแห้งแบบพาความร้อนโดยบังคับอากาศ (forced-convection solar dryer)

ก. แบบรับพลังงานแสงดวงอาทิตย์โดยตรง

เครื่องอบแห้งแบบนี้ ผลผลิตที่ต้องการอบแห้งจะรับรังสีอาทิตย์โดยตรง อากาศร้อนจะถูกดูดผ่านผลิตภัณฑ์โดยอาศัยพัดลมดังตัวอย่างในรูป 2.10

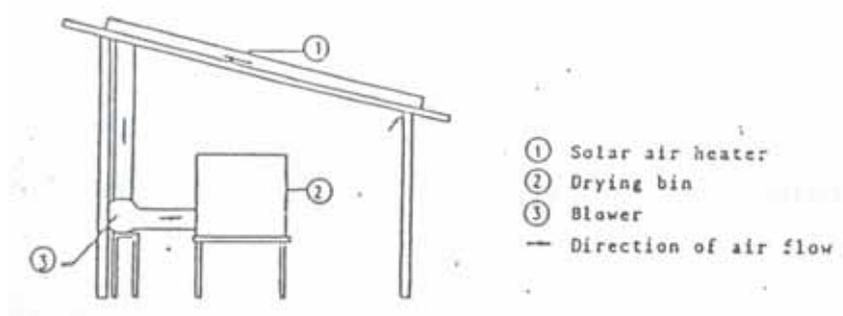


รูปที่ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้พัดลม

(Sodha M.S., 1987)

ข.แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode)

เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบซึ่งทำหน้าที่ผลิตอากาศร้อน แล้วเป่าหรือดูดผ่านส่วนที่บรรจุผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ต่างหากจากแผงรับรังสีอาทิตย์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11

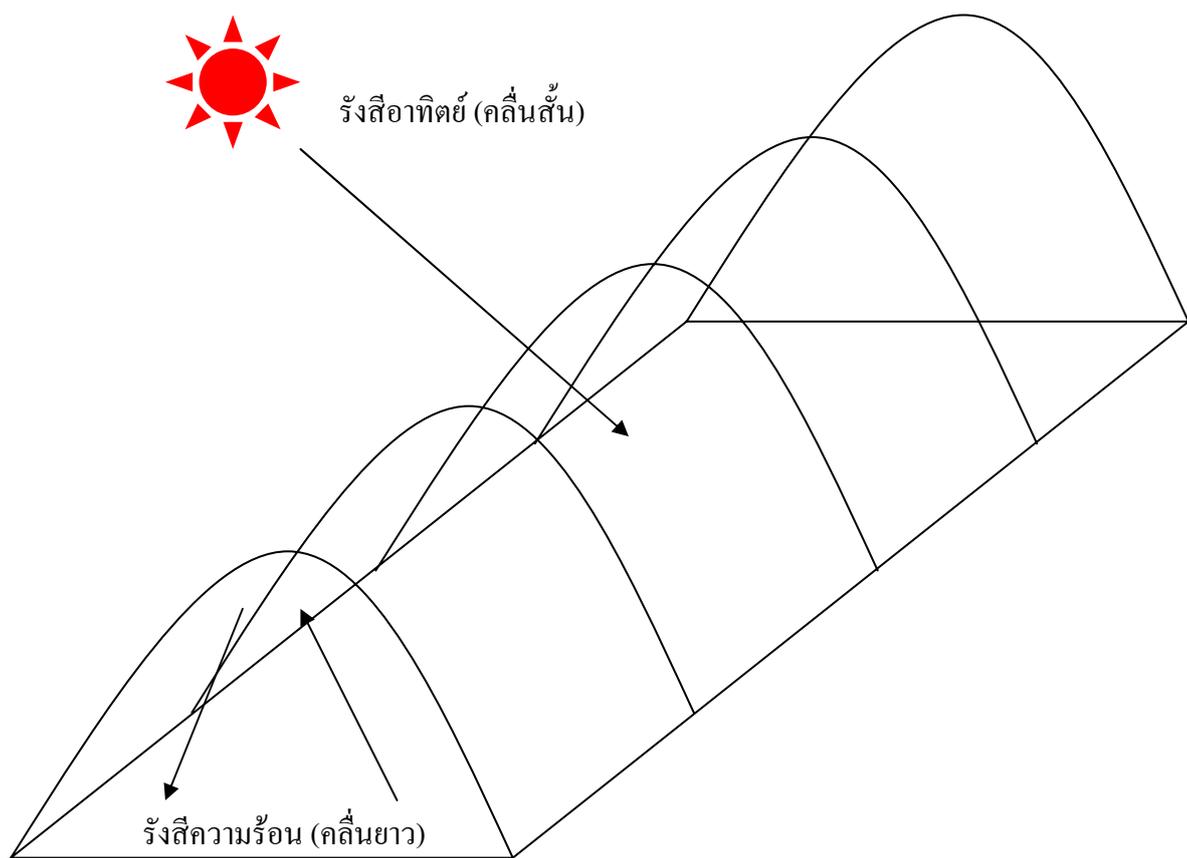


รูปที่ 2.11 แสดงเครื่องอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมดูดอากาศ

(Thongprasert et al., 1985)

2.3 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนระบบอบแห้งจะส่งผ่านแผ่น โพลีคาร์บอเนตไปยังผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในชั้นวาง บางส่วนจะตกกระทบบนพื้นของระบบอบแห้ง ทำให้ภายในระบบอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น และแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีคลื่นยาว ซึ่งส่วนมากไม่สามารถผ่านแผ่น โพลีคาร์บอเนตออกไปภายนอกได้จึงเก็บกักอยู่ภายในระบบอบแห้ง อุณหภูมิภายในส่วนอบแห้งจึงสูงขึ้น ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมา และถูกพัดลมดูดอากาศด้านหลังของระบบอบแห้งดูดออกไปภายนอก อากาศแวดล้อมจะไหลผ่านช่องระบายอากาศด้านหน้าเข้ามาแทนที่ (รูปที่ 2.12) ความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงค่อยๆลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานทั้งจากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโดยตรง และจากอากาศร้อนภายในส่วนอบแห้ง ดังนั้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วกว่าการตากแดดโดยวิธีธรรมชาติ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ภายในระบบอบแห้งยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งสกปรกและการเปียกฝนด้วย

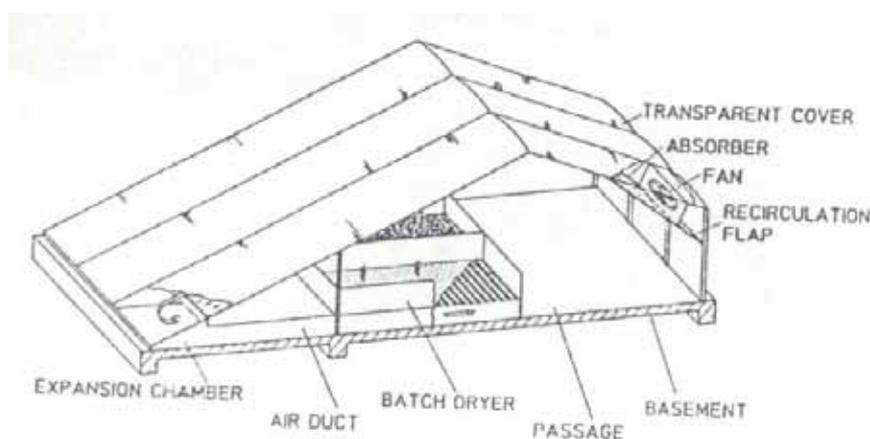


รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์

2.4 งานวิจัยและการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านมา

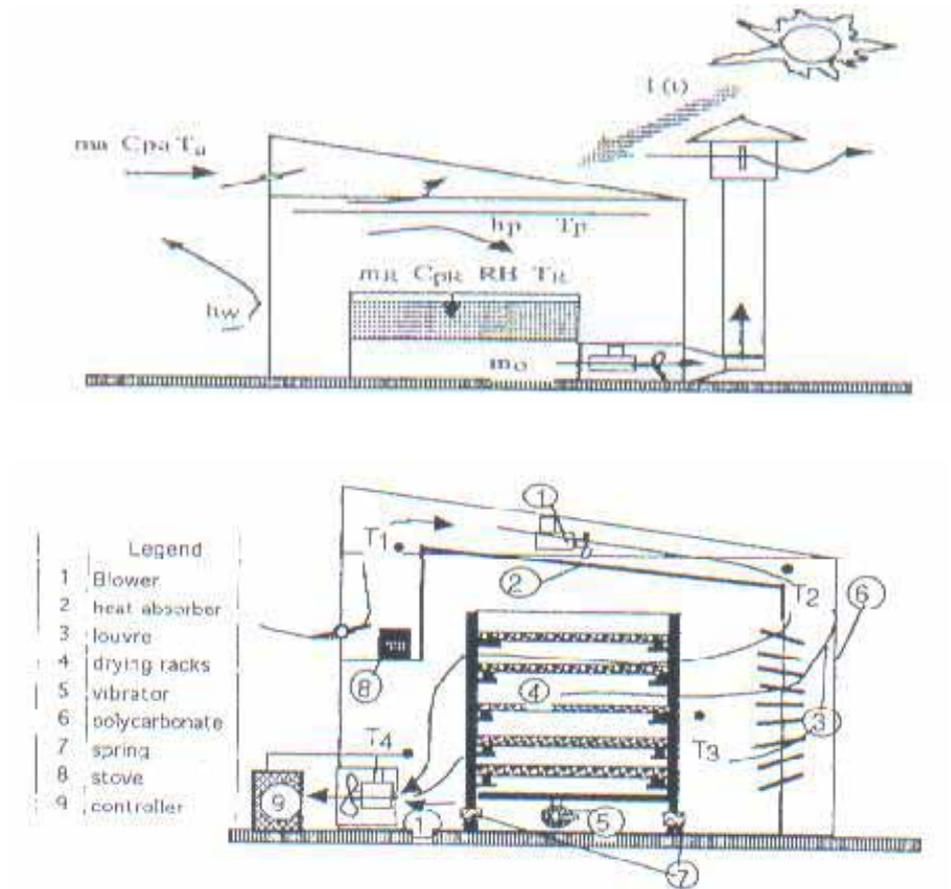
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยในเรื่องเกี่ยวกับเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

Muller และคณะ (1989) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขึ้นเพื่อใช้ในการอบแห้งสมุนไพร เครื่องอบแห้งดังกล่าวคลุมด้วยแผ่นพลาสติก และสามารถใช้งานได้ถึง 5 ปี โดยโครงสร้างจะแบ่งเป็นส่วนๆ แต่ละส่วนได้ติดตั้งพัดลมเพื่อทำให้อากาศภายในเกิดการไหลเวียน เครื่องอบนี้มีขนาด 4 x 15 ตารางเมตร และมีความยาวตามความเหมาะสมในการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



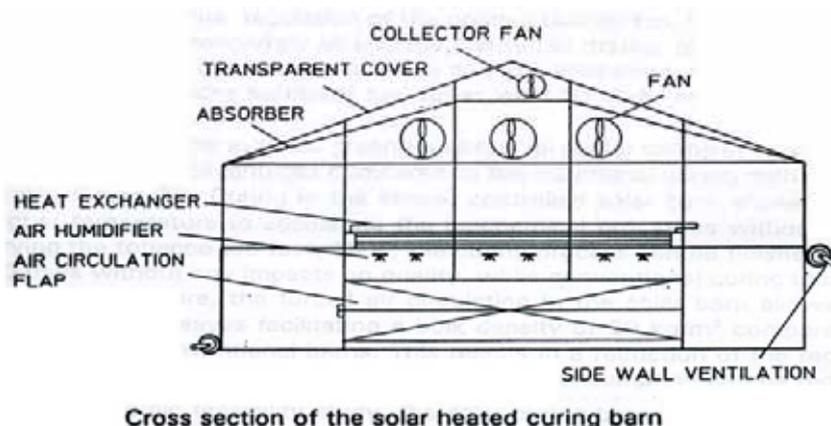
รูปที่ 2.13 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์สำหรับใช้ออบแห้งสมุนไพร ที่พัฒนาโดย Muller และคณะ (1989)

Kamaruddin และคณะ (1996) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นฉนวน โปร่งแสงขึ้นสองรูปแบบ คือแบบที่มีแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์และแบบไม่มีแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และได้ทำการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งดังกล่าวโดยใช้อบแห้งผลผลิตต่างๆ เช่น กาแฟ โกโก้ เมล็ดวานิลลา (vanilla pods) และพบว่าเครื่องอบแห้งดังกล่าวมีสมรรถนะเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐกิจอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยเครื่องอบใช้แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะมีราคาแพงกว่า เครื่องอบดังกล่าวมีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ 107 m² สามารถอบกาแฟได้ปริมาณมากถึง 1.1 ตัน จากความชื้นเริ่มต้น 63.2 % เมื่ออบเสร็จแล้วจะเหลือความชื้นสุดท้าย 11.3% และมีอัตราการไหล 0.57 kg/s

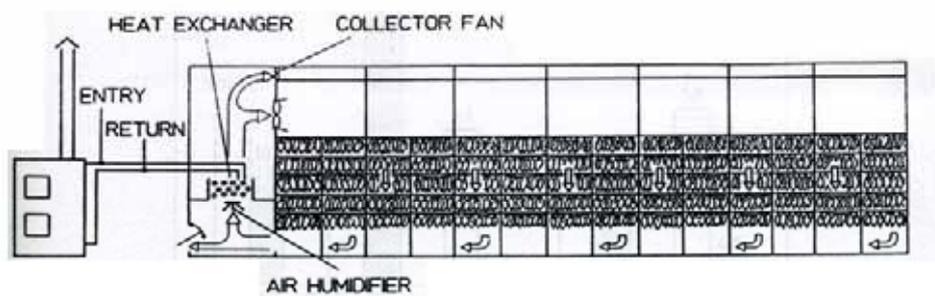


รูปที่ 2.14 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนา
โดย Kamaruddin และคณะ (1996)

Bux และคณะ (1996) ได้สร้างเครื่องอบแห้งกรีนเฮาส์เพื่อใช้บ่มใบยาสูบดังแสดงในรูปที่ 2.15 เครื่องอบนี้นอกจากจะใช้บ่มใบยาสูบแล้วยังสามารถใช้อบวัสดุอย่างอื่นได้เช่น ไม้ เครื่องหนัง ในตัวเครื่องประกอบด้วย หลังกาทำหน้าที่เป็นแผงรับรังสีอาทิตย์ (solar air heater) มีแหล่งความร้อนเสริมและใช้พัดลม 5 ตัว แต่ละตัวมีกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ ทำหน้าที่เป่าให้อากาศไหลเวียน

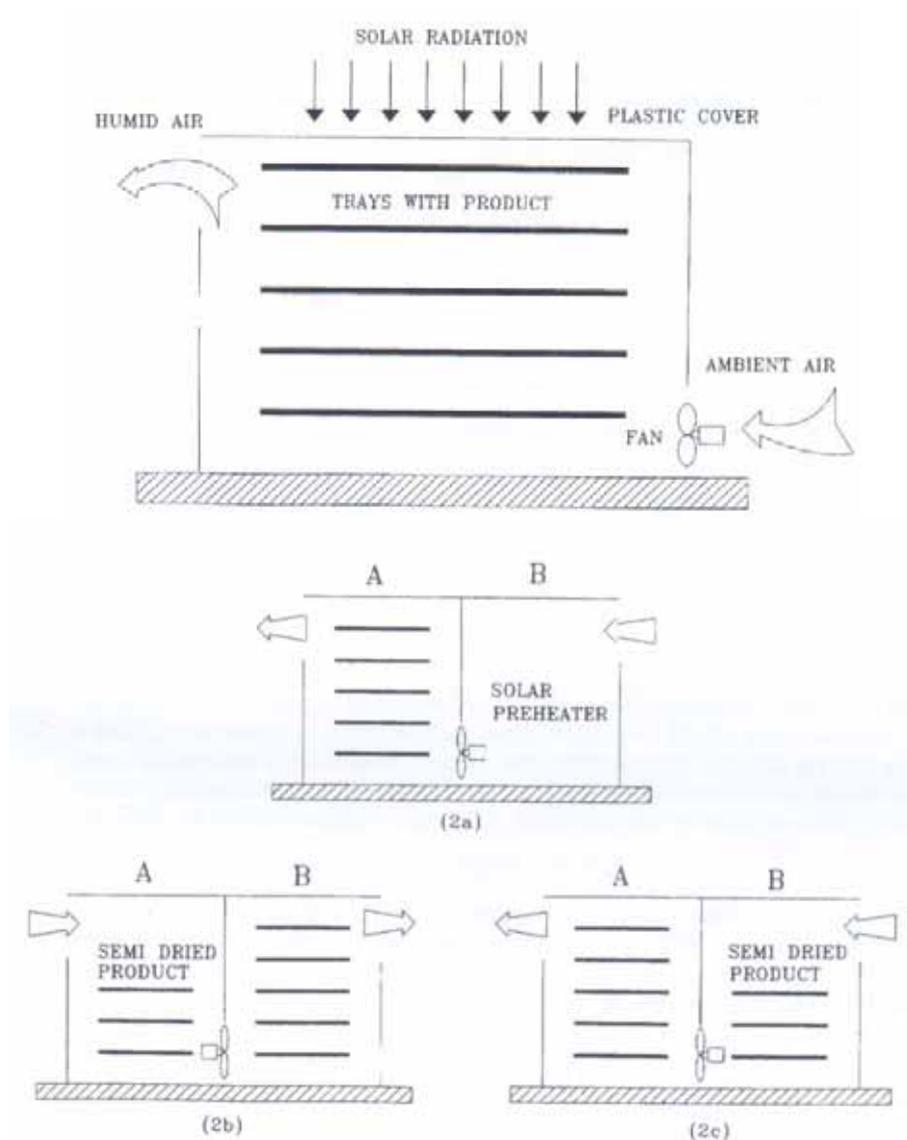


Cross section of the solar heated curing barn



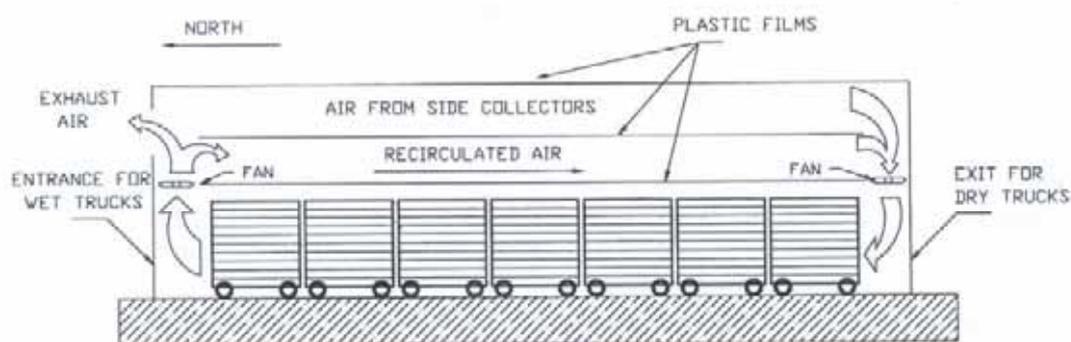
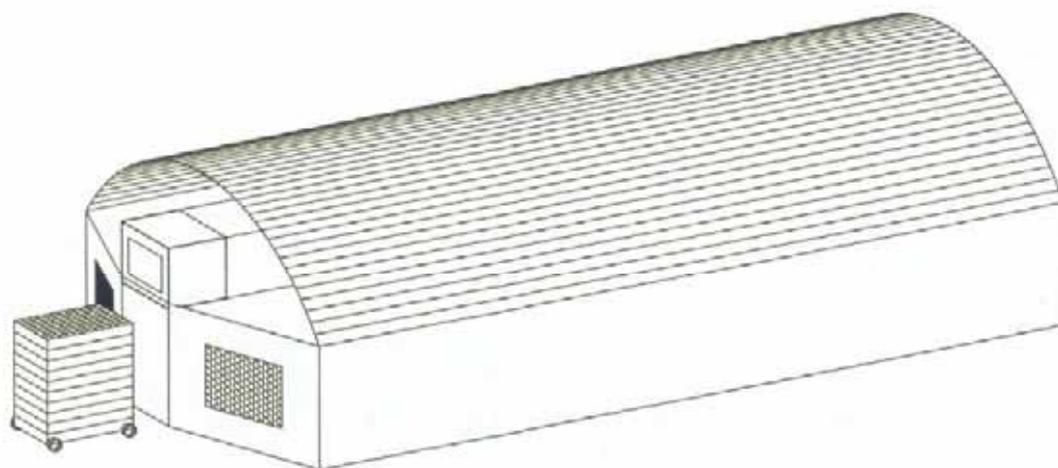
รูปที่ 2.15 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Bux และคณะ (1996)

Miguel และ Lui (1998) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้พลาสติกเป็นฉนวนโปร่งแสงที่มีพื้นที่รับรังสีอาทิตย์รวม 50 ตารางเมตร ซึ่งทำงานด้วยการพาความร้อนแบบบังคับ รูปแบบโครงสร้างของเครื่องอบมี 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 จากการศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งดังกล่าว พบว่า เครื่องอบแห้งแบบห้องเดี่ยวสามารถใช้ออบแห้งผลิตผลได้ 200 กิโลกรัม เมื่ออบเสร็จแล้วเหลือผลิตผล 187 กิโลกรัม โดยใช้เวลา 110 ชั่วโมง สำหรับ ห้องอบคู่จะใช้เวลา 53 ชั่วโมง โดยเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ทำเป็นห้องคู่จะมีสมรรถนะเชิงเทคนิคดีกว่าแบบห้องเดี่ยว



รูปที่ 2.16 รูปเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ แบบห้องเดี่ยว และห้องคู่ที่พัฒนาโดย Miguel และ Lui (1998)

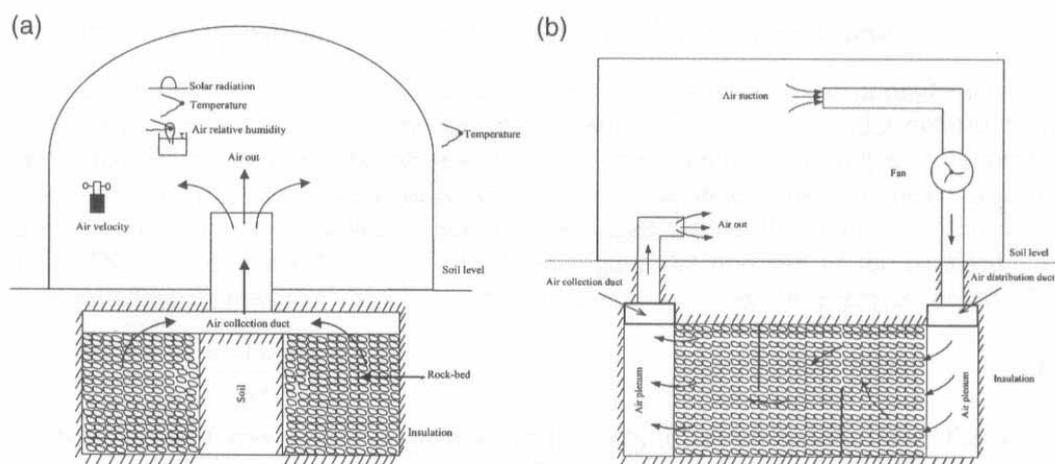
Condori และ คณะ (2000) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งอุโมงค์ลมแบบกรีนเฮาส์ขึ้น โดยได้ทำการทดลองอบพริกไทยหวาน (sweet pepper) และกระเทียม เครื่องอบแห้งนี้มีขนาด $7 \times 13 \times 3.7 \text{ m}^3$ และมีโครงสร้างเป็นรูปกึ่งทรงกระบอก วางตามทิศตะวันออกเฉียงเหนือและคลุมด้วยพลาสติกใสหนา $150 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 2.17



Operation scheme of the tunnel greenhouse drier.

รูปที่ 2.17 รูปภาพภายนอกและภายในของเครื่องอบแห้งอุโมงค์ลมแบบเรือนกระจกที่พัฒนาโดย Condori และคณะ (2000)

Kurlu และคณะ (2003) ได้ออกแบบและสร้างอุโมงค์แบบกรีนเฮ้าส์โดยใช้พลาสติก polyethylene เป็นฉนวนโปร่งแสงและหนา 0.2 mm มีพื้นที่รวม 15 m² ซึ่งพื้นบรรจุด้วย rock bed เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แล้วคายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.18 และใช้พัดลมขนาด 1.1 kw และมีอัตราการไหล 1,100 m³/h เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศภายในได้ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก 10°C ในช่วงเย็น และการรับรังสีอาทิตย์ของเครื่องอบมีประสิทธิภาพ 34 %



รูปที่ 2.18 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลมกรีนเฮ้าส์ที่ใช้ rock bed ดูกกลินและ
สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Kurlu และคณะ (2003)

Koyuncu และ คณะ(2005) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮ้าส์ขึ้น โดยได้ทำการทดลอง
อบพริก ส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งประกอบด้วย โครงเหล็กทาสีดำ ภาชนะพลาสติก พื้น
สีดำที่เป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ฉนวน แผ่นพลาสติก โพลีเอทิลีน ช่องใส่ผลิตภัณฑ์ ช่องอากาศเข้า
และออก และปล่อง เครื่องอบแห้งแบบ greenhouse อันแรก (Model I : M-I) จะประกอบด้วยถาด 3
ถาด และพื้นที่ส่วนอบแห้งมีขนาด 1.62 m^2 ความกว้างของถาดชั้นล่าง ชั้นกลาง และชั้นบนเป็น
82, 54 และ 26 cm ตามลำดับ โดยที่ช่องอากาศเข้าจะมี 2 ช่อง อันแรกจะอยู่ด้านล่างของด้านหน้า อัน
สองจะอยู่ด้านล่างของด้านหลังซึ่งช่องอากาศเข้ามีขนาด $2.5 \times 100 \text{ cm}$ และช่องอากาศออกจะอยู่ตรง
กลางทางด้านบนของเครื่องอบแห้งมีขนาด $6 \times 30 \text{ cm}$ ตัวพื้นจะทำด้วยแผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.025 mm
แล้วทาสีดำ เพื่อเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยแผ่นอะลูมิเนียมจะวางอยู่บนฉนวนที่มีความ
หนา 5 cm และตัวเครื่องจะยกสูงจากพื้น 20 cm

เครื่องอบแห้งแบบ greenhouse เครื่องที่สอง (Model II : M-II) สร้างให้มีลักษณะเป็น
ชั้นบันได โดยจะมีทั้งหมด 7 ชั้น แบ่งเป็นซ้ายและขวาอย่างละ 3 ชั้น และตรงกลางอีก 1 ชั้น มีพื้นที่
ส่วนอบ 1 m^2 โดยแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะวางอยู่บนฉนวนที่มีความหนา 5 cm โดยที่ช่อง
อากาศเข้าจะมี 2 ช่อง อันแรกจะอยู่ด้านล่างของด้านหน้า อันสองจะอยู่ด้านล่างของด้านหลัง โดย
ช่องอากาศเข้ามีขนาด $1.5 \times 175 \text{ cm}$ และช่องอากาศออกจะอยู่ตรงกลางทางด้านบนของเครื่อง
อบแห้งมีขนาด $5 \times 20 \text{ cm}$ โดยตัวเครื่องเมื่อประกอบทั้งหมดแล้ว จะปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน

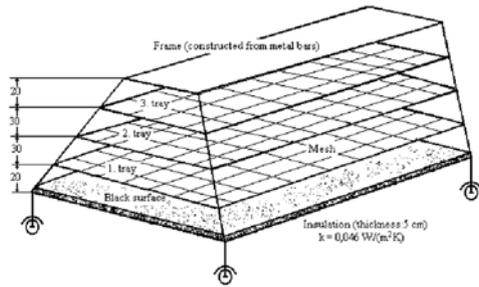


Fig. 1. Schematic presentation of M-I (measurements are in cm).

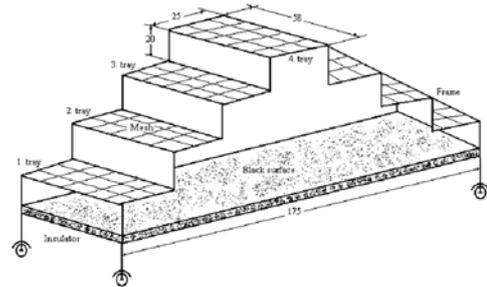


Fig. 3. Schematic presentation of M-II.

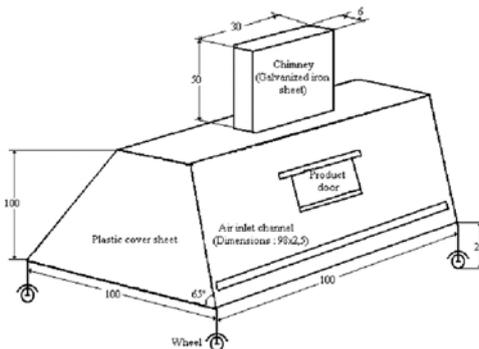


Fig. 2. A simple presentation of M-I.

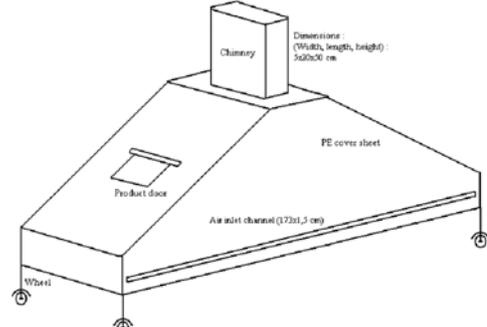
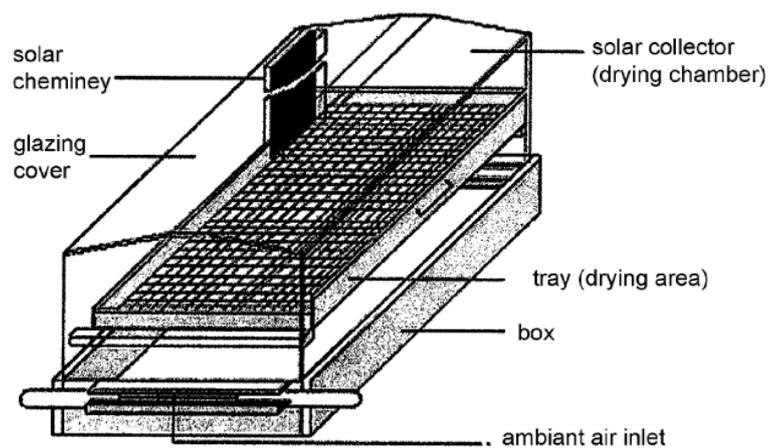


Fig. 4. A simple presentation of M-II.

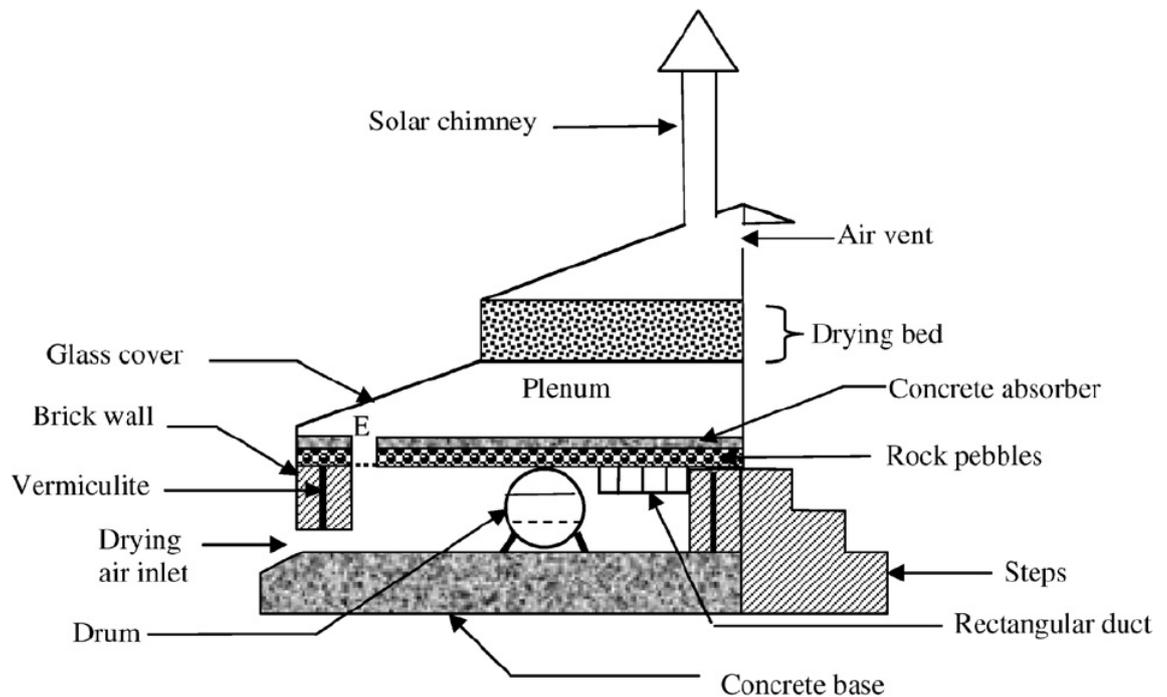
รูปที่ 2.19 เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Koyuncu และ คณะ(2005)

Gbaha และคณะ (2006) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งอุโมงค์ลมแบบกรีนเฮาส์ขึ้น โดยได้ทำการทดลองอบแห้งมันสำปะหลัง กว๊วย และมะม่วง ตัวเครื่องอบแห้งนี้มีขนาด 1.24x0.81 m² และมีโครงสร้างเป็นรูปกึ่งทรงพาราโบลา มีปล่องอากาศช่วยถ่ายเทความชื้นออกจากส่วนอบแห้ง ตัวเครื่องปิดคลุมด้วยกระจกหนา 0.004 m ดังรูปที่ 2.20



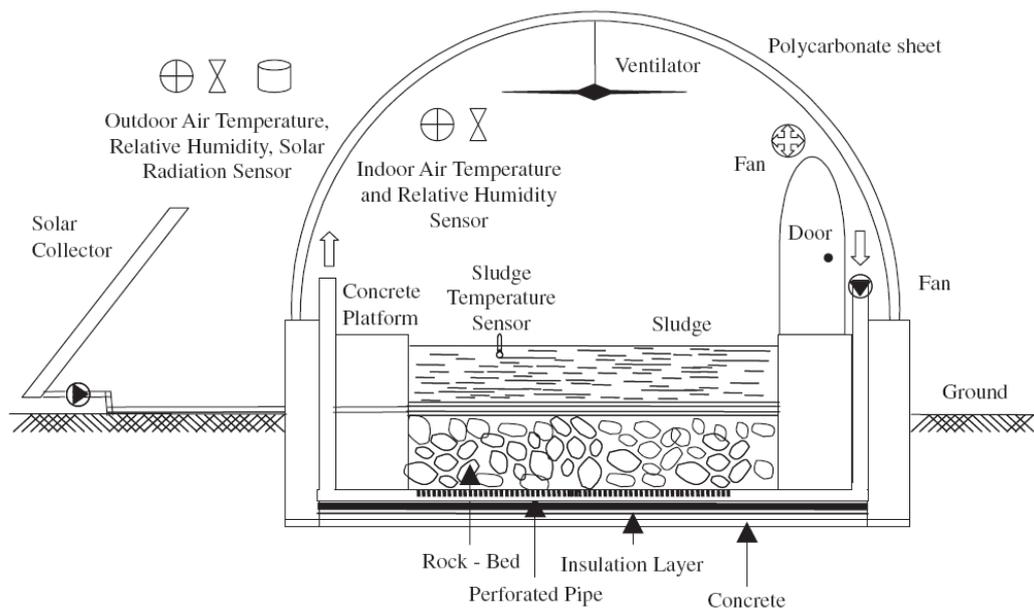
รูปที่ 2.20 รูปเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Gbaha และคณะ (2006)

Madhlopa และคณะ (2006) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบ indirect mode เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่ส่วนอบ 4.1 m² ส่วนของแผงรับรังสีอาทิตย์ปิดคลุมด้วยกระจกและใช้คอนกรีตเป็นตัวดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีการใช้ biomass เป็นพลังงานความร้อนเสริม และมีปล่องควันช่วยระบายควันที่เกิดจากการเผาไหม้และระบายความชื้นออกจากส่วนอบ



รูปที่ 2.21 เครื่องอบแห้งแบบ indirect mode ที่ใช้ concrete, rock pebbles ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Madhlopa (2006)

Salihoglu และคณะ (2006) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์โดยโครงสร้างรูปทรงพาราโบลาและปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ใช้พัดลมดูดอากาศขนาด 12 วัตต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีอัตราการไหล 90 m³/h ดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องออกมาภายนอก เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่ฐานขนาด 2 x 5 ตารางเมตร สูง 2.5 เมตร พื้นบรรจุด้วย rock bed เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แล้วคายความร้อน



รูปที่ 2.22 เครื่องอบแห้งดินโคลนแบบกรีนเฮ้าส์ที่ใช้ rock bed ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Salihoglu และคณะ (2006)

Janjai และคณะ (2007) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮ้าส์โดยโครงสร้างรูปทรงพาราโบลาและปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ใช้พัดลมดูดอากาศขนาด 14.4 วัตต์ จำนวน 3 ตัวดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องออกมาภายนอก เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่ฐานขนาด 5.5 x 8 ตารางเมตร สูง 3.5 เมตร สามารถอบแห้งพริกสดได้ประมาณ 300 กิโลกรัมให้แห้งภายในเวลา 5 วัน



รูปที่ 2.23 เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮ้าส์ที่พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2007)

จากการสำรวจงานวิจัยด้านการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ที่ผ่านมาพบว่า ส่วนใหญ่เป็นขนาดเล็กมีความจุน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะทำการศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่ที่จัดสร้างในโครงการความร่วมมือด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานระหว่างประเทศไทยและสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ตามรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮ้าส์

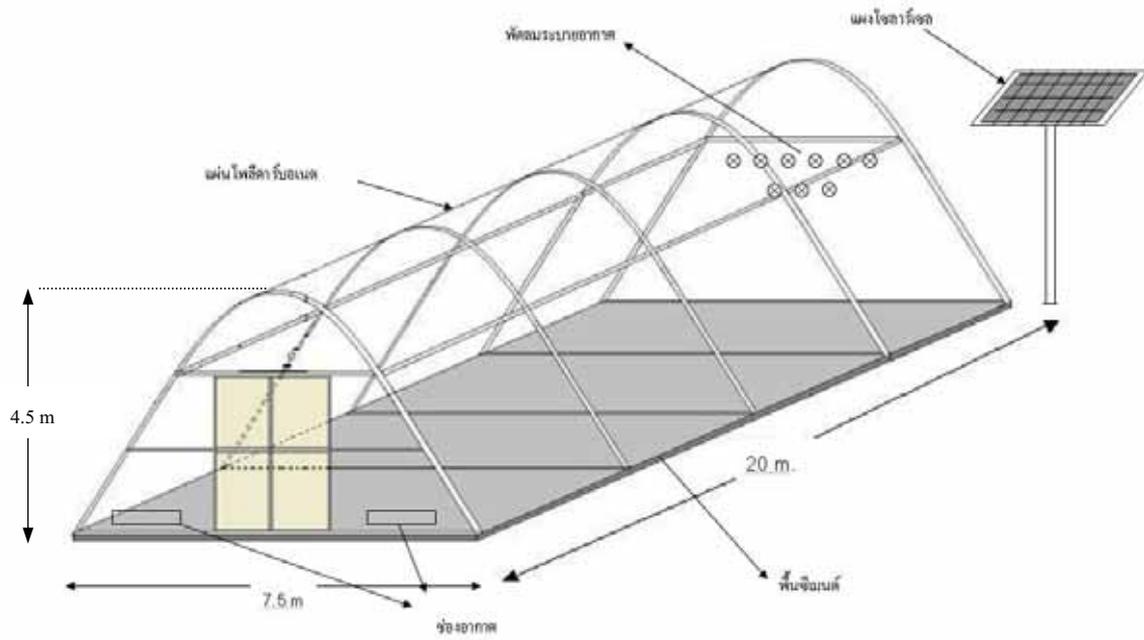
เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮ้าส์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดสร้างในโครงการความร่วมมือด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานระหว่างไทยกับสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (สปป.ลาว) ที่วิทยาลัยเกษตรและป่าไม้จำปาสัก เมืองปากเซ แขวงจำปาสัก ประเทศสปป.ลาว โดยผู้วิจัยได้ร่วมงานในการจัดเตรียมวัสดุและก่อสร้าง หลังจากสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยเป็นผู้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าวตามรายละเอียดดังนี้

3.1 ลักษณะและโครงสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการปรับปรุงจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดเล็กที่พัฒนาโดย Janjai et al (2007) โดยขยายขนาดพื้นที่ฐานจากเดิม ซึ่งมีขนาด 5.5 m x 8.0 m ให้เป็น 7.5 m x 20.0 m และเพิ่มพัดลมระบายอากาศตามรายละเอียดดังนี้

3.1.1 โครงสร้างของเครื่องอบแห้ง

เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงแบบพาราโบลา ปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต เพื่อช่วยให้เกิดผลเรือนกระจก (greenhouse effect) เครื่องอบแห้งดังกล่าวมีขนาด 7.5 m x 20 m และสูง 4.5 m ชั้นวางผลผลิตภายในเป็นแบบชั้นเดียวจำนวน 90 อัน มีพื้นที่วางผลผลิตทั้งหมด 90 ตารางเมตร พื้นของเครื่องอบแห้งเป็นคอนกรีตหนา 20 cm ด้านบนปูด้วยกระเบื้องสีดำ โครงสร้างด้านตัดขวางทำด้วยเหล็กท่อนัดเป็นรูปพาราโบลา จำนวน 11 ชุด แต่ละชุดถูกยึดด้านข้างด้วยเหล็กกล่องดังรูปที่ 3.1



(ก)

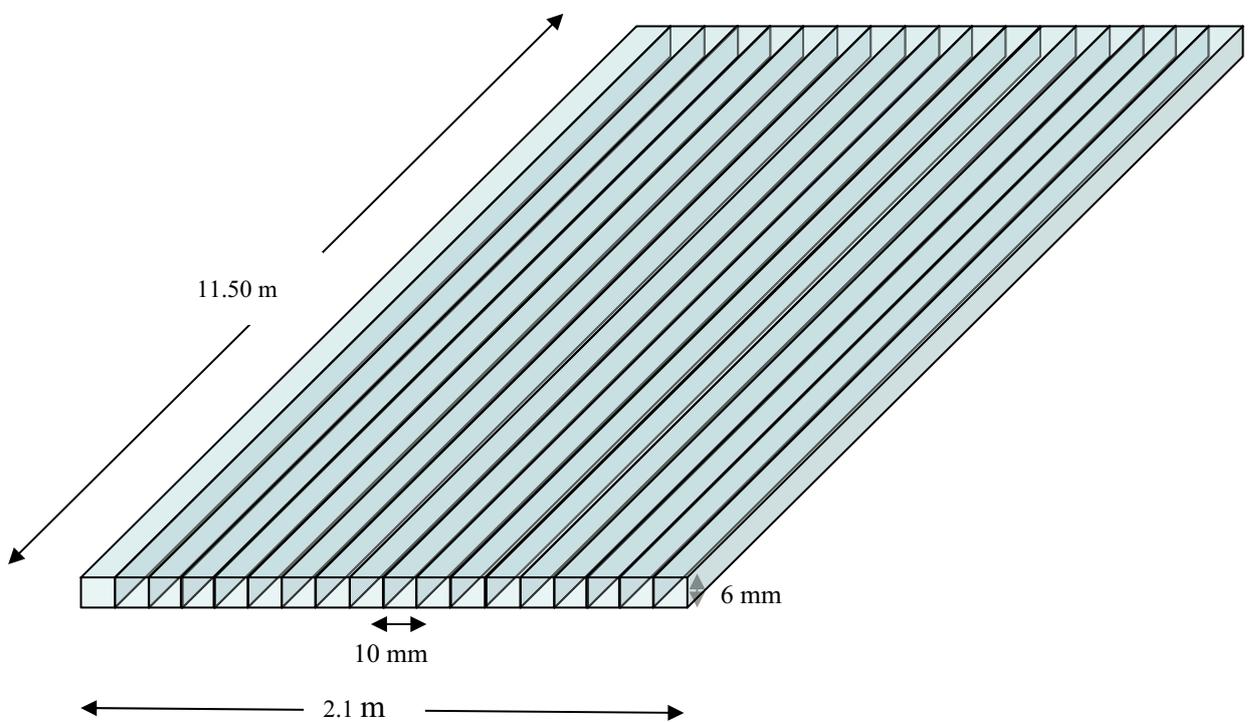


(ข)

รูปที่ 3.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ซึ่งจะศึกษาสมรรถนะ
(ก) โครงสร้างของเครื่องอบแห้ง (ข) ภาพเครื่องอบแห้ง

3.1.2 วัสดุปิดคลุม

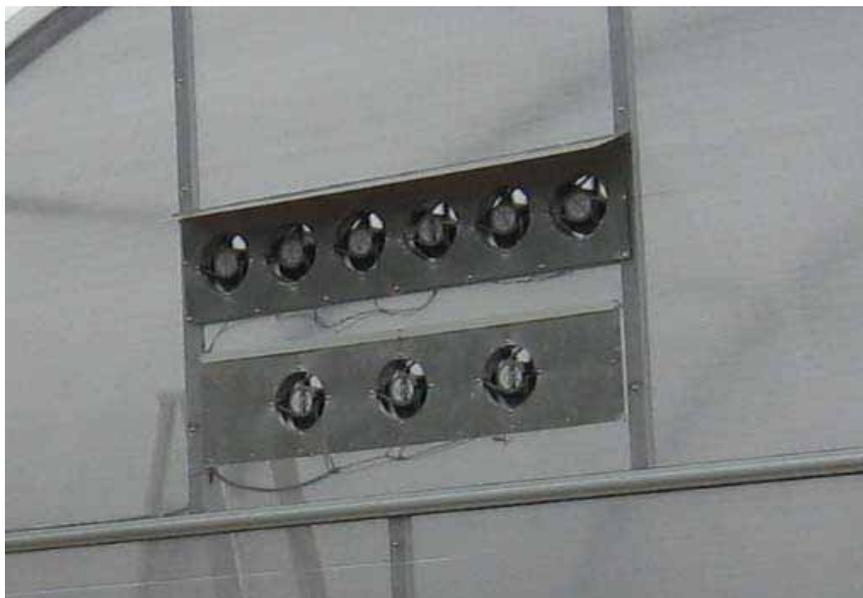
เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์นี้ปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต โดยใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตขนาด 2.1 m x 11.50 m ปิดบนโครงรูปพาราโบลาและยึดรอยต่อระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้วยชุด clamping ถักน้ำรั้ว ด้านหลังปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตเช่นเดียวกัน สำหรับด้านหน้าปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต และมีประตูกระจกปิดเปิดสำหรับนำผลิตภัณฑ์เข้าออก(รูปที่ 3.2)



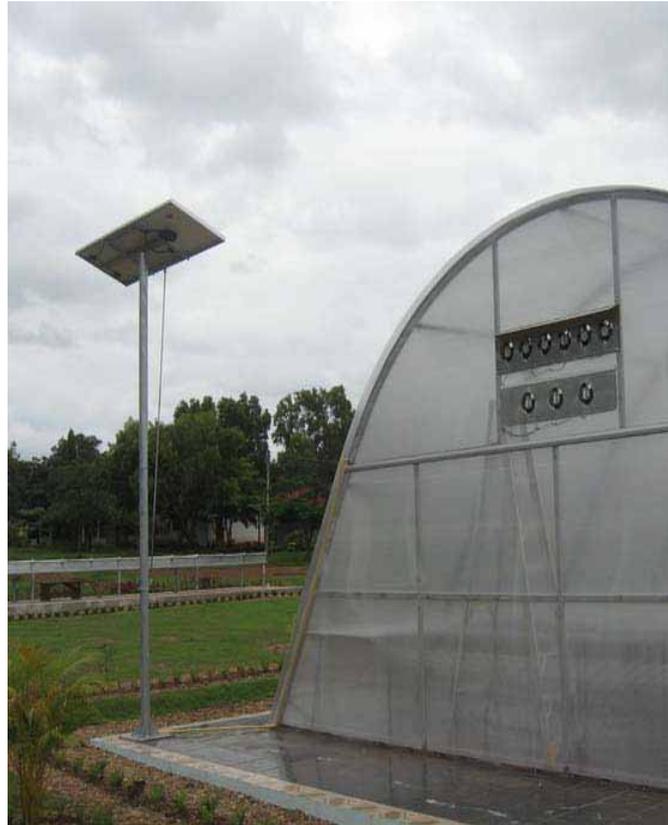
รูปที่ 3.2 ลักษณะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

3.1.3 ระบบระบายอากาศ

เครื่องอบแห้งนี้ใช้พัดลมแบบ axial fan ซึ่งใช้ DC motor 15 วัตต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 15 ซม. จำนวน 9 ตัว ทำหน้าที่ระบายความชื้นออกจากเครื่องอบแห้งและทำการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผงเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับพัดลมดูดอากาศ แผงโซลาร์เซลล์ดังกล่าวติดตั้งไว้บนเสาสูง 5.5 เมตร ซึ่งสามารถปรับมุมการรับแสงอาทิตย์ได้ตามตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องอบแห้งเพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงจากดวงอาทิตย์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ พัดลมดูดอากาศจะทำงานโดยใช้กำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ โดยอัตราการระบายอากาศจะแปรตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยในช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูง จะระบายอากาศได้มากทำให้อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบไม่สูงเกินไป และในทางกลับกันถ้าความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าน้อยระบบระบายอากาศก็จะทำงานลดลง ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องอบไม่ลดลงไปมาก



รูปที่ 3.3 พัดลมระบายอากาศ



รูปที่ 3.4 แผงโซลาร์เซลล์

3.1.4 ชั้นวางผลิตภัณฑ์

ชั้นตากผลผลิตเป็นแบบถาด มีจำนวน 90 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยตะแกรงอะลูมิเนียมที่มีขนาด 1 m x 1 m วางสูงจากพื้น 0.6 m ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ชั้นตากผลิตภัณฑ์

3.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าว โดยได้ทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า และกาแฟโดยผู้วิจัยจะทำการทดลองอบกล้วย 1 ครั้งจำนวน 1,000 กิโลกรัม และอบกาแฟจำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 200 กิโลกรัม ในการทดลองจะดำเนินการดังต่อไปนี้

3.2.1 อุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูล

ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง จะใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) เทอร์โมคอปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศในเครื่องอบแห้ง
- 2) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 B
- 3) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศแบบฮีตไวร์ (hot wire anemometer) ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5
- 4) แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับหากำลังไฟฟ้าของพัดลม
- 5) เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ (pyranometer) แบบเทอร์โมไพล์ (thermopile) รุ่น CM11 ของ Kipp & Zonen
- 6) เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42
- 8) ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP สำหรับหามวลแห้งของผลผลิต



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 B



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5



รูปที่ 3.8 ไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM11



รูปที่ 3.9 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100



รูปที่ 3.10 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

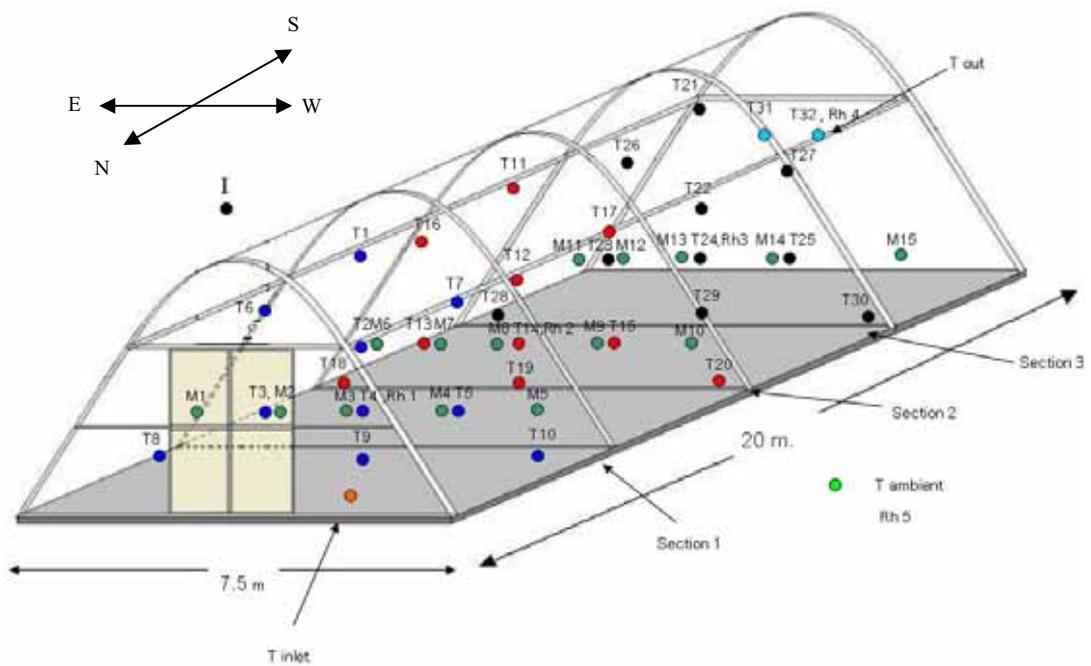


รูปที่ 3.12 เครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42

ผู้วิจัยจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิอากาศและไฮโกรมิเตอร์ สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง ในการหาความเข้มข้นสีดวงอาทิตย์ จะติดตั้งไพราโนมิเตอร์ไว้ที่ด้านบนหลังคาของเครื่องอบแห้ง ข้อมูลที่ได้จะบันทึกใน data logger ทุก 10 นาที ตำแหน่งของจุดวัดต่างๆ แสดงไว้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งของจุดวัดต่างๆ ในการทดลองอบแห้ง (T = อุณหภูมิ, Rh = ความชื้นสัมพัทธ์
I = ความเข้มรังสีอาทิตย์ และ M = Moisture content)

3.3 การทดลอง

3.3.1 วิธีการทดลอง

แต่ละการทดลองผู้วิจัยจะทำการทดลองอบกล้วย 1 ครั้งจำนวน 1,000 กิโลกรัม และอบกาแฟจำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 200 กิโลกรัม แต่ละการทดลองจะดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่จะอบ และตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งในเครื่องอบและที่ตากแดดตามธรรมชาติ
- 2) นำผลิตภัณฑ์วางเป็นชั้นบางบนตระแกรงในเครื่องอบแห้ง
- 3) บันทึกข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ทุกๆ 1 ชม.
- 4) กรณีของกาแฟจะปล่อยให้ผลิตภัณฑ์อยู่ในเครื่องอบในตอนกลางคืน สำหรับกรณีของกล้วยจะนำผลิตภัณฑ์ออกบรรจุในถุงพลาสติกเพื่อเกิดกระบวนการการหมักในตอนกลางคืนและรุ่งขึ้นตอนเช้าจะนำเข้าไปตากในเครื่องอบแห้งต่อไป
- 5) ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 - 4 จนกว่าผลิตภัณฑ์จะแห้งได้ตามต้องการ
- 6) นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหามวลแห้ง

ในการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์จะอาศัยสมการ

$$M(t) = \frac{m_p(t) - m_s}{m_p(t)} \quad (3.4)$$

โดย $M(t)$ = ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ, [% w.b.]
 $m_p(t)$ = มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด, [kg]
 m_s = มวลแห้งของผลิตภัณฑ์, [kg]



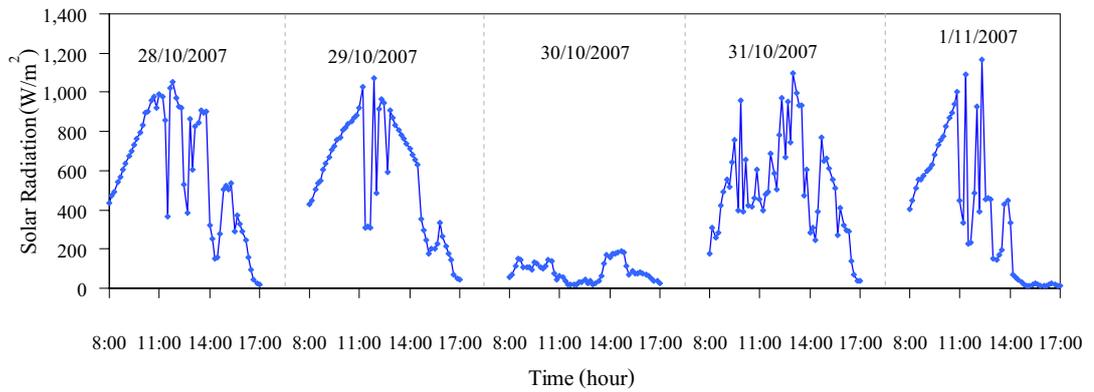
รูปที่ 3.15 กล้วยน้ำว้าสุกที่ใช้ในการทดลอง



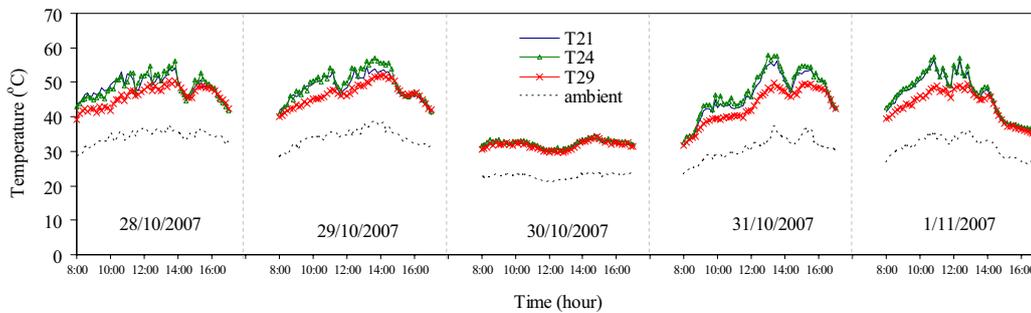
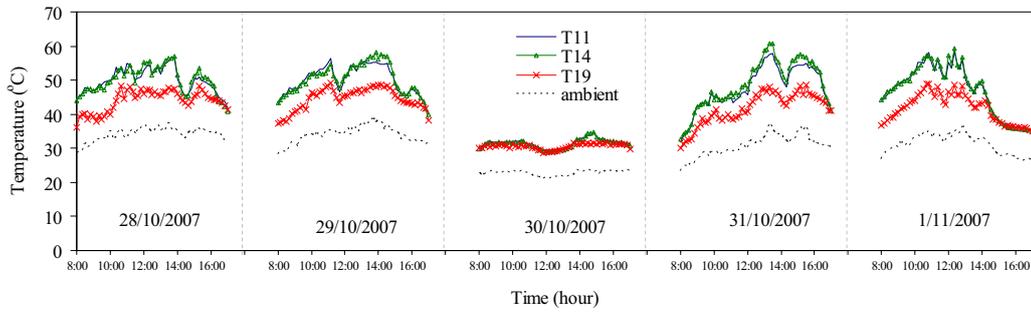
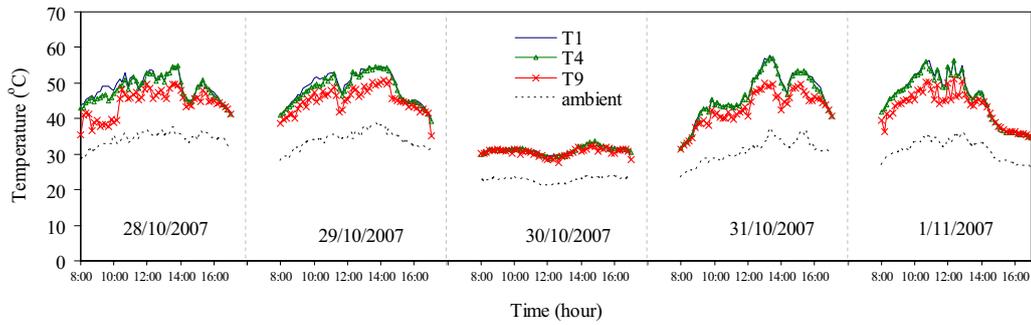
รูปที่ 3.16 กล้วยน้ำว้าที่อยู่ในเครื่องอบแห้ง

3.3.2 ผลการทดลองอบกล้วย

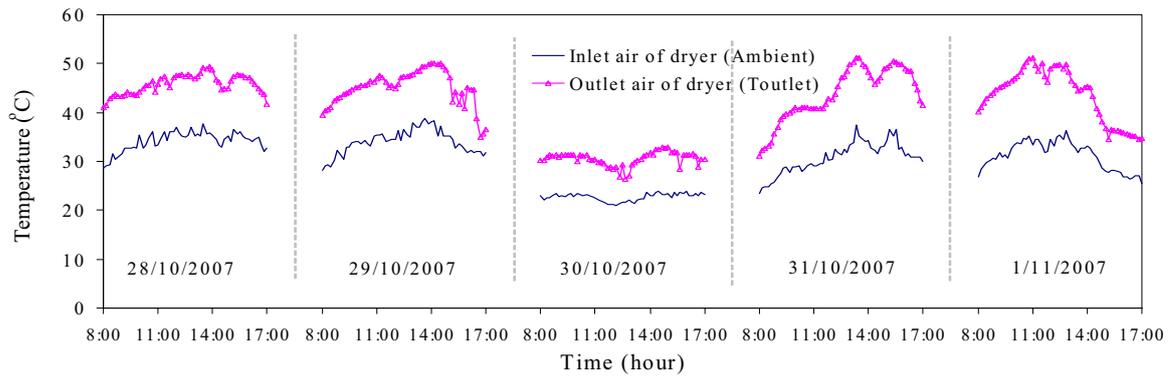
การทดลองดำเนินการในช่วงวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 โดยใช้กล้วยน้ำว้าจำนวน 1,000 กิโลกรัม ความชื้นของกล้วยมีค่าประมาณ 70 % w.b. การทดลองทำในช่วงปลายฤดูฝน ท้องฟ้าค่อนข้างแจ่มใส มีเมฆบ้างในบางช่วงเวลา และมีฝนตกในการทดลองวันที่ 3 ดังจะเห็นได้จากการแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าถึงค่าสูงสุดในตอนเที่ยงและลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงเย็น แต่ในวันที่ 3 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะมีค่าน้อย (รูปที่ 3.17) โดยค่าสูงสุดในตอนเที่ยงมีค่าระหว่าง $900 - 1,100 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในส่วนของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่ามีการแปรค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าระหว่าง $50 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลา 9:00 - 17:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ $8 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิดังกล่าวจะช่วยเพิ่มศักยภาพของอากาศในการอบแห้ง (รูปที่ 3.18) และรูปที่ 3.19 เมื่อพิจารณากราฟของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเห็นว่ามีการลดลงจากช่วงเช้าจนถึงค่าต่ำสุดในตอนเที่ยงและเพิ่มขึ้นในตอนเย็น เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จะพบว่าอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ยกเว้นในวันที่ 3 ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเนื่องจากมีฝนตก (รูปที่ 3.20) จากศักยภาพการอบแห้งของอากาศภายในเครื่องอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศแวดล้อมและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้น้ำภายในกล้วยที่อยู่ในเครื่องอบแห้งระเหยได้เร็วกว่าที่ตากแดดตามธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากการลดลงของความชื้นของกล้วยภายในเครื่องอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่วางอยู่นอกเครื่องอบแห้ง สำหรับความชื้นของผลิตภัณฑ์ พบว่าวันที่ 1-4 ความชื้นจะลดลงค่อนข้างเร็วโดยในช่วงสี่วันแรกความชื้นของผลิตภัณฑ์ จะอยู่ในช่วงประมาณ 28% - 30% w.b. ส่วนในวันที่ 5 นั้นความชื้นของผลิตภัณฑ์จะมีการลดลงค่อนข้างน้อยโดยความชื้นของผลิตภัณฑ์จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 28% w.b. (กราฟรูปที่ 3.21) จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า เครื่องอบแห้งนี้สามารถใช้ออบแห้งกล้วย 1,000 กิโลกรัม ที่ความชื้น 70 % w.b. ให้เหลือ 20 % w.b. ในเวลา 5 วัน เมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ จะต้องใช้เวลา 7 วันถึงจะแห้ง หลังจากการอบแห้งแล้วกล้วยน้ำว้าทั้งหมดจากน้ำหนักสด 1,000 กิโลกรัม จะเหลือน้ำหนักอยู่ 375 กิโลกรัม ซึ่งผลการทดลองได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.17 - 3.21



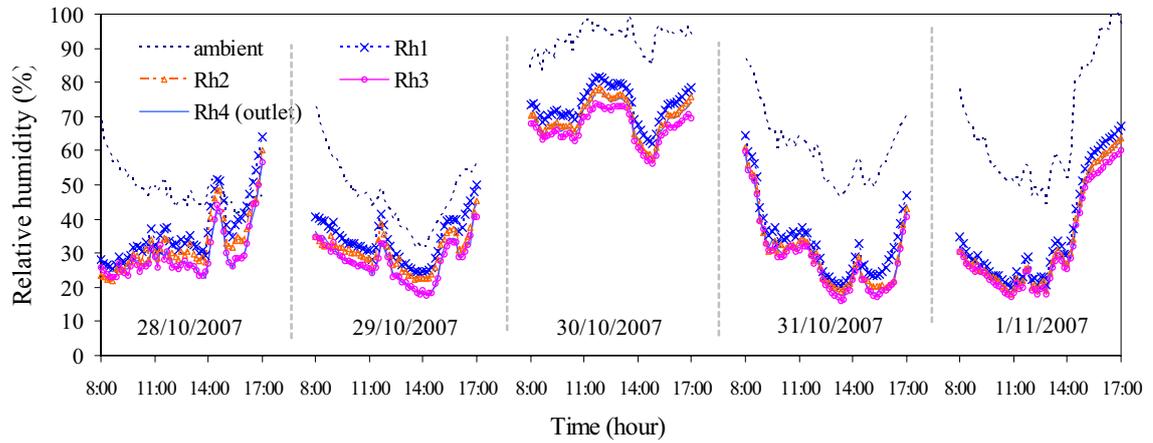
รูปที่ 3.17 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองอบแห้งกล้วยระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550



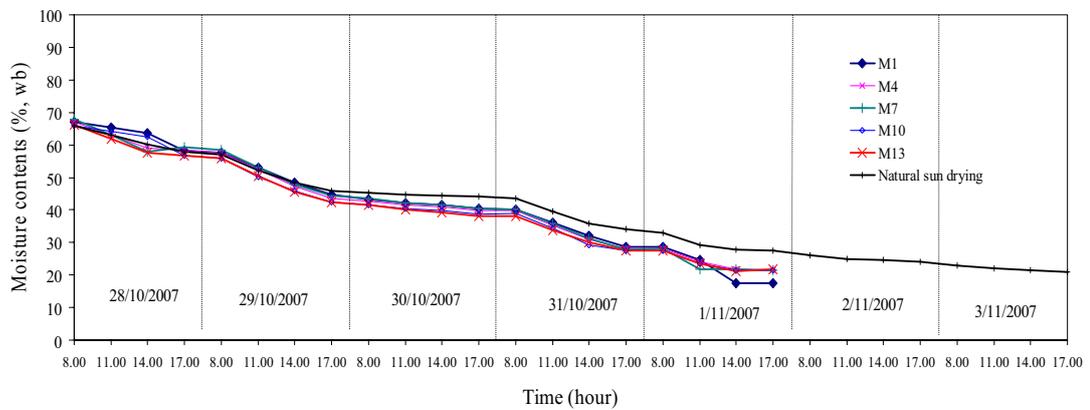
รูปที่ 3.18 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550



รูปที่ 3.19 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการอบแห้งระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550



รูปที่ 3.20 การแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550



รูปที่ 3.21 การแปรค่าของความชื้นระหว่างการอบแห้งระหว่างวันที่ 28 ตุลาคม-1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550

3.3.3 ผลการทดลองอบกาแฟ



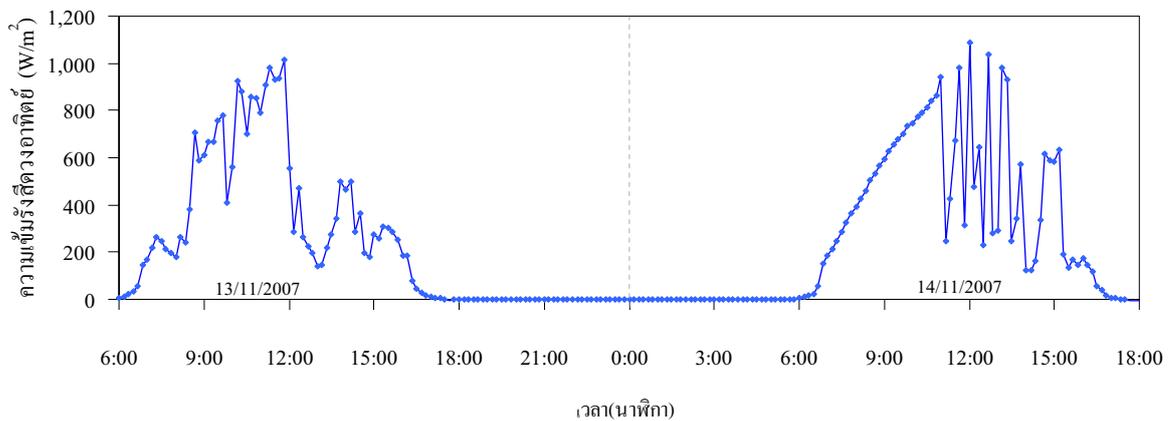
รูปที่ 3.22 เมล็ดกาแฟสดที่อยู่ภายในเครื่องอบแห้ง

ก) การทดลองครั้งที่ 1

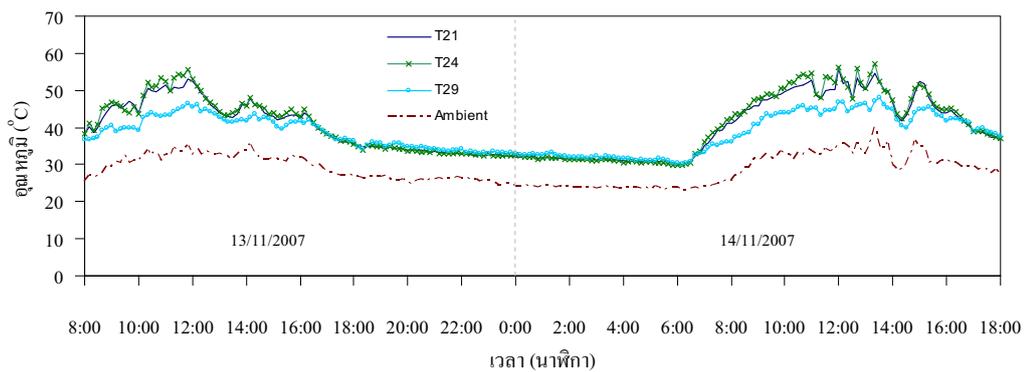
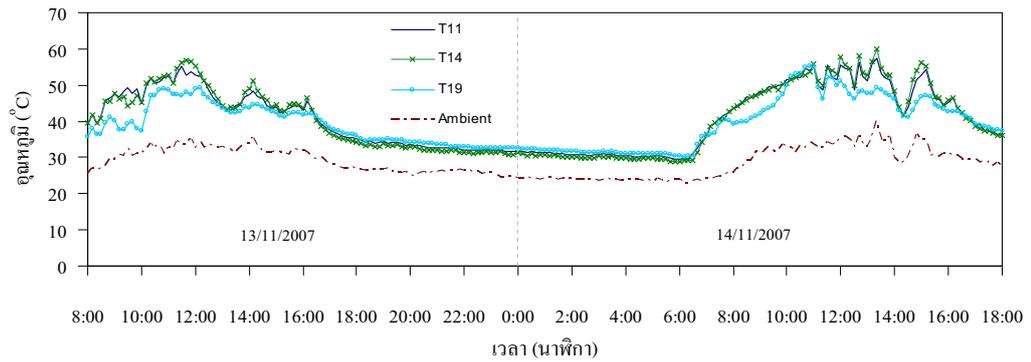
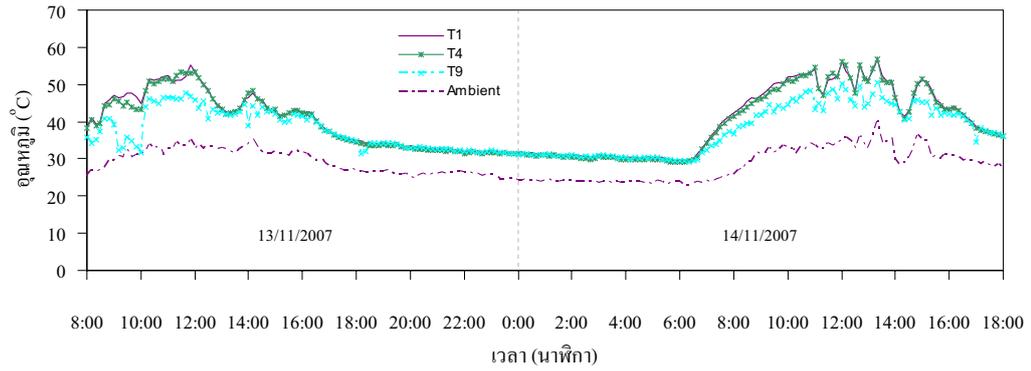
การทดลองครั้งที่ 1 ดำเนินการในช่วงวันที่ 13-16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 โดยใช้กาแฟจำนวน 200 กิโลกรัม ความชื้นของกาแฟมีค่าประมาณ 55 % w.b. โดยระหว่างทำการทดลองนั้นยังเป็นช่วงปลายฤดูฝนโดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งวันจะอยู่ในช่วง 23 - 32 °C ท้องฟ้าค่อนข้างแจ่มใส มีเมฆบ้างในบางช่วงเวลา ดังจะเห็นได้จากการแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ (รูปที่ 3.23) ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าถึงค่าสูงสุดในตอนเที่ยงและลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงเย็น โดยค่าสูงสุดในตอนเที่ยงมีค่าอยู่ระหว่าง 900 - 1,100 W/m² เหมาะสมกับการใช้งานอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในด้านของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่ามีค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าระหว่าง 50 - 60 °C ในช่วงเวลา 9:00 - 17:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 8 - 20 °C (รูปที่ 3.24) และรูปที่ 3.25 อุณหภูมิดังกล่าวจะช่วยเพิ่มศักยภาพของอากาศในการอบแห้ง เมื่อพิจารณากราฟของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเห็นว่ามีค่าลดลงจากช่วงเช้าจนถึงค่าต่ำสุดในตอนเที่ยงและเพิ่มขึ้นในตอนเย็นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.26 เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จะพบว่าอากาศ

ภายในเครื่องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีศักยภาพในการอบแห้งสูงกว่าอากาศแวดล้อม

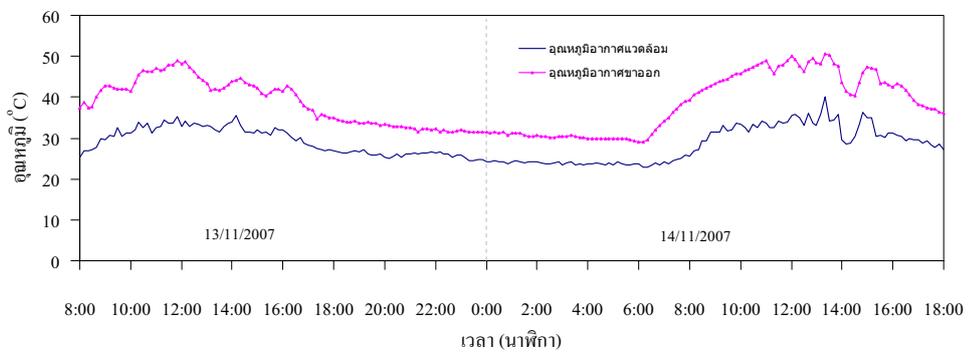
จากศักยภาพการอบแห้งของอากาศภายในเครื่องอบแห้งซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศแวดล้อมและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้กาแฟที่อยู่ในเครื่องอบแห้งระเหยได้เร็วกว่าที่ตากแดดตามธรรมชาติ ดังจะเห็นได้จากการลดลงของความชื้นของกล้วยและกาแฟในเครื่องอบแห้ง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ตากแดดตามธรรมชาติ (กราฟรูปที่ 3.27) จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า เครื่องอบแห้งนี้สามารถใช้ออบกาแฟ 200 กิโลกรัม ที่ความชื้น 55 % w.b. ให้เหลือ 13 % w.b. ภายในเวลา 2 วัน เมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ จะต้องใช้เวลา 4 วัน (รูปที่ 3.23-3.27)



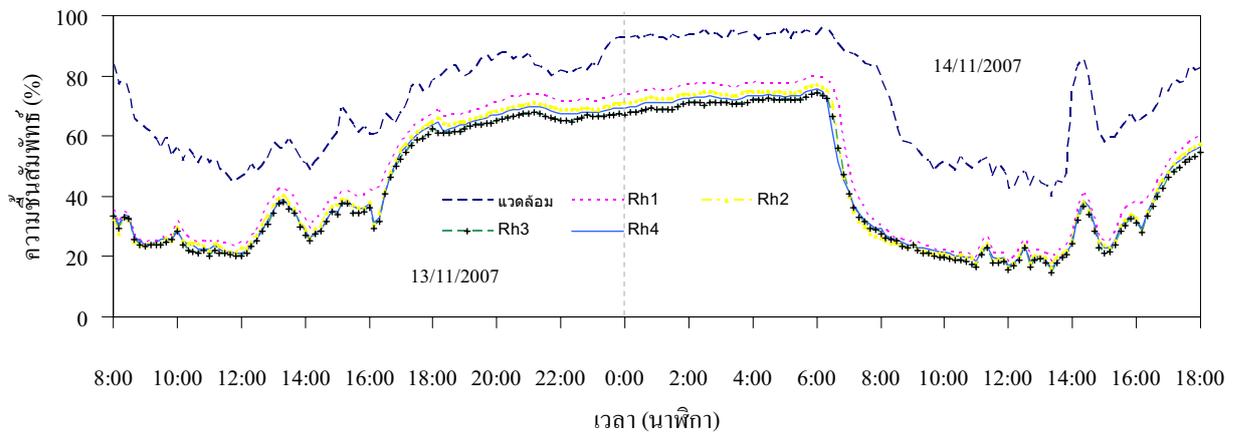
รูปที่ 3.23 การแปรค่าของความเข้มข้นสีอาทิตย์ระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1
(13-16 พฤศจิกายน 2550)



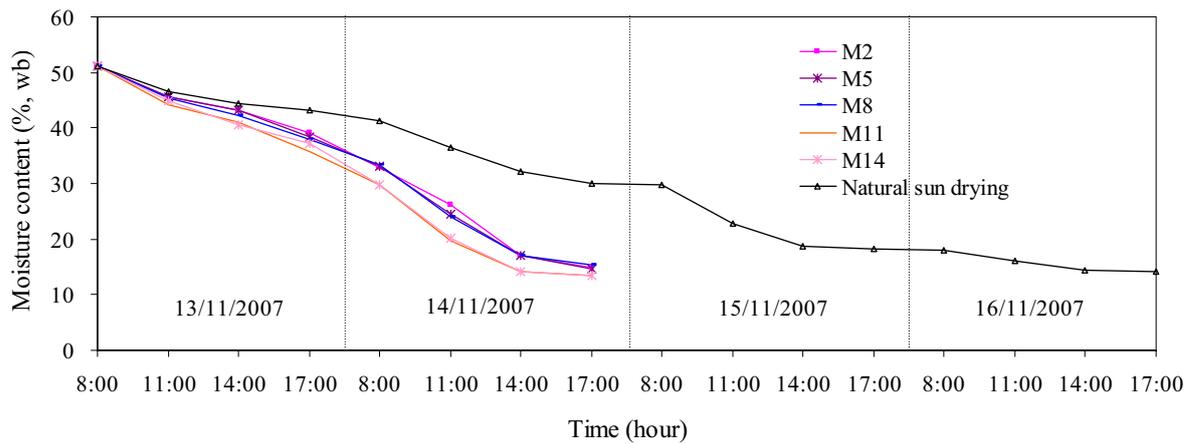
รูปที่ 3.24 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550)



รูปที่ 3.25 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550)



รูปที่ 3.26 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550)

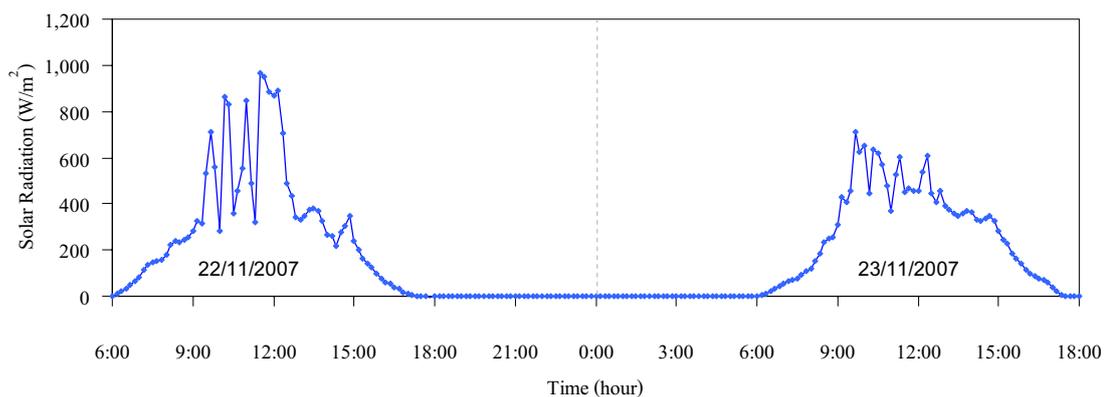


รูปที่ 3.27 การแปรค่าของความชื้นระหว่างกรอบแห้งกาแฟครั้งที่ 1 (13-16 พฤศจิกายน 2550)

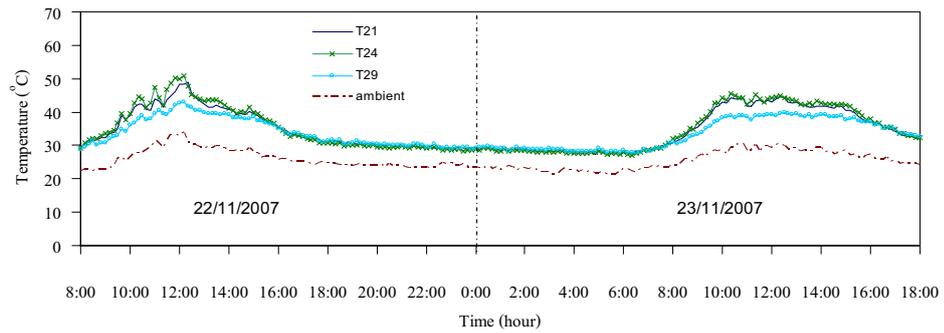
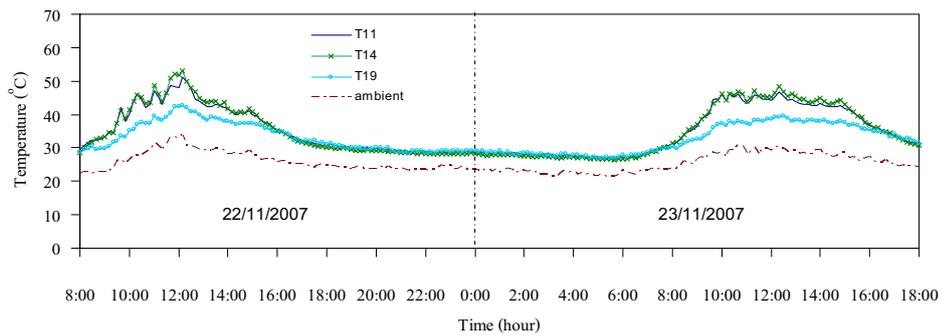
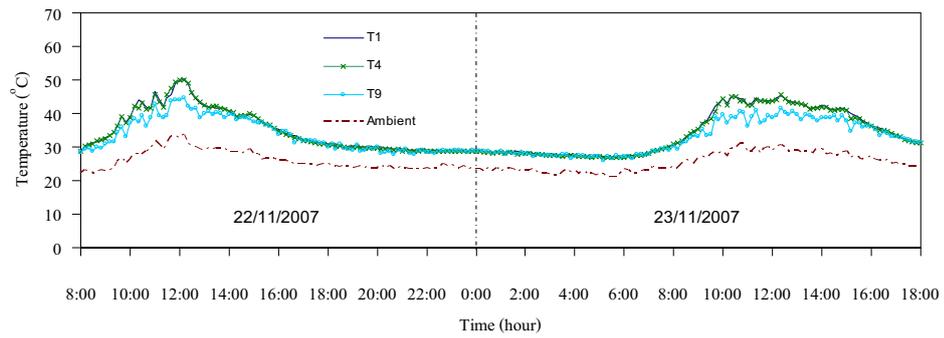
ข) การทดลองครั้งที่ 2

การทดลองครั้งที่ 2 ดำเนินการในช่วงวันที่ 22-25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 โดยใช้กาแฟจำนวน 200 กิโลกรัม ความชื้นของกาแฟมีค่าประมาณ 55 % w.b. โดยระหว่างทำการทดลองนั้นยังเป็นช่วงต้นฤดูหนาวโดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งวันจะอยู่ในช่วง 20 - 30 °C สภาพท้องฟ้าค่อนข้างแจ่มใส มีเมฆบ้างในบางช่วงเวลา ดังจะเห็นได้จากการแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.28 ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าถึงค่าสูงสุดในตอนเที่ยงและลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงเย็น โดยค่าสูงสุดในตอนเที่ยงแปรค่าอยู่ระหว่าง 900 – 1,000 W/m² แต่วันที่ 2 มีเมฆค่อนข้างมากดังจะเห็นได้จากกราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ ในด้านของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่ามีค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าระหว่าง 45 - 54 °C ในช่วงเวลา 9:00 - 17:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 12 - 20 °C (รูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.30) อุณหภูมิดังกล่าวจะช่วยเพิ่มศักยภาพของอากาศในการอบแห้ง เมื่อพิจารณากราฟของความชื้นสัมพัทธ์อากาศจะเห็นว่ามีการลดลงจากช่วงเช้าจนถึงค่าต่ำสุดในตอนเที่ยงและเพิ่มขึ้นในตอนเย็นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.31 เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จะพบว่าอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีศักยภาพในการอบแห้งสูงกว่าอากาศแวดล้อม

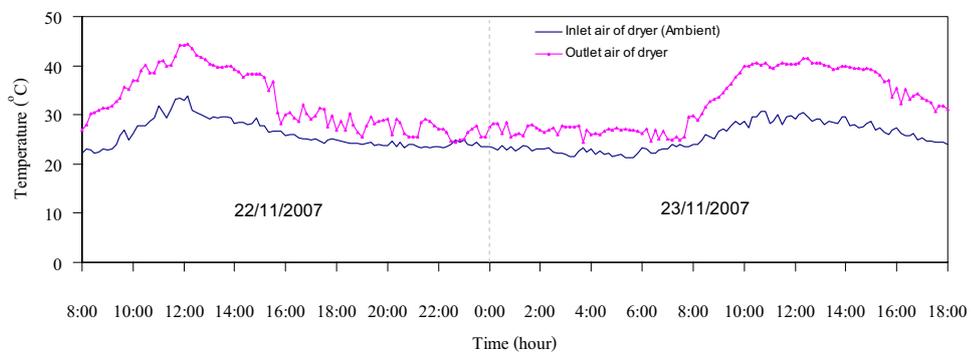
ในการทดลองครั้งที่ 2 นี้กาแฟที่ความชื้น 55 % w.b. จะลดลงเหลือ 13 % w.b. ภายในเวลา 2 วัน (รูปที่ 3.32)



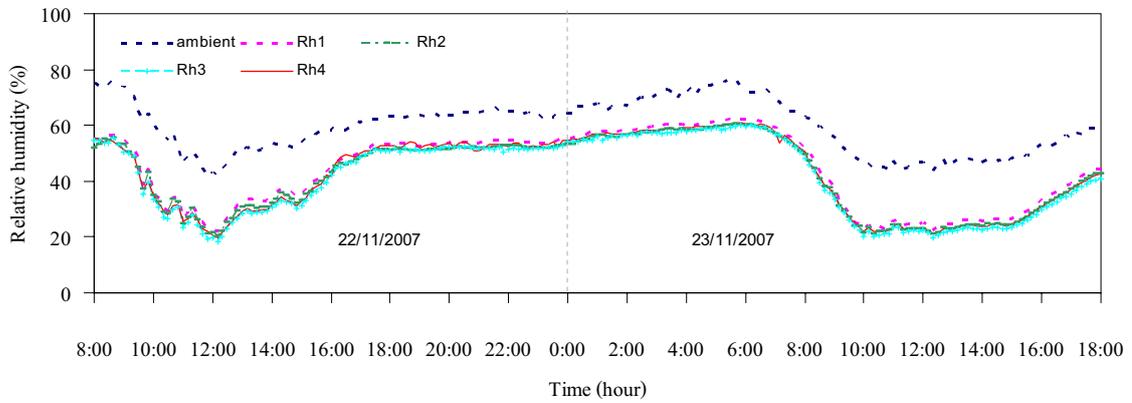
รูปที่ 3.28 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550)



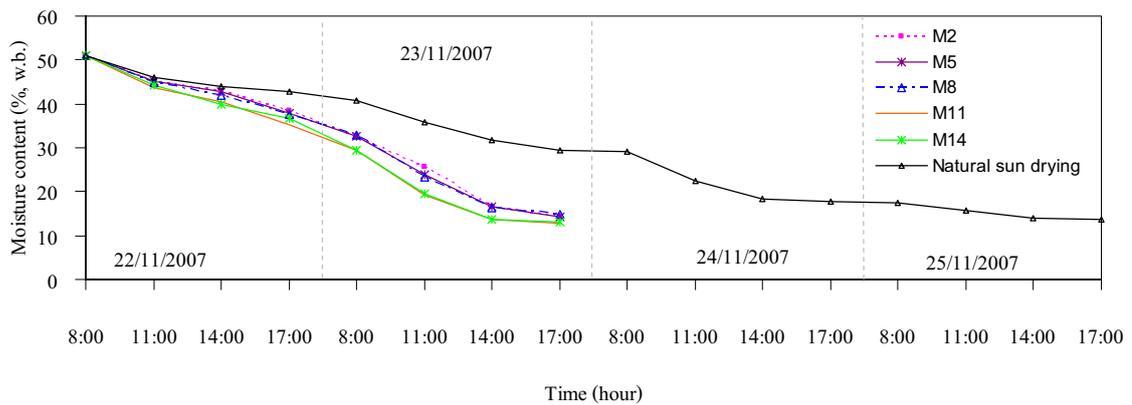
รูปที่ 3.29 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550)



รูปที่ 3.30 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550)



รูปที่ 3.31 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550)



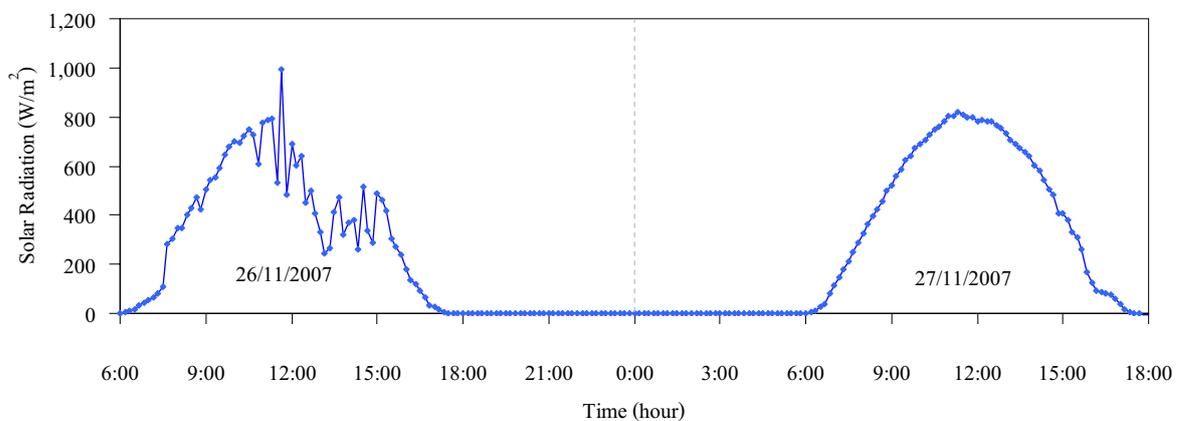
รูปที่ 3.32 การแปรค่าความชื้นระหว่างการอบแห้งระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 2 (22-25 พฤศจิกายน 2550)

ค) การทดลองครั้งที่ 3

การทดลองครั้งที่ 3 ดำเนินการในช่วงวันที่ 26-29 พฤศจิกายน พ.ศ. 2550 โดยใช้กาแฟจำนวน 200 กิโลกรัม ความชื้นของกาแฟอยู่ที่ประมาณ 55 % w.b. โดยระหว่างทำการทดลองนั้นยังเป็นช่วงต้นฤดูหนาว เช่นเดียวกับการทดลอง 2 ครั้งแรก อุณหภูมิต่ำสุด 18°C ในตอนเช้า โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งวันจะอยู่ในช่วง 20 - 30 °C สภาพท้องฟ้าค่อนข้างแจ่มใส ในรูปที่ 3.33 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าถึงค่าสูงสุดในตอนเที่ยงและลดลงอย่าง

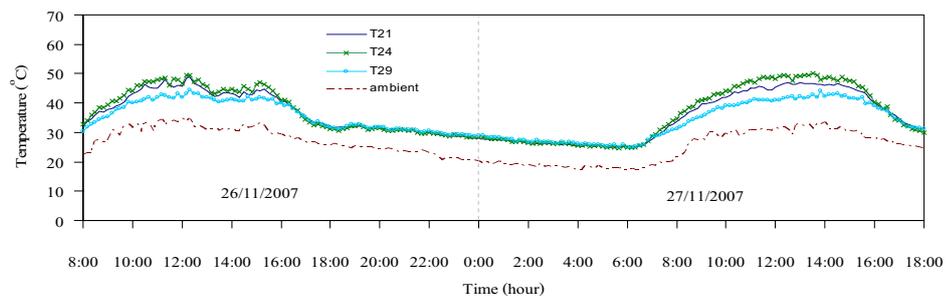
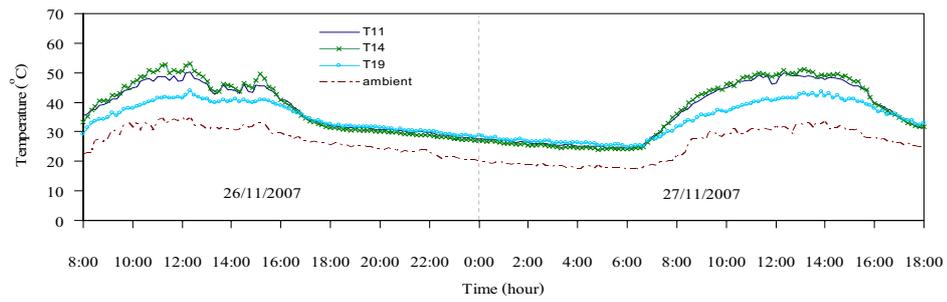
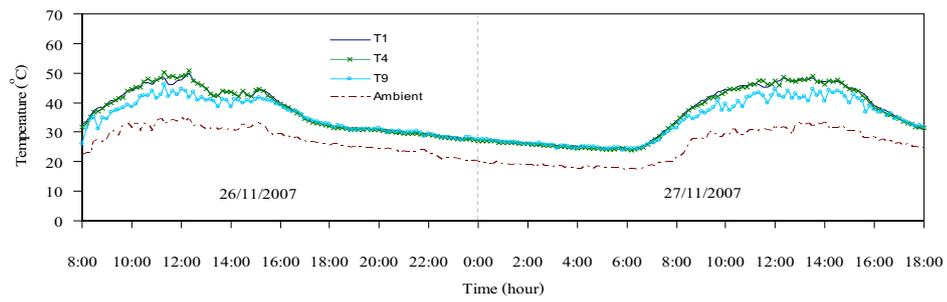
ต่อเนื่องจนถึงช่วงเย็น โดยค่าสูงสุดในตอนเที่ยงมีค่าอยู่ระหว่าง $800 - 1,000 \text{ W/m}^2$ ในด้านของ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่ามีค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าระหว่าง $45 - 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลา 9:00 - 17:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ประมาณ $12 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (ในรูปที่ 3.34 และรูปที่ 3.35) อุณหภูมิดังกล่าวจะช่วยเพิ่มศักยภาพของอากาศ ในการอบแห้ง นอกจากนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของอากาศในช่วงกลางคืนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ทั้งนี้เพราะความร้อนที่สะสมอยู่ในพื้นคอนกรีตของเครื่องอบแห้งถ่ายเทให้กับอากาศภายในเครื่องอบแห้งในช่วงเวลากลางคืนด้วย ซึ่งเป็นผลดีต่อการอบแห้ง เมื่อพิจารณากราฟของ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเห็นว่ามีค่าลดลงจากช่วงเช้าจนถึงค่าต่ำสุดในตอนเที่ยงและเพิ่มขึ้น ในตอนเย็นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.36 เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จะพบว่า อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีศักยภาพในการอบแห้งสูงกว่าอากาศแวดล้อม

การทดลองครั้งนี้พบว่ากาแฟที่ความชื้น 55 % w.b. จะลดลงเหลือ 13 % w.b. ในเวลา 2 วัน เมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ จะต้องใช้เวลา 4 วัน (รูปที่ 3.37)

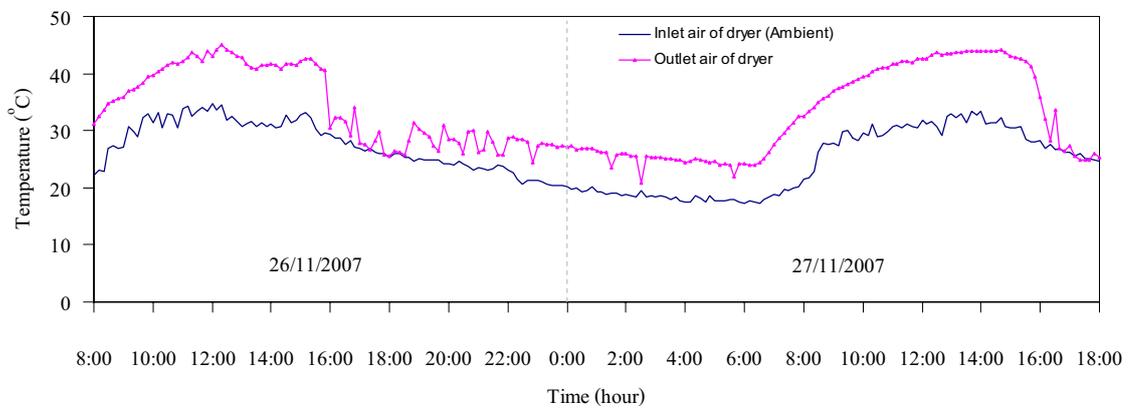


รูปที่ 3.33 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3

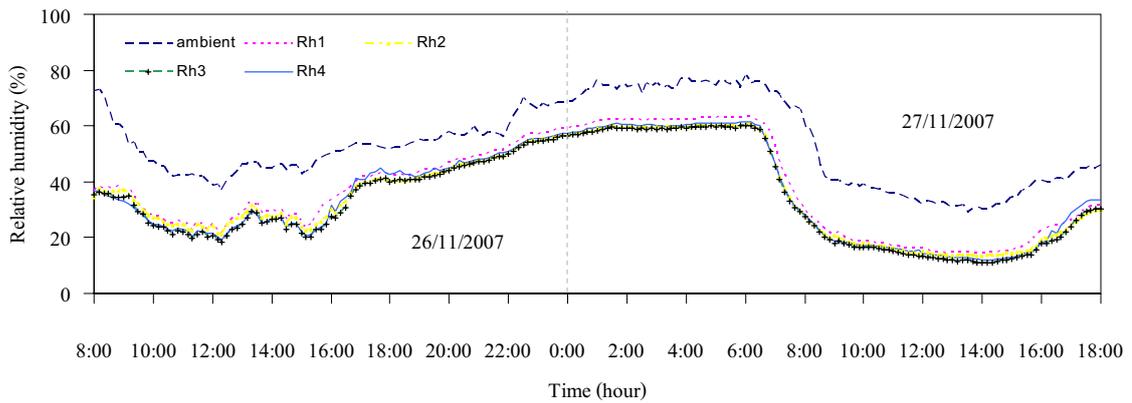
(26-29 พฤศจิกายน 2550)



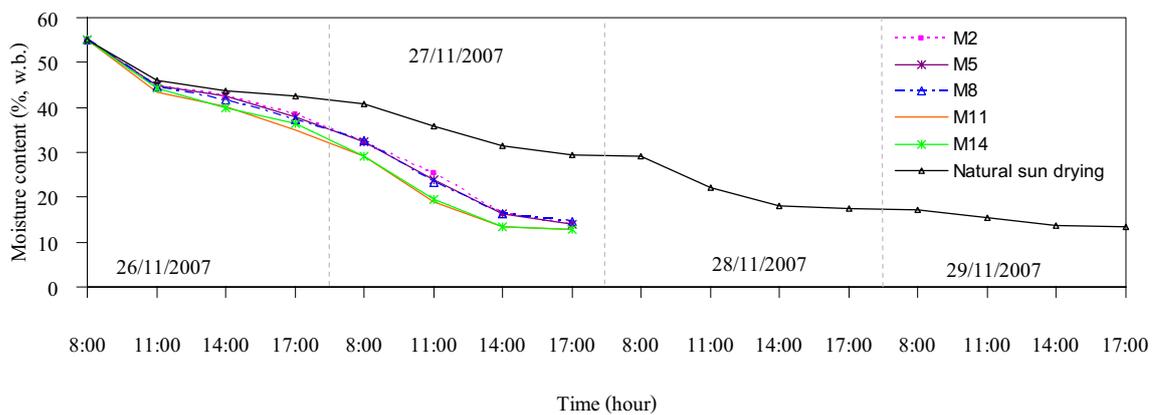
รูปที่ 3.34 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550)



รูปที่ 3.35 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550)



รูปที่ 3.36 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550)

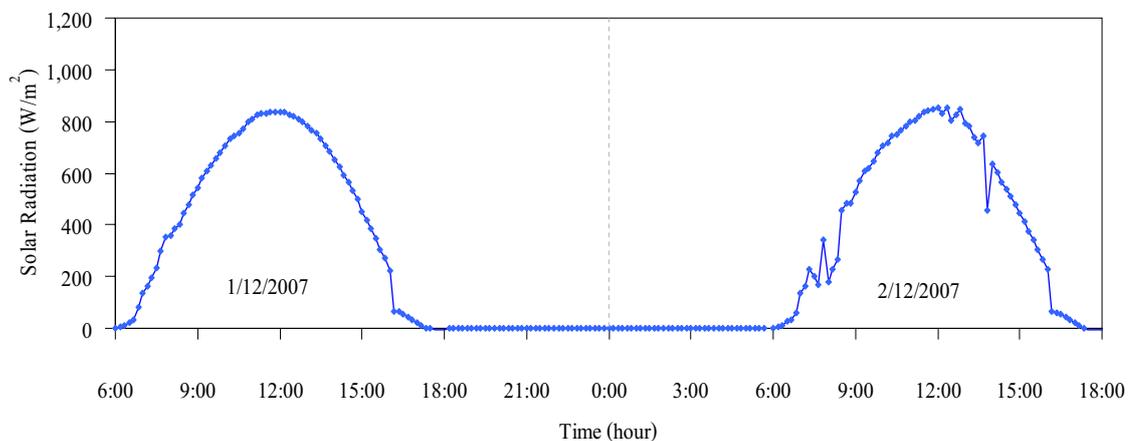


รูปที่ 3.37 การแปรค่าความชื้นระหว่างการอบแห้งระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 3 (26-29 พฤศจิกายน 2550)

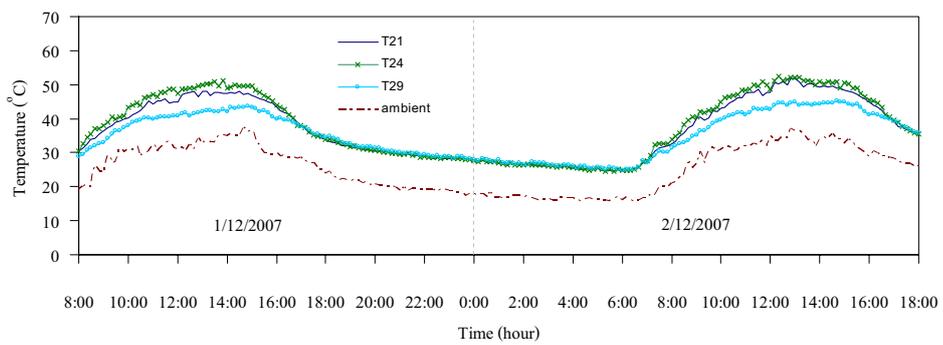
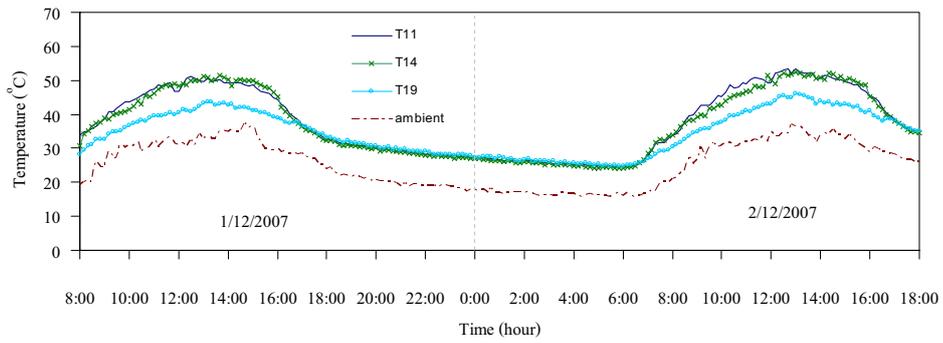
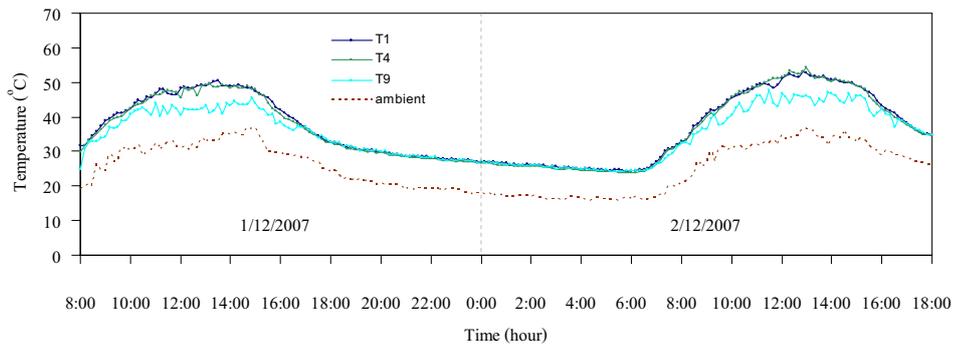
ง) การทดลองครั้งที่ 4

การทดลองครั้งที่ 4 ดำเนินการในช่วงวันที่ 1-4 ธันวาคม พ.ศ. 2550 โดยใช้กาแฟจำนวน 200 กิโลกรัม ความชื้นของกาแฟอยู่ที่ประมาณ 55 % w.b. โดยระหว่างทำการทดลองนั้นยังเป็นช่วงฤดูหนาว อุณหภูมิต่ำสุด 18°C ในตอนเช้า โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งวันจะอยู่ในช่วง $20 - 30^{\circ}\text{C}$ สภาพท้องฟ้าแจ่มใสทั้งสองวัน ดังจะเห็นได้จากการแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์(รูปที่ 3.38) โดยค่าสูงสุดในตอนเที่ยงมีค่าอยู่ระหว่าง $800 - 900 \text{ W/m}^2$ ในด้านของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่ามีค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าระหว่าง $45 - 52^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลา 9:00 - 17:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 12 -

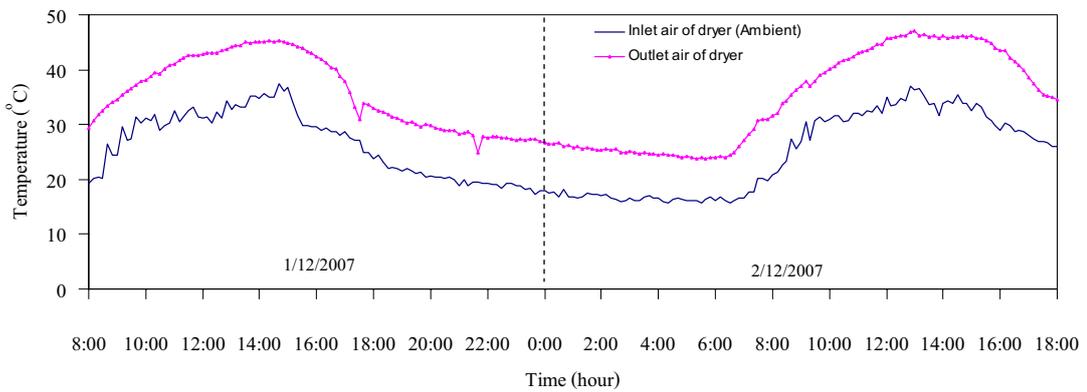
20 °C (รูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.40) อุณหภูมิดังกล่าวจะช่วยเพิ่มศักยภาพของอากาศในการอบแห้ง นอกจากนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของอากาศในช่วงกลางคืนมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ทั้งนี้เพราะความร้อนที่สะสมอยู่ในพื้นคอนกรีตของเครื่องอบแห้งถ่ายเทให้กับอากาศภายในเครื่องอบแห้งในช่วงเวลากลางคืนด้วย ซึ่งเป็นผลดีต่อการอบแห้ง เมื่อพิจารณากราฟของความชื้นสัมพัทธ์อากาศจะเห็นว่ามีการลดลงจากช่วงเช้านถึงค่าต่ำสุดในตอนเที่ยงและเพิ่มขึ้นในตอนเย็นดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.41 เมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม จะพบว่าอากาศภายในเครื่องอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าอากาศแวดล้อม ทำให้อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีศักยภาพในการอบแห้งสูงกว่าอากาศแวดล้อม ในการทดลองครั้งที่ 4 ใช้เวลาในการอบแห้ง 2 วัน(รูปที่ 3.42)



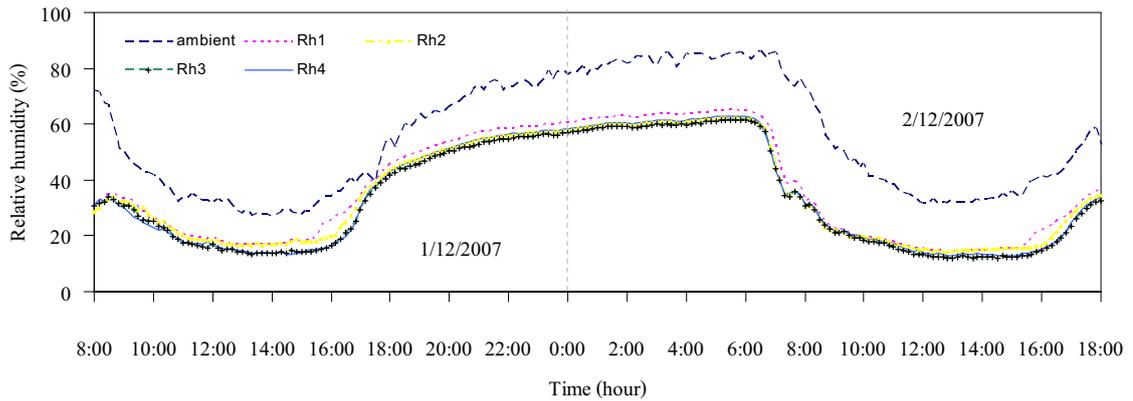
รูปที่ 3.38 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4
(1-4 ธันวาคม 2550)



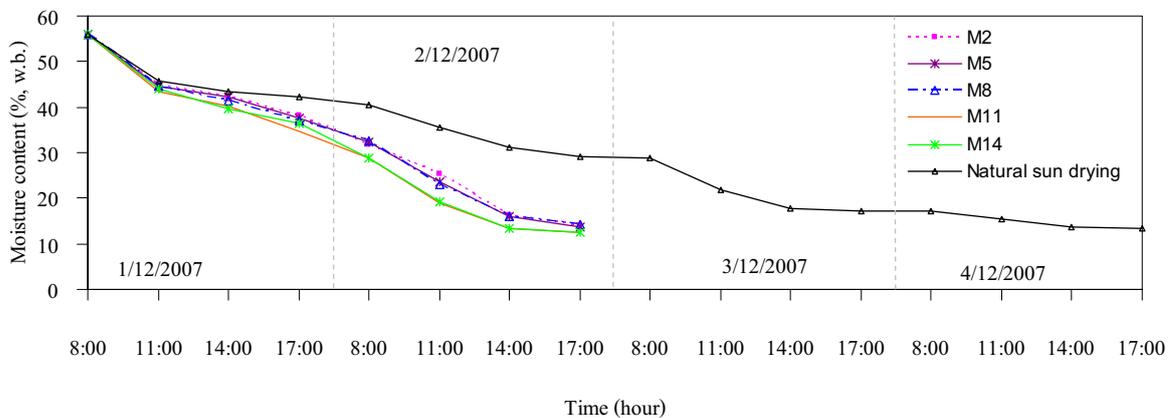
รูปที่ 3.39 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550)



รูปที่ 3.40 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550)



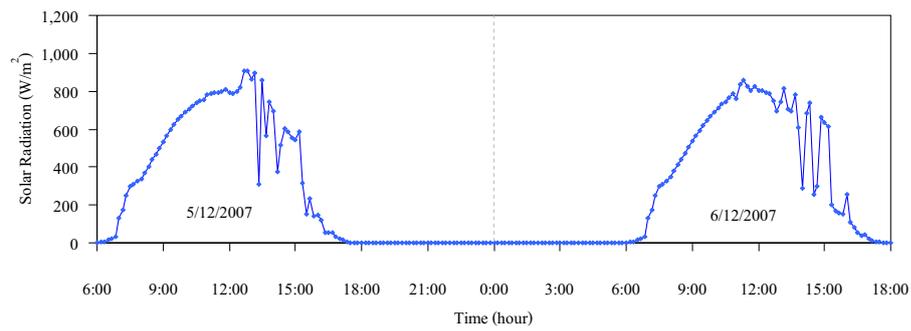
รูปที่ 3.41 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550)



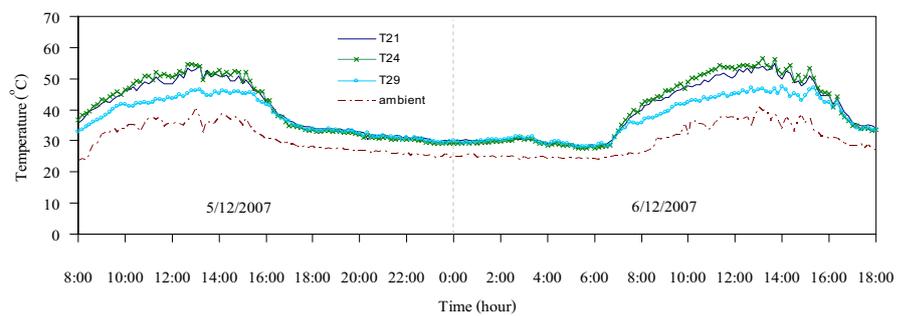
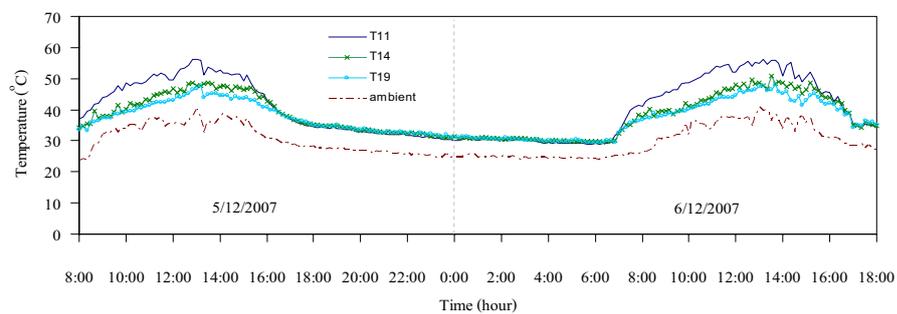
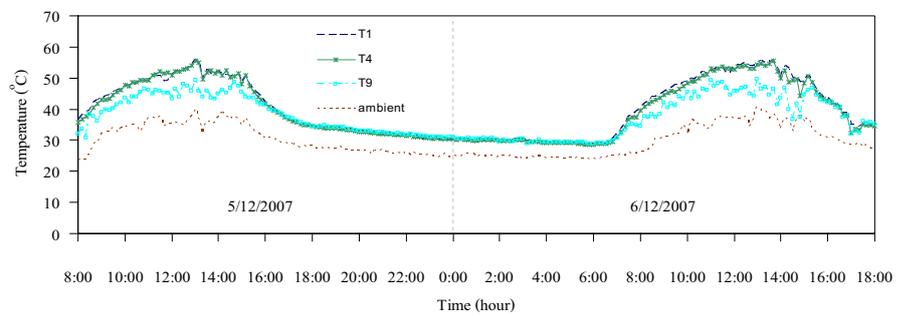
รูปที่ 3.42 การแปรค่าความชื้นระหว่างการอบแห้งระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 4 (1-4 ธันวาคม 2550)

จ) การทดลองครั้งที่ 5

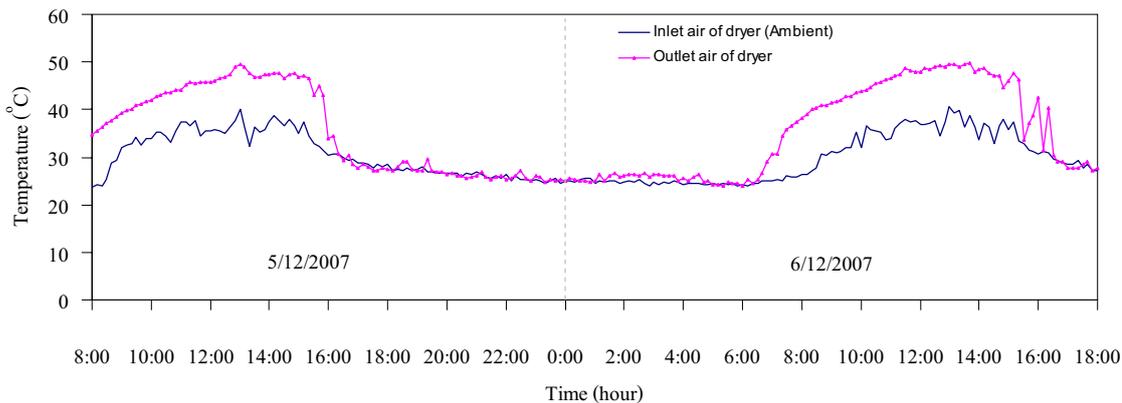
การทดลองครั้งที่ 5 ดำเนินการในช่วงวันที่ 5-8 ธันวาคม พ.ศ. 2550 โดยใช้กาแฟจำนวน 200 กิโลกรัม ความชื้นของกาแฟอยู่ที่ประมาณ 55 % w.b. โดยอุณหภูมิอากาศแวดล้อมตลอดทั้งวัน จะอยู่ในช่วง 20 - 30 °C สภาพท้องฟ้าแจ่มใสมาก ดังจะเห็นได้จากการแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ (รูปที่ 3.43) โดยค่าสูงสุดในตอนเที่ยงมีค่าอยู่ระหว่าง 800 - 900 W/m² ในด้านของอุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้งที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่ามีค่าตามความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าระหว่าง 45 - 54 °C ในช่วงเวลา 9:00 - 17:00 น. ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมประมาณ 12 - 20 °C จากการทดลองครั้งที่ 5 ได้ผลการทดลองคล้ายกับครั้งก่อนๆ คือใช้เวลาในการอบแห้ง 2 วัน



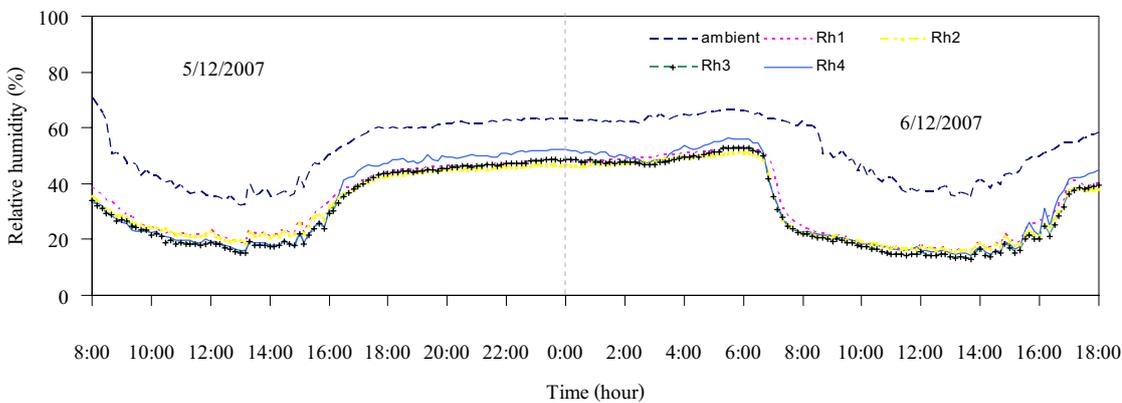
รูปที่ 3.43 การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์ระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550)



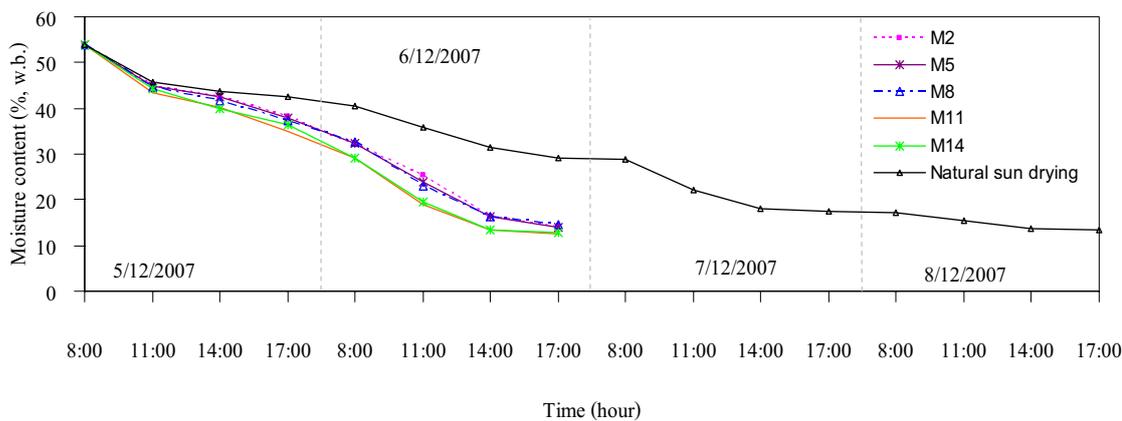
รูปที่ 3.44 การแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550)



รูปที่ 3.45 อุณหภูมิอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบแห้งระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550)



รูปที่ 3.46 การแปรค่าของความชื้นสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งต่างๆระหว่างการทดลองอบกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550)



รูปที่ 3.47 การแปรค่าความชื้นระหว่างกรอบแห้งระหว่างการทดลองอบแห้งกาแฟครั้งที่ 5 (5-8 ธันวาคม 2550)

ในการประเมินสมรรถนะทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์นั้น ผู้วิจัยได้ทำการประเมินค่าวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างดังรายละเอียดต่อไปนี้

- ค่าแผ่น โพลีคาร์บอเนต	86,232 บาท
- ค่าแผงโซลาร์เซลล์และพัดลม	50,406 บาท
- ค่าโครงสร้าง อุปกรณ์ และ ฐานเครื่องอบแห้ง	360,870 บาท
- ค่าแรง	35,000 บาท
รวม	532,508 บาท

ผู้วิจัยจะใช้กล้วยน้ำว้าและกาแฟเป็นผลิตภัณฑ์ในการประเมิน โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถประมาณได้ว่า ในเวลา 1 ปี จะอบแห้งกล้วยได้ประมาณ 9 เดือนต่อปี และอบกาแฟได้ 3 เดือนต่อปี โดยแต่ละเดือนจะทำการอบกล้วยได้จำนวน 4 ครั้ง ดังนั้นในเวลา 9 เดือน จะอบผลิตภัณฑ์ได้ทั้งหมด 36 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะใช้กล้วยน้ำว้าสุก 1,000 กิโลกรัม เมื่ออบแล้วจะได้กล้วยอบแห้ง 375 กิโลกรัม ซึ่งเมื่ออบแห้งครบจำนวน 36 ครั้ง จะได้กล้วยอบแห้งทั้งหมด 13,500 กิโลกรัม ขายกิโลกรัมละ 50 บาท รวมเป็นเงินทั้งหมด 675,000 บาท โดยต้นทุนของกล้วยน้ำว้าสดและค่าแรงงานรวมเป็นจำนวนเงิน 7,000 บาท ในระยะเวลา 9 เดือน จะต้องจ่ายค่าต้นทุนของกล้วยน้ำว้าสดและค่าแรงงานรวมเป็นจำนวนเงิน 252,000 บาท ดังนั้นจะมีรายได้จากการอบกล้วยเป็นเงินสุทธิ 220,500 บาท ส่วนการอบกาแฟจะอบกาแฟได้ประมาณ 3 เดือนต่อปี โดยในแต่ละเดือนจะทำการอบกาแฟได้จำนวน 12 ครั้ง ดังนั้นในเวลา 3 เดือน จะอบผลิตภัณฑ์ได้ทั้งหมด 36 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะใช้กาแฟสด 200 กิโลกรัม เมื่ออบแล้วจะได้กาแฟ 104 กิโลกรัม ซึ่งเมื่ออบแห้งครบจำนวน 36 ครั้ง จะได้กาแฟทั้งหมด 3,744 กิโลกรัม ขายกิโลกรัมละ 150 บาท รวมเป็นเงินทั้งหมด 561,600 บาท โดยต้นทุนของกาแฟสดและค่าแรงงานรวมเป็นเงิน 396,000 บาท ดังนั้นจะมีรายได้จากการอบกาแฟเป็นเงินสุทธิ 165,600 บาท

สูตรแบบจำลองทางเศรษฐศาสตร์ของระบบอบแห้งผลไม้พลังงานแสงอาทิตย์

ค่าของต้นทุนต่างๆของระบบอบแห้ง จะคิดมาจากค่าของต้นทุนจริงที่ใช้เป็นค่าโครงสร้างและค่าติดตั้งระบบอบแห้ง โดยที่ค่าต้นทุนทั้งหมดของระบบจะแบ่งออกเป็น 3 อย่างหลักๆ คือค่าแผงโซลาร์เซลล์ ค่าตัวเครื่องอบแห้ง และค่าแรงงานในการก่อสร้างและติดตั้งเครื่องอบแห้ง โดยค่าต้นทุนทั้งหมดจะจำแนกออกได้เป็นดังนี้

- ค่าแผงโซลาร์เซลล์ 1,247 USD (35 baht)
- ค่าตัวเครื่องอบแห้ง 7,453 USD
- ค่าแรงงาน (ค่าเตรียมโครงสร้างและค่าติดตั้ง) 1,000 USD

โดยที่ค่าต้นทุนเริ่มแรกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (C_T) เขียนเป็นสมการได้
ดังนี้

$$C_T = C_{collector} + C_f = 9,700 \text{ USD}$$

โดยที่ C_f เป็นต้นทุนของเครื่องอบแห้งและค่าแรงงาน(ก่อสร้างและติดตั้ง)

โดยที่ค่ารายจ่ายประจำปีคำนวณจากสมการของ Audsley and Wheeler (1978)

$$C_{\text{annual}} = \left[C_T + \sum_{i=1}^N (C_{\text{main},i} + C_{\text{op},i}) \omega^i \right] \left[\frac{\omega - 1}{\omega(\omega^N - 1)} \right]$$

$$C_{\text{annual}} = \left[9700 + \sum_{i=1}^{15} (97 + 30.30)(1.0338)^i \right] \left[\frac{1.0338 - 1}{1.0338(1.0338^{15} - 1)} \right]$$

$$C_{\text{annual}} = [9700 + 2517] \left[\frac{1.0338 - 1}{1.0338(1.0338^{15} - 1)} \right]$$

$$C_{\text{annual}} = [12217][0.05058] = 617.94 \text{ USD/ year}$$

โดยที่ C_{annual} เป็นค่ารายจ่ายประจำปีของระบบ $C_{\text{main},i}$ เป็นค่าบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง

$C_{\text{op},i}$ เป็นค่าใช้จ่ายในการอบผลิตภัณฑ์ต่อ 1 ปี โดยที่ค่า ω เป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราดอกเบี้ยกับ

ค่าอัตราเงินเฟ้อ หาได้จากสมการ

$$\omega = (100 + i_{\text{in}}) / (100 + i_r)$$

$$\omega = (100 + 7) / (100 + 3.5) = 1.0338$$

โดยที่ค่า i_{in} เป็นค่าอัตราดอกเบี้ย และค่า i_r เป็นค่าอัตราเงินเฟ้อ และทั่วไปค่า $C_{\text{main},i}$ จะประมาณเป็น

1 % ของค่าเงินต้นทุนที่ใช้ ส่วนค่าของ $C_{op,i}$ จะได้มาจากค่าต้นทุนของแก๊สที่ใช้ไป (C_{gas}), ค่าไฟฟ้าที่ใช้ไป ($C_{electric}$) และค่าแรงงานที่ต้องจ่ายในกระบวนการอบแห้ง ($C_{labor,op}$) โดยค่าของ $C_{op,i}$ จะหาได้ดังนี้

$$C_{op} = C_{gas} + C_{electric} + C_{labor,op}$$

โดยที่ค่ารายจ่ายประจำปีที่ใช้ไปต่อมวลแห้งของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่อบได้ จะเรียกว่า ค่าอบแห้งต่อ 1 กิโลกรัม (drying cost, Z) โดยที่ค่า Z จะหาได้ดังนี้

$$Z = \frac{C_{annual}}{M_{dry\ product}} = \frac{617.94}{17244} = 0.04 \text{ USD/kg}$$

โดยที่ $M_{dry\ product}$ คือผลิตภัณฑ์แห้งทั้งหมดที่ได้จากระบบอบแห้ง.

ใน 1 ปี อบกล้วยจำนวน 36 ครั้ง และอบกาแฟ 36 ครั้ง รวมเป็น 72 ครั้ง

อบกล้วย 36 ครั้ง ใช้กล้วยสด 36,000 กิโลกรัม เป็นเงิน 252,000 บาท

อบกาแฟ 36 ครั้ง ใช้กาแฟสด 7,200 กิโลกรัม เป็นเงิน 396,000 บาท

ค่าอบต่อกิโลกรัม 1.4 บาท ดังนั้นใน 1 ปี เสียค่าอบ

อบกล้วย $1.4 \times 36,000 = 50,400$ บาท

อบกาแฟ $1.4 \times 7,200 = 10,080$ บาท

รวมใน 1 ปี เสียค่าใช้จ่ายการอบแห้งกล้วยและกาแฟเท่ากับ 60,480 บาท

รายได้จากการอบกล้วย ใน 1 ปี คือ 675,000 บาท

และรายได้จากการอบกาแฟ 1 ปี คือ 561,600 บาท

รวมใน 1 ปี มีรายได้จากการอบแห้งกล้วยและกาแฟเท่ากับ 1,236,600 บาท

ดังนั้นใน 1 ปี จะได้กำไรสุทธิเท่ากับ 325,620 บาท

ดังนั้นจะคุ้มทุนภายใน $532,508/325,620 = 1$ ปี 6 เดือน

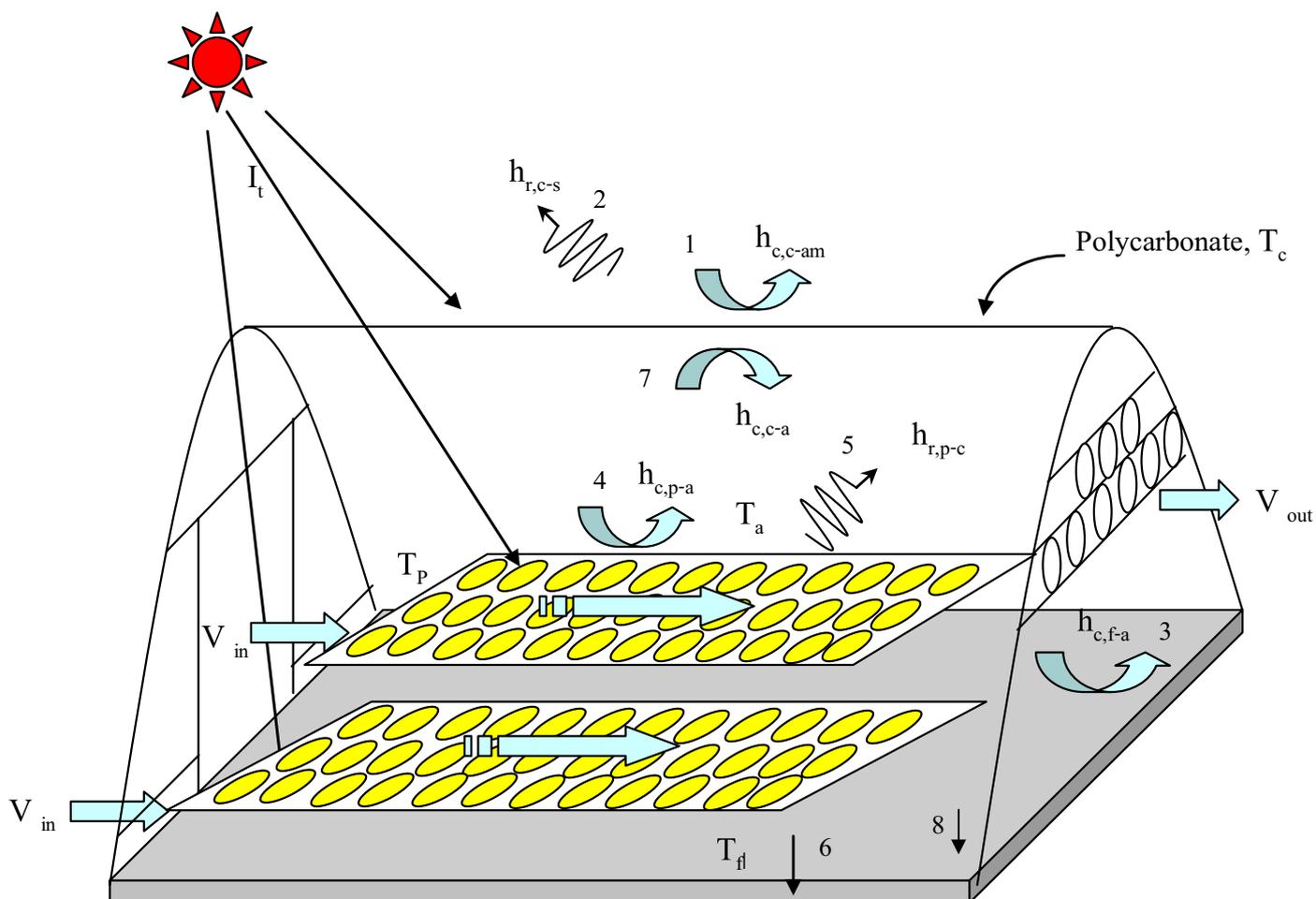
บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองเครื่องอบแห้ง

เนื่องจากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ต้องใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในรูปของความร้อนเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง ดังนั้นสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าวจึงขึ้นกับความเข้มรังสีอาทิตย์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา ในการทำนายสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในสภาวะต่างๆ ที่ละเอียดถูกต้อง จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งดังกล่าว ดังรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์สามารถแสดงได้ตามแผนภูมิในรูปที่ 4.1 จากนั้นผู้วิจัยจะเขียนสมการสมดุลทางความร้อน (heat balance) ขององค์ประกอบแต่ละส่วน โดยจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของแต่ละองค์ประกอบซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการส่งผ่านความร้อนที่องค์ประกอบนั้นได้รับหรือเสียไป ในแบบจำลองนี้จะตั้งสมมติฐานว่าผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้งครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของพื้นเครื่องอบแห้งจึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 การส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องอบแห้ง 1) การพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังอากาศแวดล้อม 2) การแผ่รังสีจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังท้องฟ้า 3) การพาความร้อนจากพื้นไปยังอากาศภายในเครื่องอบ 4) การพาความร้อนจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศภายในเครื่องอบ 5) การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังแผ่นโพลีคาร์บอเนต 6) การนำความร้อนจากพื้นไปยังแวดล้อม 7) การพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังอากาศภายในเครื่องอบ 8) การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้น

1) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

เอนทาลปีของแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

- = ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศภายในเครื่องอบ
- + ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังท้องฟ้า
- + ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อน โดยลมระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม
- + ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนจากผลิตภัณฑ์ไปยังแผ่นโพลีคาร์บอเนต
- + รังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนโดยแผ่นโพลีคาร์บอเนต

แทนค่าแต่ละเทอมจะได้สมการต่อไปนี้

$$m_c C_{pc} \frac{dT_c}{dt} = A_c h_{c,c-a} (T_a - T_c) + A_c h_{r,c-s} (T_s - T_c) + A_c h_w (T_{am} - T_c) + A_p h_{r,p-c} (T_p - T_c) + A_c \alpha_c I_t \quad (4.1)$$

เมื่อ	A_c	คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [m ²]
	A_p	คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์, [m ²]
	c_{pc}	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [J/kg-°C]
	$h_{c,c-a}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
	$h_{r,c-s}$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังท้องฟ้า, [W/m ² -K]
	$h_{r,p-c}$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [W/m ² -K]
	h_w	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม โดยลม, [W/m ² -K]
	I_t	คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์, [W/m ²]
	m_c	คือ มวลของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [kg]
	t	คือ เวลา, [s]
	T_a	คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, [K]
	T_{am}	คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, [K]
	T_c	คือ อุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [K]
	T_s	คือ อุณหภูมิท้องฟ้า, [K]
	T_p	คือ อุณหภูมิผลิตภัณฑ์, [K]
	α_c	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [decimal]

2) สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

เอนทาลปีของอากาศที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

- = ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศ
- + ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นกับอากาศ
- + ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์
- + ผลต่างของค่าเอนทาลปีเนื่องจากอากาศไหลเข้าและออกจากเครื่องอบ
- + การสูญเสียความร้อนของอากาศของเครื่องอบแห้งไปยังอากาศแวดล้อม
- + รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน โดยอากาศและผลิตภัณฑ์

เนื่องจากอากาศมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำ จึงไม่เกิดการสะสมความร้อนของอากาศดังนั้นจึงเขียนสมการสมดุลพลังงานของอากาศได้ดังนี้

$$m_a C_{pa} \frac{dT_a}{dt} = A_p h_{c,p-a} (T_p - T_a) + A_f h_{c,f-a} (T_f - T_a) + D_p A_p C_{pv} \rho_p (T_p - T_a) \frac{dM_p}{dt} \quad (4.2)$$

$$+ (\rho_a V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_a V_{in} C_{pa} T_{in}) + U_c A_c (T_{am} - T_a) + [(1 - F_p)(1 - \alpha_f) + (1 - \alpha_p) F_p] I_t A_c \tau_c$$

เมื่อ	A_c	คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [m ²]
	A_f	คือ พื้นที่ของพื้น, [m ²]
	A_p	คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์, [m ²]
	C_{pa}	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศในผลิตภัณฑ์, [J/kg-°C]
	C_{pv}	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของของเหลวในผลิตภัณฑ์, [J/kg-°C]
	D_p	คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์, [m]
	F_p	คือ สัดส่วนการรับพลังงานรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]
	$h_{c,f-a}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นกับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
	$h_{c,p-a}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
	I_t	คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ, [W/m ²]
	m_a	คือ มวลของอากาศแห้งในเครื่องอบแห้ง, [kg]
	M_p	คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์, [d.b.]

t	คือ เวลา, [s]
T_a	คือ อุณหภูมิอากาศรอบข้าง, [K]
T_f	คือ อุณหภูมิของพื้น, [K]
T_{in}	คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้า, [K]
T_p	คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์, [K]
T_w	คือ อุณหภูมิของน้ำ, [K]
V_{in}	คือ ความเร็วลมไหลเข้าเครื่องอบแห้ง, [m/s]
V_{out}	คือ ความเร็วลมไหลออกจากเครื่องอบแห้ง, [m/s]
U_c	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [W/m ² -°C]
ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้ง, [kg/m ³]
ρ_p	คือ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, [kg/m ³]
α_n	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต, [decimal]
α_p	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]
τ_c	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของ โพลีคาร์บอเนต, [decimal]

3) สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์

สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์ สามารถเขียนได้เป็น

เอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา Δt

$$\begin{aligned}
 &= \text{ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีจากแผ่น โพลีคาร์บอเนตไปยังผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน โดยผลิตภัณฑ์}
 \end{aligned}$$

แทนค่าแต่ละเทอมจะได้สมการดังนี้

$$m_p (C_{pp} + C_{pl} M_p) \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{c,p-a} (T_a - T_p) + A_p h_{r,p-c} (T_c - T_p) + D_p A_p \rho_p [L_p + (C_{pv} - C_{pl}) T_p] \frac{dM_p}{dt} + F_p \alpha_p I_t A_c \tau_c \quad (4.3)$$

เมื่อ	A_c	คือ พื้นที่ของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [m ²]
	A_p	คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [m ²]
	C_{pp}	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศภายในเครื่องอบ, [J/kg-K]
	C_{pl}	คือ ความร้อนจำเพาะของของเหลวในผลิตภัณฑ์, [J/kg-K]
	C_{pv}	คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในผลิตภัณฑ์, [J/kg-K]
	D_p	คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์, [m]
	F_p	คือ สัดส่วนการรับพลังงานรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]
	$h_{c,p-a}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศอบแห้ง, [W/m ² -K]
	$h_{r,p-c}$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [W/m ² -K]
	I_t	คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เวลาใดๆ, [W/m ²]
	L_p	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำในผลิตภัณฑ์, [J/kg]
	M_p	คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [decimal, db]
	m_p	คือ มวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [kg]
	t	คือ เวลา, [s]
	T_a	คือ อุณหภูมิอากาศภายในเครื่องอบแห้ง, [K]
	T_c	คือ อุณหภูมิของโพลีคาร์บอเนต, [K]
	T_p	คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [K]
	ρ_p	คือ ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของผลิตภัณฑ์, [kg/m ²]
	τ_c	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [decimal]
	α_p	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]

4) สมการสมดุลพลังงานของพื้น

สมการสมดุลพลังงานของพื้นเขียนได้ดังนี้

เอนทาลปีของพื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา Δt

$$= \text{การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับพื้นคอนกรีต} \\ + \text{การสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนจากพื้นคอนกรีตไปยังพื้นดิน}$$

เขียนสมการได้เป็น

$$m_{\text{f}} C_{\text{pf}} \frac{dT_{\text{f}}}{dt} = A_{\text{f}} h_{\text{c,a-f}} (T_{\text{a}} - T_{\text{f}}) + A_{\text{f}} U_{\text{f}} (T_{\text{g}} - T_{\text{f}}) \quad (4.9)$$

เมื่อ	A_{f}	คือ พื้นที่ของพื้น, $[\text{m}^2]$
	C_{pf}	คือ ความร้อนจำเพาะของพื้นคอนกรีต, $[\text{J/kg-K}]$
	$h_{\text{c,a-f}}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศกับพื้นคอนกรีต, $[\text{W/m}^2\text{-K}]$
	U_{f}	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของพื้นคอนกรีตไปยังพื้นดิน, $[\text{W/m}^2\text{-K}]$
	m_{f}	คือ มวลของพื้นคอนกรีต, $[\text{kg}]$
	t	คือ เวลา, $[\text{s}]$
	T_{a}	คือ อุณหภูมิของอากาศ, $[\text{K}]$
	T_{f}	คือ อุณหภูมิของพื้นคอนกรีต, $[\text{K}]$
	T_{g}	คือ อุณหภูมิพื้นดิน, $[\text{K}]$

5) สมการสมดุลมวลของอากาศ

เมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงจะทำให้ความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\rho_a V \frac{dH}{dt} = A_{in} \rho_a H_{in} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out} v_{out} + D_p A_p \rho_p \frac{dM_p}{dt} \quad (4.4)$$

เมื่อ	A_{in}	คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศขาเข้า, [m ²]
	A_p	คือ พื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [m ²]
	A_{out}	คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศขาออก, [m ²]
	D_p	คือ ความหนาของผลิตภัณฑ์, [m]
	H	คือ อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศอบแห้ง, [kg/kg]
	H_{in}	คือ อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศขาเข้า, [kg/kg]
	H_{out}	คือ อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ของอากาศขาออก, [kg/kg]
	M_p	คือ ความชื้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, d.b.]
	t	คือ เวลา, [s]
	V	คือ ปริมาตรของเครื่องอบแห้ง, [m ³]
	v_{in}	คือ ความเร็วลมขาเข้า, [m/s]
	v_{out}	คือ ความเร็วลมขาออก, [m/s]
	ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศ, [kg/m ³]
	ρ_p	คือ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, [kg/m ³]

6) สมการออบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สมการออบแห้งชั้นบาง ซึ่งพัฒนาโดย Page สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = A \exp(-Bt) \quad (4.5)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, d.b.]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, d.b.]

โดย A และ B เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแห้ง ซึ่งหาได้จากการทดลองด้วยเครื่องอบแห้งระดับห้องทดลองที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยได้สมการดังนี้

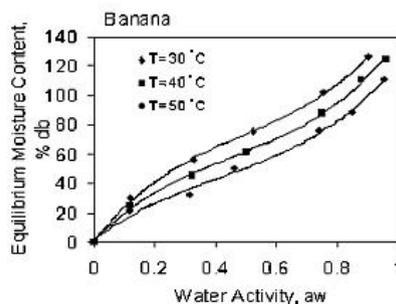
$$A = 1.503574 - 0.013267 T_a - 0.505455rh + 0.000094 T_a^2$$

$$B = 0.1814 - 0.006347 T_a + 0.193rh + 0.000081 T_a^2$$

เมื่อ T_a คือ อุณหภูมิอากาศ, [K]

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์, [decimal]

จากการทดลองหาความชื้นสมดุลของกล้วย (เสริม จันทร์ฉาย, 2544) ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน แสดงผลการทดลองทั้งหมดในกราฟซอฟต์แวร์ไอโซเทอมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความชื้นสมดุลของกล้วยที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟจะเห็นชัดเจนว่า เส้นความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิสูงจะต่ำกว่าเส้นความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่ำ และในแต่ละเส้นจะมีค่าความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์

ในการนำไปใช้งานในแบบจำลองจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์จากกราฟดังกล่าวในรูปของแบบจำลอง 3 ตัวแปร ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกแบบจำลองเอมไพริคัล (empirical) หาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยแบบจำลองดังกล่าวเขียนได้ดังสมการ

$$M_c = 74.66023 + 1.144253T + 37.07224a_w + 0.001166T^2 + 51.55374a_w^2 \quad (4.6)$$

เมื่อ	M_c	คือ ความชื้นสมดุลของกล้วย, [%, d.b.]
	a_w	คือ water activity ($a_w = Rh/100$)
	T	คือ อุณหภูมิอากาศ, [°C]

ในกรณีของสมการอบแห้งชั้นบางของกาแฟ หาได้จากสมการของงานวิจัยของ Berbert et al. (1995) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{M - M_c}{M_0 - M_c} = \exp\left[-105.756t^{0.60564}e^{-2751.51/T}\right] \quad (4.7)$$

เมื่อ	M_c	คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, d.b.]
	M_0	คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, d.b.]
	t	คือ เวลา, [hour]

และสมการสมดุลความชื้นเขียนได้ดังนี้

$$M_c = 1.1281[-\ln(1-rh)/(T+40.535)]^{0.5405} \quad (4.8)$$

เมื่อ	M_c	คือ ความชื้นสมดุลของกาแฟ, [%, d.b.]
	rh	คือ ความชื้นสัมพัทธ์, [decimal]

4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

4.2.1) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังท้องฟ้า ($h_{r,p-s}$) หาได้จากสมการ

$$h_{r,p-s} = \epsilon_p \sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c) \quad (4.10)$$

โดยที่อุณหภูมิท้องฟ้าสามารถหาได้จาก $T_s = 0.552 T_a^{1.5}$

4.2.2) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่น โพลีคาร์บอเนตไปยังอากาศแวดล้อมเนื่องจากลม (h_w) ใช้แบบจำลองของ Duffie and Beckman (1991) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$h_{c,c-am} = h_w = 5.7 + 3.8 V_w \quad (4.11)$$

เมื่อ V_w คือ ความเร็วลม, [m/s]

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในห้องอบกับพื้นและระหว่างอากาศในห้องอบกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตจะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.12 โดยถือว่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน

$$h_{c,f-a} = h_{c,c-a} = h_{c,p-a} = h_c = \frac{Nu k}{D_h} \quad (4.12)$$

เมื่อ h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, [W/m²-K]

Nu คือ ค่า Nusselt number

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ, [W/m-K]

D_h คือ ค่า hydraulic diameter, [m] ซึ่งหาได้จาก

$$D_h = \frac{4WD}{2(W+D)} \quad (4.13)$$

- เมื่อ W คือ ความกว้างของห้องอบ, [m]
 D คือ ระยะเฉลี่ยระหว่างพื้นกับแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [m]

โดย Nu จะหาได้จากสมการของ Kays and Crawford (1980) ดังสมการ

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad (4.14)$$

- เมื่อ Re คือ ค่า Reynolds number ซึ่งหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{D_h V \rho}{\nu} \quad (4.15)$$

- เมื่อ V คือ อัตราเร็วของอากาศภายในห้องอบ, [m/s]
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ, [kg/m³]
 ν คือ viscosity ของอากาศ, [m²/s]

4.2.3) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (U_c) จะหาได้จากสมการ

$$U_c = \frac{k_c}{L_c} \quad (4.16)$$

- เมื่อ k_c คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของพื้น, [W/m-K]
 L_c คือ ความหนาของโพลีคาร์บอเนต, [m]

4.3 การหา solution ของสมการแบบจำลอง

เนื่องจากสมการสมดุลพลังงานและสมการสมดุลมวลเป็นระบบสมการอนุพันธ์ซึ่งแก้สมการโดยวิธีวิเคราะห์ (analytical solution) ซึ่งทำได้ยาก ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการแก้ระบบสมการดังกล่าวโดยวิธี finite difference method โดยจะเขียนสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการ finite difference จากสมการที่ (4.1)- (4.4) จะได้สมการที่เขียนในรูป finite difference ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} m_c C_{pc} \frac{(T_{c,t+\Delta t} - T_{c,t})}{\Delta t} &= A_c h_{c,c-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{s,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-s} (T_{s,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) \\ &+ A_c h_w (T_{am,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_p h_{r,p-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) \\ &+ A_c \alpha_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} m_c C_{pc} \frac{(T_{a,t+\Delta t} - T_{a,t})}{\Delta t} &= A_p h_{c,p-a} (T_{p,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + A_f h_{c,f-a} (T_{f,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \\ &+ A_p D_p C_{pv} \rho_p (T_{p,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \left[\frac{M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t}}{\Delta t} \right] \\ &+ (\rho_a V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_a V_{in} C_{pa} T_{in}) + U_c A_c (T_{am,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \\ &+ [(1 - F_p)(1 - \alpha_{fl}) + (1 - \alpha_{fl})F_p] A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} m_c (C_{pp} + C_{pl} M_p) \frac{(T_{p,t+\Delta t} - T_{p,t})}{\Delta t} &= A_p h_{c,p-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) + A_p h_{r,p-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) \\ &+ A_p D_p \rho_p [L_p + (C_{pv} - C_{pl})T_{p,t+\Delta t}] \frac{M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t}}{\Delta t} \\ &+ F_p \alpha_p A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$m_{fl} C_{pfl} \frac{(T_{fl,t+\Delta t} - T_{fl,t})}{\Delta t} = A_{fl} h_{c,a-fl} (T_{a,t+\Delta t} - T_{fl,t+\Delta t}) + A_{fl} h_{c,\Pi-g} (T_{g,t+\Delta t} - T_{fl,t+\Delta t}) \quad (4.20)$$

$$\rho_a V \frac{(H_{t+\Delta t} - H_t)}{\Delta t} = A_{in} \rho_a H_{in,t+\Delta t} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out,t+\Delta t} v_{out,t+\Delta t} + D_p A_p \rho_p \frac{(M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t})}{\Delta t} \quad (4.21)$$

$$M_{t+\Delta t} = M_{e,t+\Delta t} + (M_o - M_{e,t+\Delta t}) A_{t+\Delta t} e^{-B_{t+\Delta t}(t+\Delta t)} \quad (4.22)$$

จากสมการที่ 4.17 – 4.22 เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m_c C_{pc}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_c h_{r,c-s} + A_c h_w - A_p h_{r,p-c} \right] T_{c,t+\Delta t} - A_c h_{c,c-a} T_{a,t+\Delta t} + A_p h_{r,p-c} T_{p,t+\Delta t} \\ & = \frac{m_c C_{pc} T_{c,t}}{\Delta t} + A_c h_{r,c-s} T_{s,t+\Delta t} + A_c h_w T_{am,t+\Delta t} + A_c \alpha_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m_c C_{pc}}{\Delta t} + A_p h_{c,p-a} + A_{fl} h_{c,fl-a} + A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t+\Delta t}}{\Delta t} - A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t}}{\Delta t} + U_c A_c \right] T_{a,t+\Delta t} \\ & - \left[A_p h_{c,p-a} + A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t+\Delta t}}{\Delta t} - A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t}}{\Delta t} \right] T_{p,t+\Delta t} - A_{fl} h_{c,fl-a} T_{fl,t+\Delta t} \\ & = \frac{m_c C_{pc} T_{a,t}}{\Delta t} + (\rho_a V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_a V_{in} C_{pa} T_{in}) + U_c A_c T_{am,t+\Delta t} \\ & + [(1 - F_p)(1 - \alpha_f) + (1 - \alpha_f) F_p] A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m_c (C_{pp} + C_{pl} M_p)}{\Delta t} + A_p h_{c,p-a} + A_p h_{r,p-c} - [A_p D_p \rho_p [L_p + (C_{pv} - C_{pl})] \frac{M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t}}{\Delta t} \right] T_{p,t+\Delta t} \\ & - A_p h_{c,p-a} T_{a,t+\Delta t} - A_p h_{r,p-c} T_{c,t+\Delta t} = F_p \alpha_p A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\left[\frac{m_{fl} C_{pfl}}{\Delta t} + A_{fl} h_{c,a-fl} + A_{fl} h_{c,fl-g} \right] T_{fl,t+\Delta t} - A_{fl} h_{c,a-fl} T_{a,t+\Delta t} - A_{fl} h_{c,fl-g} T_{g,t+\Delta t} = \frac{m_{fl} C_{pfl} T_{f,t}}{\Delta t} \quad (4.26)$$

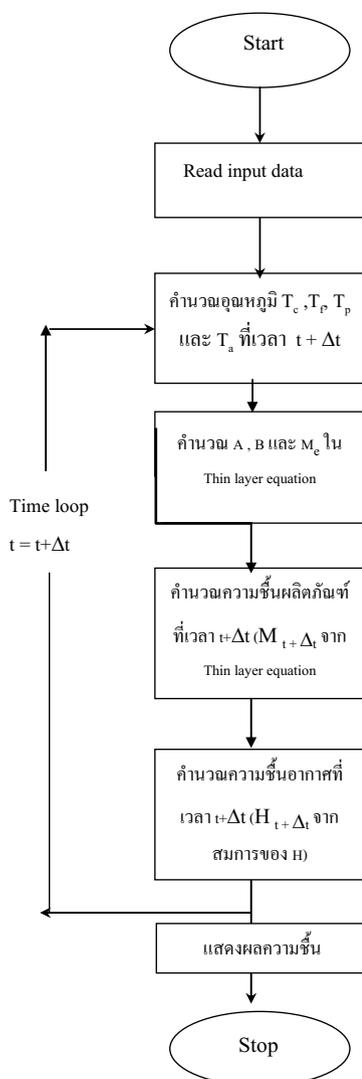
$$\frac{\rho_a V H_{t+\Delta t}}{\Delta t} - \frac{D_p A_p \rho_p M_{p,t+\Delta t}}{\Delta t} = A_{in} \rho_a H_{in,t+\Delta t} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out} v_{out,t+\Delta t} + \frac{D_p A_p \rho_p M_{p,t}}{\Delta t} \quad (4.27)$$

$$M_{t+\Delta t} = M_{e,t} + (M_o - M_{e,t}) A_t e^{-B_t (\Delta t)} \quad (4.28)$$

ในลำดับแรกจะทำการคำนวณอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต(T_p) อากาศ(T_a) ผลิตภัณฑ์ (T_p) และพื้น(T_{fl}) ที่เวลา $t + \Delta t$ โดยใช้สมการที่ (4.23) – (4.26) ตามลำดับ ลำดับต่อมาจะคำนวณค่าอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เวลา $t + \Delta t$ ซึ่งได้จากขั้นตอนแรกและนำมาทำการคำนวณ

พารามิเตอร์ของสมการออบแห้งชั้นบาง (A , B และ M_c) จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแทนค่าในสมการออบแห้งชั้นบาง (4.28) เพื่อคำนวณหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลา $t + \Delta t$ ($M_{t+\Delta t}$) และใช้ค่าดังกล่าวไปคำนวณความชื้นของอากาศที่เวลา $t + \Delta t$ ($H_{t+\Delta t}$) จากสมการ(4.27)ลำดับสุดท้ายจะกลับขึ้นไปคำนวณอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (T_c) อากาศ (T_a) ผลิตภัณฑ์ (T_p) และพื้น (T_f) ที่เวลา $t + \Delta t$ และดำเนินการซ้ำกระบวนการเดิมจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามต้องการ

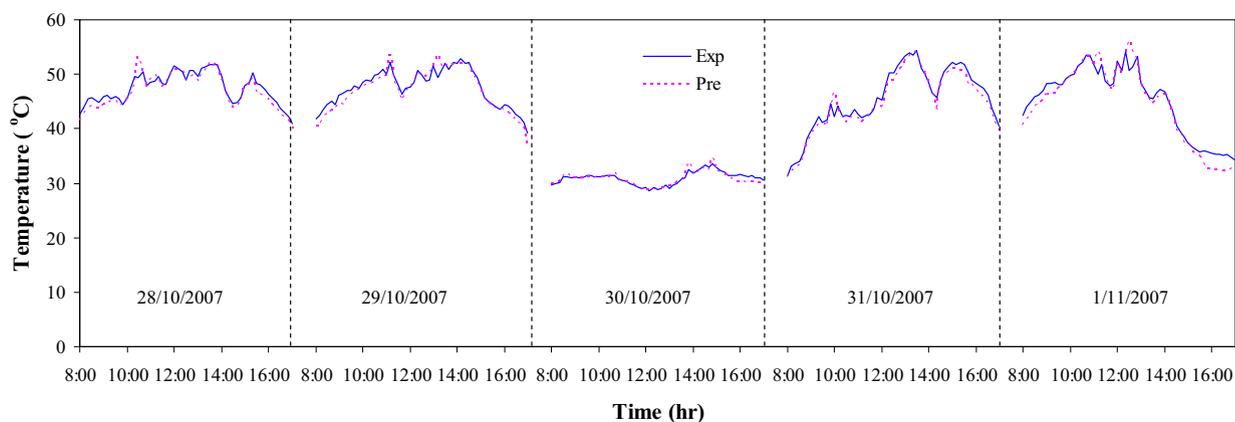
เนื่องจากการคำนวณจะต้องทำซ้ำกระบวนการเดิมทุกช่วงเวลา Δt ดังนั้นผู้วิจัยจึงเขียนโปรแกรมเป็นภาษา fortran เพื่อทำการคำนวณ โดยมีขั้นตอนตามแผนภูมิในรูปที่ 4.3



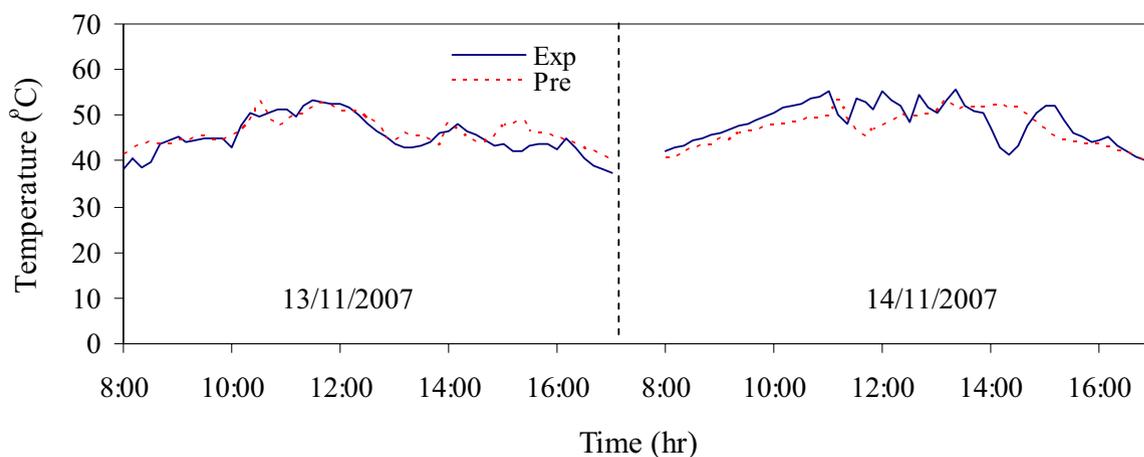
รูปที่ 4.3 แผนภูมิสำหรับคำนวณอุณหภูมิ ความชื้น และตัวแปรในเครื่องอบแห้ง

4.4 การทดสอบแบบจำลอง

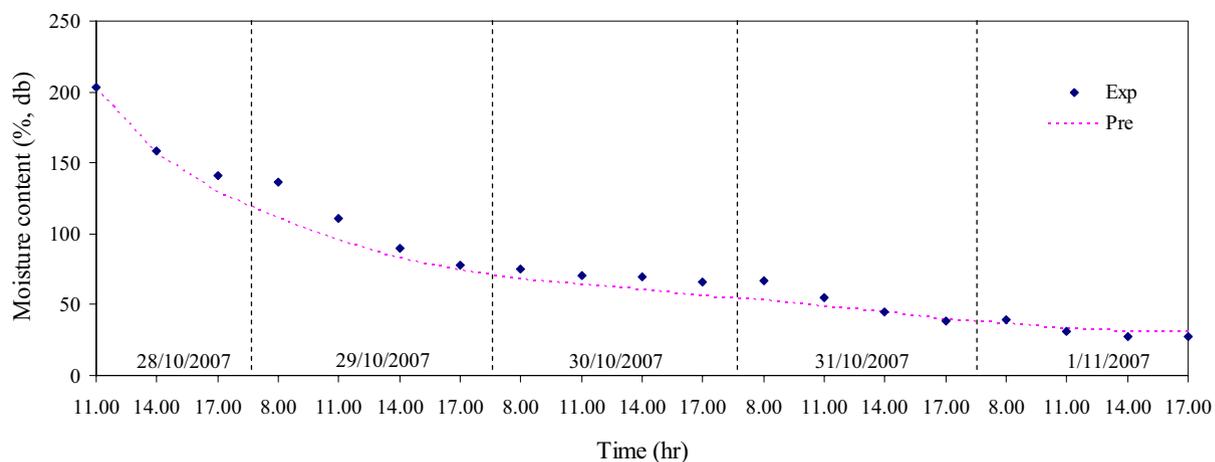
ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ผู้วิจัยใช้แบบจำลองคำนวณอุณหภูมิและความชื้น แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลอง กรณีตัวแปรทางเรขาคณิต เช่นขนาดขององค์ประกอบของส่วนอบแห้งจะใช้ขนาดที่เป็นจริง สำหรับสมบัติทางความร้อน เช่นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่างๆ จะคำนวณตามสูตรที่กล่าวไปแล้ว โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในสูตรจากเอกสารอ้างอิงต่างๆของ Duffie and Beckman (1991) และข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจะใช้ค่าที่ได้จากการวัดจริงที่ทำการทดลอง โดยการ simulation จะทำทุกๆ 10 นาทีเท่ากับช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิกายในส่วนอบ แสดงไว้ในรูปที่ 4.4-4.5 และผลการเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์แสดงไว้ในรูปที่ 4.6-4.7 นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้หาความแตกต่างของผลที่ได้จากแบบจำลองและจากการวัด ในรูปของ root mean square differences (RMSD)



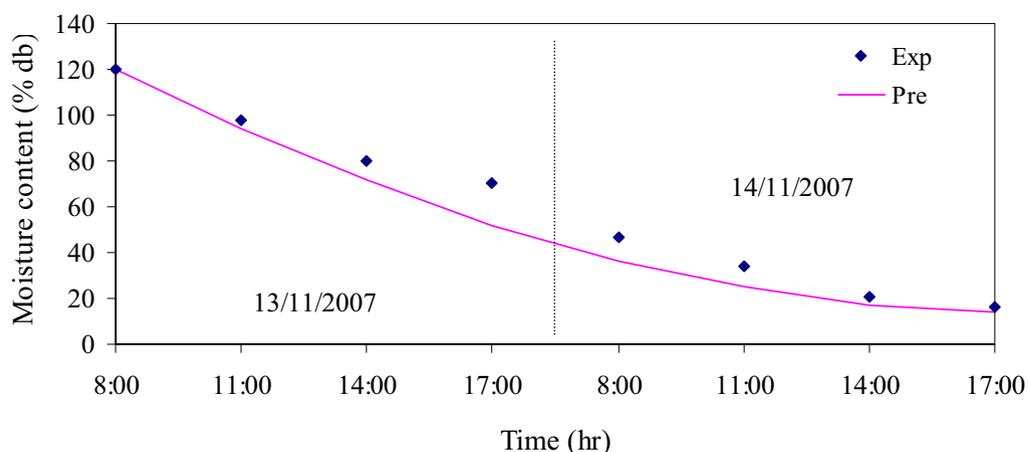
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิกายอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบกล้วยระหว่างวันที่ 28 ต.ค.- 1 พ.ย. พ.ศ. 2550



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบกาแฟระหว่างวันที่ 13 - 14 พ.ย. พ.ศ. 2550



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของกล้วยที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ในช่วงวันที่ 28 ต.ค.- 1 พ.ย. พ.ศ. 2550



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของกาแฟที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ในช่วงวันที่ 13 - 14 พ.ย. พ.ศ. 2550

จากผลการจำลองการทำงานของส่วนอบแห้งพบว่ากรณีที่ใช้ห้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิอากาศที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัด แต่ในกรณีที่รังสีอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเมฆ อุณหภูมิจากการ simulation จะมีค่าต่ำกว่าผลการวัด แต่ยังคงมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันทั้งนี้เพราะค่าตัวแปรบางตัว เช่น ความร้อนจำเพาะที่นำมาใช้อาจมีความคลาดเคลื่อน เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้การวัดและการคำนวณพบว่าค่า RMSD จะแปรค่าอยู่ในช่วง 1 – 3 °C ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างน้อย

สำหรับผลการทำนายค่าความชื้นของกล้วย ในการจำลองการทำงานของเครื่องอบแห้งพบว่า กราฟการลดลงของความชื้นของกล้วยในวันแรกที่ได้จากการคำนวณมีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง สำหรับในวันที่ 2-3 จะพบว่าค่าความชื้นของกล้วยจากแบบจำลองจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย ส่วนกราฟการลดลงของความชื้นของกาแฟในวันแรกที่ได้จากการคำนวณมีลักษณะใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง ส่วนในวันที่ 2 จะพบว่าค่าความชื้นของกาแฟจากแบบจำลองจะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง และแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางรวมถึงแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ยังมีความคลาดเคลื่อน และเมื่อนำค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับที่ได้จากแบบจำลองพบว่า ค่า RMSD มีอยู่ในช่วง 5.1 – 9.0 %, d.b.

จากผลการทดลองนี้แบบจำลองสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าสมรรถนะของเครื่องอบแห้งในสถานะของการอบแห้งต่างๆได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องอบแห้งให้ดีขึ้น หรือใช้ในงานด้าน optimization ต่อไปได้

บทที่ 5

สรุป

ในงานวิจัยผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ เครื่องอบแห้งดังกล่าวจัดสร้างโดยมหาวิทยาลัยศิลปากรร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ที่วิทยาลัยเกษตรและป่าไม้จำปาสัก เมืองปากเซ แขวงจำปาสัก ประเทศสปป.ลาว ภายใต้โครงการความร่วมมือด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานระหว่างประเทศไทยและสปป.ลาว เครื่องอบแห้งมีความกว้าง 7.5 เมตร ยาว 20.0 เมตร และสูง 4.5 เมตร ตั้งอยู่บนพื้นคอนกรีตตามแนวยาวในทิศเหนือและทิศใต้ พื้นที่ทำหน้าตัดเป็นรูปพาราโบลาเพื่อลดการต้านลมและสะดวกในการสร้าง เครื่องอบแห้งปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตซึ่งช่วยทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ในเครื่องอบแห้ง ภายในเครื่องอบแห้งมีถาดวางผลิตภัณฑ์แบบชั้นเดียว ซึ่งมีพื้นที่วางผลิตภัณฑ์รวม 100 ตารางเมตร ในการระบายความชื้นของผลิตภัณฑ์ จะใช้พัดลมดูดอากาศ ขนาด 15 วัตต์ ดูดอากาศภายในเครื่องอบแห้งออกสู่สิ่งแวดล้อมจำนวน 9 ตัว พัดลมดังกล่าวใช้กำลังไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผง ซึ่งติดตั้งบนเสาสูงข้างเครื่องอบแห้ง

ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องอบแห้งดังกล่าว ผู้วิจัยได้ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในเครื่องอบแห้ง และติดตั้งอุปกรณ์วัดความเข้มข้นสีอาทิตย์ จากนั้นได้ทำการทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้าจำนวน 1,000 กิโลกรัม จำนวน 1 ครั้ง และอบแห้งกาแฟครั้งละ 200 กิโลกรัม จำนวน 5 ครั้ง พบว่าในการอบกล้วย 1,000 กิโลกรัม ที่ความชื้น 70 % (w.b.) ให้ได้ความชื้นสุดท้าย 20% (w.b.) จะใช้เวลา 5 วัน ในขณะที่การตากแดดตามธรรมชาติ ต้องใช้เวลา 7 วัน สำหรับผลการทดลองอบกาแฟ พบว่าเครื่องอบแห้งนี้สามารถใช้ออบแห้งกาแฟที่ความชื้น 55 % (w.b.) ให้ลดลงเหลือ 13 % (w.b.) โดยใช้เวลา 2 วัน ในขณะที่การตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลา 4 วัน ทั้งกล้วยและกาแฟที่อบแห้งในเครื่องอบแห้งนี้ไม่เปื่อยกفن และไม่ถูกการรบกวนของแมลงต่างๆ ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มีคุณภาพดี

สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้ง โดยการเขียนสมการสมดุลพลังงานและสมการสมดุลมวลของส่วนต่างๆ อากาศและผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้ง จากนั้นได้แก้สมการโดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิและความชื้นกับผลที่ได้จากการวัด พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน

เนื่องจากเครื่องอบแห้งดังกล่าวใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทำให้ไม่สามารถใช้ได้ดีในช่วงฤดูฝน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้มีการพัฒนาระบบให้ความร้อนเสริมให้ช่วงที่ห้องฟามีเมฆปกคลุมหรือช่วงฝนตก แล้วให้เครื่องอบแห้งสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บรรณานุกรม

- Bakker –Arkema, F.W. and Hall, C.W., 1974. Drying Cereal Grains. AVT, Westport, Connecticut.
- Bala, B. K., 1998. Solar Drying System, Agrotech Publishing Academy, Udaipur, India.
- Boon-Long, P., Hirun, A., Siriplabla, P., Therdtoon, P., Sittiphong, N., Siratnapanta, T., Sucharitakul, T., Rerkkriangkrai, P., 1984. Solar-assisted tobacco curing, Proceedings of the Regional Seminar on Solar Drying, 28-31 August 1984, Yogyakarta, Indonesia.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of thermal Processes, John Wiley and sons, New York.
- Exell, R.H.B., Kornsakoo, S., 1976. A low-cost solar rice dryer. Appropriate Technology, 5, 23-25.
- Exell, R.H.B., Tim seasoning with solar energy, Proceedings of the International Conference on Energy and Environment, 27-30 November, Bangkok, Thailand, (1990).
- Hossain, A., 2003. Forced convection solar drying of chilli, A thesis submitted as a part of Farm Power and Machinery at Bangladesh Agricultural University.
- Janjai, S., Doe, P.E., 1991. A simple procedure for computing solar radiation for solar grain dryer simulations, Proceedings of the ISES Congress, 18-24 August 1991, Denver, USA.
- Janjai, S., Hirunlabh, J., 1993. Experimental study of solar fruit dryer, Proceedings of the ISES Solar World Congress, Budapest vol 8, 123-128.
- Janjai, S., Esper, A. and Muhlbauer, W., 1998. A study of the performance of Sipakorn-Hohenheim type solar dryer, ASEAN Seminar and Workshop on Drying Technology, June 3-5, 1998, Phitsanulok, Thailand.
- Janjai, S., Esper, A., Muhlbauer, W., 2000. Development of a small-scaled solar fruit dryer, Research report, Department of Physics, Silpakorn University, Thailand.
- Janjai, S., Chantaraksa, W., Hirunlabh, J., 2001. Performance of a solar dryer for lemongrass, Proceeding of a Symposium on Food Security, 3-7 January, 2001, Chiang Mai, Thailand.
- Janjai, S., Praditwong P., 1999. Performance of a solar fruit dryer, Proceeding of World Renewable Congress, UK.

- Janjai, S. Laksanaboonsong, J. Nunez, M. and Thongsathitya, A. Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy* 78, pp. 739-751, 2005.
- Janjai, S. and Tung, P. Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices, *Renewable Energy* 30, pp. 2085-2095, 2005.
- Janjai, S. And Kaewparsert, T. Design and performance of a solar tunnel dryer with a polycarbonate cover. *International Energy Journal* 7, pp. 187-194, 2006.
- Janjai, S., Khamvongsa, V. and Bala, B.K. Development, design and performance of a pv - ventilated greenhouse dryer. *International Energy Journal* , 2007. (inpress)
- Kays, W.M. and Crawford, M.E. 1980. *Convective heat and mass Transfer*, 2nd ed., cGraw-Hill, New York, pp. 182-184
- Lutz, K., Muhlbauer, W., Muller, J., Reisinger, G., 1987. Development of Multi-purpose solar crop dryer for arid zones. *Solar Wind Technology* 4, 417-424.
- Muhlbauer, W., 2003. Private communication , Institute of Agricultural Engineering in the Tropics and Subtropics , Hohenheim University , Germany.
- Page, G.E. 1949. Factors influencing the maximum rate of air drying of shelled corn in thin layers. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Praditwong P., Janjai S., 1990. Performance of a solar drying storage-bin for paddy, *Proceedings of World Renewable Energy Congress* , Reading, UK.
- Rakwichian, W., and B. Sudaprasert , Developmant of a fruit solar dryer for the industrial scale, *proceedings of the International Conference on Energy and Environment*, 27-30 Movember 1990, Bangkok Thailand, (1990).
- Rukkwamsuk, P. Private communication, School of Energy and Materials, King Mongkut University of Technology, Bangkok, Thailand, 2005
- Sodha, M.S., 1987. *Solar Crop Drying*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Soponronnarit, S., Watabutr, W., Therdyothin, A., 1986. A drying-storage solar hut: The technical aspect. *Renewable Energy Review Journal* 8(1), 49-60.
- Thongprasert, S., Thongprasert, M., Boonyavanichkul, S. Mahittafngkul, J., 1985. An economic study on solar rice dryer, National Energy and Administration, Thailand.

Wibulswas, P., Opaskiatkul, S. Hanpadungthum, S., 1977. Performance of a solar cabinet dryer, Proceeding of Renewable Energy and Application, Bangkok.

Wibulswas, P., Thaina, S., 1980. Comparative performance of cabinet dryers with separate air heaters, Paper presented at the workshop on Fuel and Power in the Third World, Bordeaux, France.

ณัฐพล ศรีสิทธิโชคกุล, 2548. การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งเครื่องเทศและสมุนไพร, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ณัฐวุฒิ คุชฎี, 2534. การพัฒนาระบบอบแห้งผลไม้ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธาดา แก้วประเสริฐ, 2546. การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมที่ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นฉนวนโปร่งแสง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วาสนา คำวงศ์สา, 2546. การศึกษาสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นฉนวนโปร่งแสง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

เสริม จันทร์ฉาย, 2544. การศึกษาความชื้นสมดุลของผักและผลไม้ในภูมิภาคตะวันตกของประเทศไทย, รายงานวิจัย, สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ภาคผนวก 1

การใช้งานและการบำรุงรักษาเครื่องอบแห้ง

A.1.1 การใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์

1. เตรียมผลิตภัณฑ์ที่จะทำการอบ โดยวิธีการเตรียมอบขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ เช่น กรณีของกล้วย จะทำการปลอกเปลือก และอบแห้งทั้งลูก
2. นำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมไว้วางลงในตะแกรงอะลูมิเนียม
3. นำตะแกรงซึ่งวางผลิตภัณฑ์แล้วเข้าเครื่องอบแห้ง
4. ปล่อยผลิตภัณฑ์ทิ้งไว้จนกระทั่งผลิตภัณฑ์แห้งตามความต้องการ จากนั้นจะนำตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องอบแห้ง



รูปที่ A1.1 แสดงการใช้งานเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์

A.1.2 การบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์

การบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งดังกล่าวไม่มีความยุ่งยากอะไรนักแต่มีข้อพึงระวังดังนี้

1. คอยตรวจและทำความสะอาดแผ่นโพลีคาร์บอเนตอยู่เสมอโดยการล้างด้วยน้ำที่เพียงพอ ถ้ามีฝุ่นเกาะที่แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นปริมาณมากจะส่งผลต่อการได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ของเครื่องอบแห้ง
2. หากพบรอยร้าวที่แผ่นโพลีคาร์บอเนตให้ใช้ซิลิโคนใสอุดรอยร่วนั้น
3. สังเกตการทำงานของพัดลมระบายอากาศอยู่เสมอว่าทำงานเป็นปกติหรือไม่ ถ้าหากพัดลมระบายอากาศมีปัญหาหรือขัดข้อง จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก 2

การสร้างเครื่องอบแห้ง

ผู้วิจัยได้ร่วมงานการสร้างเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้ในการศึกษานี้ การสร้างจะเตรียมวัสดุอุปกรณ์จากมหาวิทยาลัยศิลปากร และขนส่งไปยังวิทยาลัยเกษตรปากเซ แขวงจำปาสัก สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยอาศัยรถบรรทุก และทำการตามขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกทางต้องทำการเตรียมฐานซีเมนต์ซึ่งมีขนาดกว้าง 9 เมตร ยาว 23 เมตร สูง 0.3 เมตร โดยก่อนทำการเทพื้นคอนกรีตจะใช้พลาสติกปูรองพื้นด้านล่างเสียก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้มีความชื้นระเหยจากพื้นปูพื้นด้านบนด้วยกระเบื้องสีดำด้านเพื่อเป็นตัวดูดกลืนพลังงานความร้อน จากนั้นทำการประกอบโครงสร้างที่ได้จัดเตรียมไว้ โครงแต่ละโครงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย ซึ่งเมื่อนำมาประกอบกันจะได้โครงเหล็กที่มีขนาดรัศมีมีความโค้งของส่วนบนเท่ากับ 1.69 เมตร ความยาวตลอดโครงเหล็กเท่ากับ 6 เมตร โดยแต่ละโครงเหล็กจะวางห่างกัน 2.1 เมตร และยึดติดกับพื้นซีเมนต์ด้วยเหล็กแบนขนาด 4 นิ้วที่ได้ทำการตั้งเสาที่มีความสูงขนาด 2.50 เมตร กำหนดความห่างของแต่ละโครงเหล็กให้มีขนาดที่แน่นอนหลังจากนั้นจะทำการยึดเหล็กฐานของโครงกับซีเมนต์ด้วยพุกขนาด 4 หุน เพื่อให้แข็งแรงและทนต่อสภาพภูมิอากาศแวดล้อม และเพื่อทำให้เกิดความแข็งแรงและยึดโครงเหล็กแต่ละโครงด้วยเหล็กกล่องขนาด 1X2 นิ้ว โดยการเชื่อมด้วยไฟฟ้า เมื่อทำการยึดโครงเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนต่อไปจะทำการติดแผ่นโพลีคาร์บอเนตเข้ากับโครงเหล็กโดยใช้ชุดเชื่อมรอยต่ออะลูมิเนียมสำเร็จรูป จากนั้นทำการติดพัดลมดูดอากาศจำนวน 9 ตัวไว้ทางด้านหลังของเครื่องอบแห้งโดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 3 แผง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้พัดลม ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบได้แสดงดังรูปที่ B2.4(ก)-(ข)



รูปที่ B2.1 ส่วนโค้งของโครงเหล็กที่ใช้ประกอบเป็นโครงของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์



รูปที่ B2.2 ส่วนฐานของโครงเหล็กที่ใช้ประกอบเป็นโครงของเครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์



รูปที่ B2.3 แผ่นโพลีคาร์บอนต์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้ง



รูปที่ B2.4 ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้ง



รูปที่ B2.4 ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้ง(ต่อ)



รูปที่ B2.4 ขั้นตอนการสร้างเครื่องอบแห้ง (ต่อ)



รูปที่ B2.5 การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ B2.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่สร้างเสร็จแล้ว

ภาคผนวก 3

วิธีการเตรียมเมล็ดกาแฟก่อนการอบแห้ง

กาแฟจะเริ่มติดดอกออกผลหลังจากปลูกไปและประมาณปีที่ 3 และผลกาแฟจะเริ่มสุกประมาณเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของต้นกาแฟและสภาพของพื้นที่ปลูก ผลกาแฟในแต่ละช่อจะสุกไม่พร้อมกัน ในการเก็บผลกาแฟให้เลือกเก็บเฉพาะผลที่สุกแก่มีสีแดงเท่านั้น ไม่ควรเก็บผลกาแฟที่ยังอ่อนซึ่งมีสีเขียว หรือผลไม่แก่จัดหรือใช้วิธีรุดทั้งกิ่ง เพราะจะทำให้ได้สารกาแฟคุณภาพต่ำสำหรับผลกาแฟที่เก็บได้มีความมีการคัดแยกคุณภาพ โดยผลกาแฟที่แก่จัดเกินไป ซึ่งมีสีแดงเข้ม หรือผลที่แห้งคาต้นผลที่ร่วง หล่นตามพื้นควรเก็บแยกไว้ต่างหากจากผลกาแฟที่เก็บได้ในแต่ละครั้ง การเก็บผลกาแฟ ควรเก็บผลที่สุก 90% - 100% คือ เมื่อผลมีสีแดงเกือบทั้งผล หรือทั่วทั้งผล หรือผลมีสีเหลืองเกือบทั้งผลหรือทั่วทั้งผล (บางสายพันธุ์ผลสุกจะเป็นสีเหลือง) การทดสอบผลสุกพร้อมที่จะเก็บเกี่ยว โดยการปลิดผลกาแฟแล้วใช้นิ้วบีบผล ถ้าผลสุกเปลือกจะแตกง่ายและเมล็ดกาแฟจะโผล่ออกมา การเก็บผลควรพิจารณาการสุกของผลบนแต่ละกิ่งที่ให้ผลในแต่ละต้น ว่ามีผลสุกมากกว่า 50% ในการเก็บผลผลิตครั้งแรก ซึ่งปกติการเก็บผลกาแฟจะต้องใช้เวลาเก็บประมาณ 2 - 4 ครั้ง จากนั้นให้นำผลกาแฟทั้งหมดออกตากแดด

การเตรียมเมล็ดกาแฟก่อนการอบแห้งทำได้ 2 วิธี ดังนี้

1. วิธีเปียก (wet method) เป็นวิธีที่ใช้กันมากเพราะได้สารกาแฟที่มีความคุณภาพได้แต่มีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าวิธีการแบบแห้ง วิธีการเริ่มจากการเก็บผลกาแฟสุกมาปอกเปลือกให้หมดภายในวันเดียวกัน ถ้าปอกไม่ทันไม่ควรเก็บไว้เกิน 1 คืน เพราะการเก็บหมักไว้นานจะทำให้เมล็ดเสื่อมคุณภาพได้ เมื่อปอกเปลือกเรียบร้อยแล้วให้นำเอาเมล็ดที่ได้แช่น้ำพอท่วมเมล็ด แช่หมักไว้ 24 ชั่วโมง แล้วขยี้ล้างเมือกออกให้หมด หรือใช้เครื่อง ขัดเมือกก็จะช่วยทุ่นเวลาไปได้มาก เมื่อขัดเมือกหมดแล้วเหลือแต่เมล็ดที่มีเปลือกแข็งหุ้มให้นำออกผึ่งแดดให้แห้งสนิท โดยใช้เวลาประมาณ 5-7 วัน แต่ปัจจุบันอาจใช้เครื่องอบเมล็ดให้แห้งภายใน 24-28 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาเข้าเครื่องกะเทาะเปลือก และฝัดเอาฝุ่นผงออกให้หมด คัดเอาพวกเมล็ดแตก เมล็ดดำ หรือกาแฟที่มีเปลือกหุ้มอยู่ออกให้หมดก็จะได้สารกาแฟตามที่ต้องการ

2. วิธีแห้ง (dry method) เป็นวิธีที่นิยมทำกันมากในกาแฟโรบัสต้าเนื่องจากสะดวก ลงทุนน้อย แต่ควบคุมคุณภาพได้ยาก วิธีนี้ทำได้โดยเก็บกาแฟที่สุกแล้วมาตากให้แห้งสนิทบนลานคอนกรีต จนสามารถเขย่าให้รู้สึกเมล็ดในคลอนได้ แล้วจึงนำเข้าเครื่องสีเอาเปลือกออกให้หมดฝัด

ร้อนเอาเมล็ดที่เสียออก วิธีแบบนี้ไม่สามารถควบคุมการหมักตัวของเมล็ดกาแฟได้ ถ้าหากไม่มีแสงแดดเพียงพอติดต่อกันหลายวัน หรือผลกาแฟที่ตากบนลานไม่ถูกกระจายให้รับแสงแดดอย่างทั่วถึง ทำให้เชื้อราสามารถเจริญเติบโต

ต่อมาจะกล่าวถึงการอบแห้งกาแฟ เริ่มต้นกาแฟจะมีความชื้นอยู่ที่ 55-60 % w.b. โดยในการเตรียมกาแฟจะใช้วิธีการเปียก (wet method) โดยจะดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

(1) การเก็บผลสดจากต้นกาแฟ จะทำการเก็บผลสดด้วยมือคนโดยเลือกเก็บเฉพาะผลกาแฟที่สุกและสมบูรณ์เต็มที่

(2) การล้างและคัดแยกผลที่มีเมล็ดสมบูรณ์ นำผลกาแฟสุกมาล้างในน้ำ และคัดแยกด้วยน้ำ โดยผลที่มีเมล็ดสมบูรณ์จะจม ส่วนผลที่มีเมล็ดไม่สมบูรณ์จะลอยอยู่ด้านบนซึ่งจะคัดแยกออกไป

(3) การสีเปลือกกาแฟ การสีเปลือกนอกของผลกาแฟที่มีเมล็ดสมบูรณ์ออกด้วยเครื่องสีเปลือกสด ภายใน 24 ชั่วโมงหลังการเก็บเกี่ยว

(4) การหมัก นำกาแฟกะลาเปียกที่สีเปลือกออกหมดแล้ว นำมาทำการหมักในน้ำสะอาด ประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการขจัดเมือกของกาแฟ

(5) การแช่พักเมล็ด นำกาแฟกะลาที่ผ่านการหมัก ไปแช่พักในน้ำสะอาด ประมาณ 20-24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการล้างเมือกของกาแฟออกไป

(6) การตากกาแฟ ก่อนตากต้องสะอาดน้ำให้เหลือน้อยที่สุด นำเมล็ดกาแฟที่ได้เข้าตากในเครื่องอบเกลี่ยให้กระจายตัว

โดยในการทดลองจะดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นกาแฟที่จะอบ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งในเครื่องอบและที่ตากแดดตามธรรมชาติ
- 2) นำตัวอย่างกาแฟที่เตรียมไว้ไปวางภายในตระแกรงที่ทำการอบตามตำแหน่งที่ระบุไว้
- 3) บันทึกข้อมูลน้ำหนัก โดยจะชั่งน้ำหนักของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ทุกๆ 2-3 ชั่วโมง โดยข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จะบันทึกค่าทุก 10 นาทีโดยเครื่องบันทึกข้อมูล และเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้ จากแผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ทุกๆ 1 ชั่วโมง
- 4) โดยผู้วิจัยจะทำการอบแห้งกาแฟในเวลา 8.00 น. จนถึง 17.00 น.
- 5) ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 - 4 จนกว่ากาแฟจะแห้งตามที่ต้องการ
- 6) นำตัวอย่างกาแฟไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหามวลแห้ง

ในการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์จะอาศัยสมการ

$$M(t) = \frac{m_p(t) - m_s}{m_p(t)} \quad (C1.1)$$

โดย $M(t)$ = ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ, [% w.b.]
 $m_p(t)$ = มวลของกาแฟที่เวลาใด, [kg]
 m_s = มวลแห้งของกาแฟ, [kg]



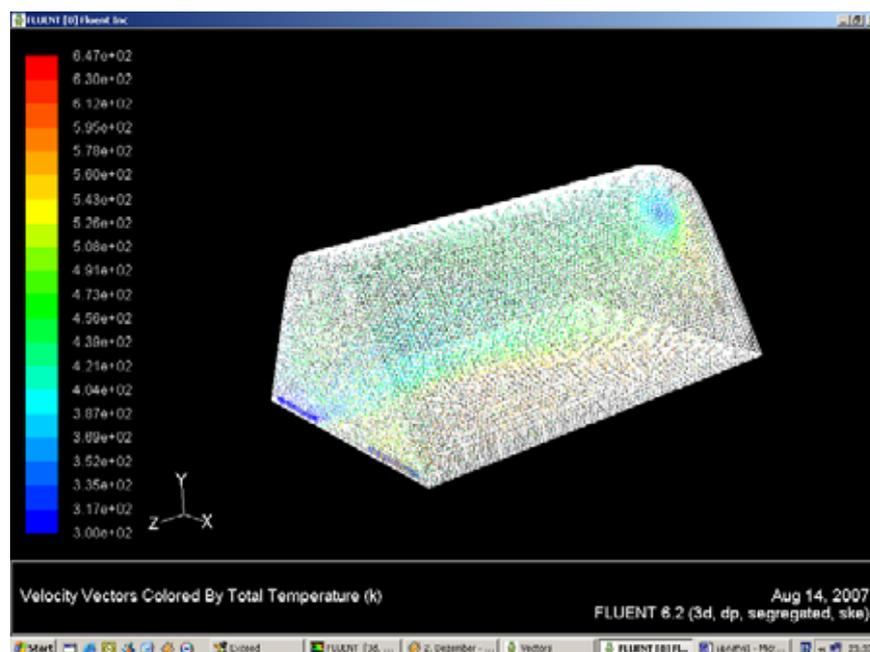
รูปที่ C3.1 ผลกาแฟสดที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก 4

การศึกษาเบื้องต้นของการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งโดยโปรแกรม computational fluid dynamics (CFD)

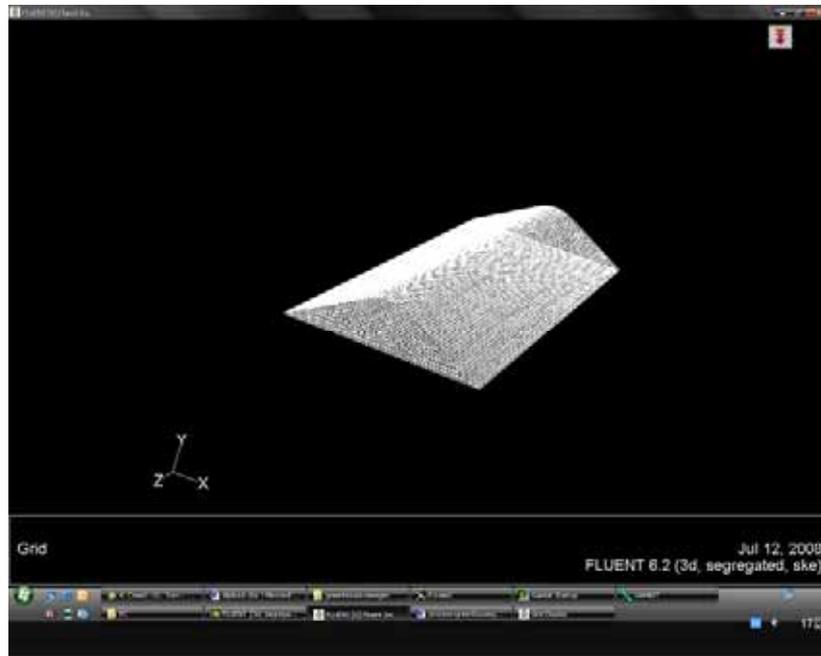
เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ผู้วิจัยได้พัฒนาตามรายละเอียดในบทที่ 4 ไม่สามารถคำนวณการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งได้ ดังนั้นผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม CFD เพื่อทำการศึกษาเบื้องต้นของการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งดังกล่าว

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่าน โพลีคาร์บอเนตเข้าไปตกกระทบผลิตภัณฑ์ภายในเครื่องอบแห้ง และพื้นของเครื่องอบแห้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์และพื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนดังกล่าวจะถ่ายเทไปยังอากาศภายใน โดยการพาความร้อนในขณะที่อากาศภายในถูกดูดออกไปภายนอกโดยพัดลมระบายอากาศ อากาศจากภายนอกจะไหลมาด้านหน้าผ่านช่องอากาศเข้าไปแทนที่ แต่เนื่องจากรูปทรงของเครื่องอบแห้งจะมีอัตราการไหลของอากาศในบริเวณต่างๆ ในเครื่องอบไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์ ขั้นแรกทำการสร้างเครื่องอบแห้งด้วยโปรแกรม Gambit และได้ทำการปรับรูปร่างของเครื่องอบแห้งเพื่อศึกษาผลของรูปร่างที่มีต่ออุณหภูมิโดยปรับขนาดของช่องระบายอากาศให้เหมาะสม เพื่อให้การกระจายของอุณหภูมิอากาศภายในสม่ำเสมอที่สุด แล้วนำไปใช้ในโปรแกรม CFD ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ D3.1

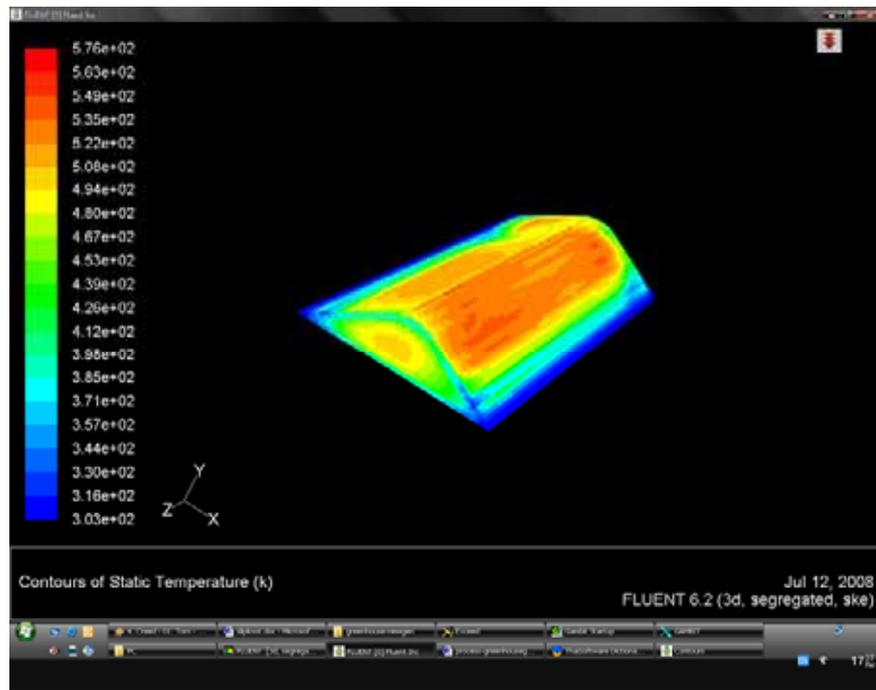


รูปที่ D4.1 การกระจายตัวของการไหลของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

จากรูปที่ D3.1 แสดงให้เห็นว่า อากาศภายในเครื่องอบแห้งมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ โดยตัวเครื่องอบแห้งจะมีช่องอากาศเข้าทางด้านหน้า 2 ช่อง และมีช่องอากาศออกด้านหลัง



รูปที่ D4.2 เครื่องอบแห้งแบบกรีนเฮาส์



รูปที่ D4.3 การกระจายตัวของความร้อนของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

จากรูปที่ D3.3 จะเห็นว่าอุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเนื่องจากช่องอากาศเข้าทางด้านหน้าจะใหญ่ และการไหลของอากาศออกทางด้านหลังไม่สอดคล้องกัน ทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในเครื่องอบแห้งกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายชนก ศรีทัศน์
ที่อยู่	260/2 ซ.เกษตรสิน ต.ลำพญา อ.เมือง จ.นครปฐม 73000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2545	จบมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ จังหวัดนครปฐม
พ.ศ.2548	จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
พ.ศ.2549	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม