



การศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่ที่มี
อุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม

โดย

นายสรายุทธ แนนเนียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮ้าส์ขนาดใหญ่

ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม

โดย

นายสรายุทธ แนนเนียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF LARGE - SCALE GREENHOUSE
SOLAR DRYING SYSTEMS WITH AUXILIARY HEATERS**

**By
Sarawut Nabnean**

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

MASTER OF SCIENCE

Department of Physics

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2009

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “การศึกษา
สมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อน
เสริม” เสนอโดย นายสราวุฒิ แบนเนียร เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศา
สตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทน์ฉาย

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ จำนงค์ ชำรงมาศ)

...../...../.....

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)

...../...../.....

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทน์ฉาย)

...../...../.....

50306208 : สาขาวิชาฟิสิกส์

คำสำคัญ : พลังงานแสงอาทิตย์/ ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์/ อุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม

สรุพาธิ แบบเนียร : การศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รศ.ดร. เสริมจันทร์ฉาย. 137 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์จำนวน 3 ระบบ โดยแต่ละระบบจะมีหลังคาโค้งรูปทรงพาราโบลา ซึ่งปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต และตั้งอยู่บนพื้นคอนกรีต โดยมีพื้นที่ฐาน 8×20 ตารางเมตรและมีความสูง 3.5 เมตร ระบบอบแห้งนี้สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์สดจำพวกผักและผลไม้ได้ครั้งละ 1,000 กิโลกรัม โดยมีเครื่องเผาไหม้แก๊ส LPG สำหรับให้ความร้อนกับระบบอบแห้งในช่วงที่ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมหรือฝนตก ระบบอบแห้งดังกล่าวติดตั้งอยู่ที่จังหวัดนครปฐม จังหวัดเพชรบูรณ์ และจังหวัดอุบลราชธานี ในการทดสอบสมรรถนะของระบบ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่เย็น 3 ครั้งในระบบอบแห้งที่จังหวัดนครปฐม และทำการอบแห้งกล้วยแผ่น 3 ครั้งในระบบอบแห้งที่จังหวัดเพชรบูรณ์ กรณีของระบบอบแห้งที่จังหวัดอุบลราชธานี ผู้วิจัยได้ทำการทดลองอบแห้งพริก จำนวน 3 ครั้ง ผลการทดลองทั้ง 3 แห่งพบว่า อุณหภูมิของอากาศภายในระบบอบแห้งจะแปรค่าอยู่ในช่วง 35 – 65 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ 2 – 3 วัน ผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มีคุณภาพดี สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนและมวลภายในระบบอบแห้งดังกล่าว และทำการแก้สมการสมดุลทางความร้อนและมวลด้วยวิธีเชิงตัวเลข เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองทั้งอุณหภูมิและความชื้นกับผลการทดลองพบที่มีความสอดคล้องกัน แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์สำหรับใช้ในงานออกแบบระบบอบแห้งให้เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศต่างๆ

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์.....

50306208 : MAJOR : PHYSICS

KEY WORDS : SOLAR ENERGY / GREENHOUSE DRYER / AUXILIARY HEATER

SARAWUT NABNEAN : AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF
LARGE-SCALE GREENHOUSE SOLAR DRYING SYSTEMS WITH AUXILIARY HEATERS.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.SERM JANJAI, Ph.D. 137pp.

In this study, the performance of three large-scale solar greenhouse drying systems were investigated. Each system consists of a parabolic roof structure covered with polycarbonate sheets on a concrete floor. The dryer has the base area of $8 \times 20 \text{ m}^2$ and the height of 3.5 m. It has a loading capacity of 1,000 kg of fruits or vegetables. Each system was equipped with a 100 kW-LPG gas burner for supplying hot air into the dry during cloudy or raining days. Nine 15-W DC fans powered by three 50-W PV modules were used to ventilate the dryer. The systems were constructed at Nakhon Pathom (13.96°N , 100.10°E), Petchaboon (16.40°N , 100.98°E) and Ubon Ratchathani (15.37°N , 100.82°E). To investigate the performance of these systems, the system at Nakhon Pathom was used to dry 3 batches of tomatoes soaked in sugar solution, the system at Petchaboon was employed to dry 3 batches of flatten bananas and the system at Ubon Ratchathani was used to dry 3 batches of chillies. Results obtained from these drying experiments show that the drying air temperature in all drying systems varied from 35°C to 65°C . In addition, the drying time for these products is 2 – 3 days shorter than that of the natural sun drying and good quality dried products were obtained. A set of partial differential equations describing heat and moisture transfer during drying of the tomatoes, flatten bananas and chillies in the solar greenhouse drying systems was developed and this system of non-linear partial differential equations was solved numerically using the finite difference method. The simulated results agreed well with the experimental data for solar drying of the tomatoes, flatten bananas and chillies. This model can be used to provide the design data for this type of dryer in different climatic conditions.

Department of Physics Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2009

Student's signature.....

Thesis Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโทในหัวข้อเรื่องการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริมโดยผู้วิจัยได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้คำแนะนำในด้านวิชาการ และจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์จำนงค์ ชำรงมาศ และผู้ช่วยศาสตราจารย์พูลศักดิ์ อินทวิ ที่ช่วยในการอำนวยความสะดวกและให้การสนับสนุนงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ๆ เพื่อนๆ ที่คอยสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสมอมา

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยเหลือให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
สัญลักษณ์	ท
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 วอเตอร์แอกติวิตี	5
2.1.1.5 ซอบซันไอโซเทอม	6
2.1.1.6 ความร้อนแฝง	7
2.1.2 สมบัติของอากาศชื้น	8
2.1.3 ทฤษฎีการอบแห้ง	9
2.1.4 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้ง	12
2.1.5 ประเภทของการอบแห้ง	13
2.2 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	14
2.2.1 ระบบอบแห้งแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ	14
2.2.2 ระบบอบแห้งแบบพาความร้อนโดยบังคับอากาศ	15
2.3 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์	18
2.4 งานวิจัยและการพัฒนาระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์	20

บทที่	หน้า
3 การดำเนินงานวิจัย	33
3.1 โครงสร้างของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่มีระบบให้ความร้อนเสริม	33
3.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์	39
3.2.1 อุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูล	39
3.2.2 วิธีการทดลอง	45
3.2.3 วิสาห์กิจชุมชนตำบลคอนตูม อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม	46
1) ผลการทดลองอบมะเขือเทศแช่อิ่มครั้งที่ 1 (12-15 ตุลาคม พ.ศ.2552)	47
2) ผลการทดลองอบมะเขือเทศแช่อิ่มครั้งที่ 2 (19-22 ตุลาคม พ.ศ.2552)	51
3) ผลการทดลองอบมะเขือเทศแช่อิ่มครั้งที่ 3 (31 ตุลาคม - 3 พฤศจิกายน พ.ศ.2552)	55
3.2.4 โครงการพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมเกษตรเขาค้อ จำกัด อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์	60
1) ผลการทดลองอบกล้วยแผ่นครั้งที่ 1 (10-11 ธันวาคม พ.ศ.2552)	61
2) ผลการทดลองอบกล้วยแผ่นครั้งที่ 2 (15-16 ธันวาคม พ.ศ.2552)	64
3) ผลการทดลองอบกล้วยแผ่นครั้งที่ 3 (20-21 ธันวาคม พ.ศ.2552)	68
3.2.5 องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอหัวเรือ จังหวัดอุบลราชธานี	72
1) ผลการทดลองอบพริกครั้งที่ 1 (21-23 พฤศจิกายน พ.ศ.2552)	73
2) ผลการทดลองอบพริกครั้งที่ 2 (25-27 พฤศจิกายน พ.ศ.2552)	76

บทที่	หน้า
3) ผลการทดลองอบพริกครั้งที่ 3 (28-30 พฤศจิกายน พ.ศ.2552)	80
4 การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง	85
4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	85
1) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	87
2) สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง	88
3) สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์	89
4) สมการสมดุลพลังงานของพื้น	91
5) สมการสมดุลมวลของอากาศ	91
6) สมการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์	92
7) สมการความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์	94
4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	95
1) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี	95
2) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	95
3) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต	97
4.3 การหาผลเฉลย (solution) ของสมการแบบจำลอง	98
4.4 การทดสอบแบบจำลอง	101
5. สรุป	106
บรรณานุกรม	108
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การทดลองเพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบาง	111
ภาคผนวก ข ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)	129
ประวัติผู้วิจัย	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
A1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง.....	118
A1.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง ของมะเขือเทศแช่เย็น.....	119
A1.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของกล้วยแผ่น....	120
A1.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของพริก.....	121
A2.1 แสดงสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ.....	131
A2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล.....	134
A2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุลของมะเขือเทศแช่เย็น.....	135
A2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุลของกล้วยแผ่น.....	135
A2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุลของพริก.....	135

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แผนภูมิน้ำประเภตต่างๆในวัตุขึ้น	4
2.2 sorption isotherm ของผลิตผลการเกษตรทั่วไป	5
2.3 การแปรค่าของความร้อนแฝงของผลิตผลการเกษตร	7
2.4 แผนภูมิอากาศชื้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง	9
2.5 การถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้ง	10
2.6 การลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลิตผลการเกษตรทั่วไป	11
2.7 อัตราการแห้งของผลิตผลการเกษตรระหว่างการอบแห้ง	11
2.8 ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง	14
2.9 ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม	15
2.10 ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้พัดลม	16
2.11 ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมดูดอากาศ	16
2.12 ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลม	17
2.13 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์	18
2.14 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์	19
2.15 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์สำหรับใช้ออบแห้งสมุนไพร ที่พัฒนาโดย Muller และคณะ (1989)	20
2.16 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนา โดย Kamaruddin และคณะ (1996)	21
2.17 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ ที่พัฒนาโดย Bux และคณะ (1996)	22
2.18 รูประบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ แบบห้องเดี่ยว และห้องคู่ที่พัฒนาโดย Miguel และ Lui (1998)	23
2.19 รูปภาพภายนอกและภายในของระบบอบแห้งอุโมงค์ลมแบบกรีนเฮาส์ ที่พัฒนาโดย Condori และคณะ (2000)	24
2.20 ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลมกรีนเฮาส์ที่ใช้ rock bed ดูดกลิ่นและ สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Kurlu และคณะ (2003)	25
2.21 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ของ Hohenheim University (Bauer, 2003)	26
2.22 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Koyuncu และ คณะ(2005)	27

ภาพที่	หน้า
2.23 ระบบอบแห้งดินโคลนแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้ rock bed คุณกลืนและ สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Salihoglu และคณะ (2006).....	28
2.24 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่อาศัยหลักการสะท้อน พัฒนาโดย Sethi และ Sadhna Arora (2009).....	29
2.25 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2007).....	30
2.26 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่สามารถถอดประกอบได้ พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2009).....	31
2.27 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่นำไปติดตั้งใช้งานในจังหวัดต่างๆ	32
3.1 ลักษณะโครงสร้างของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์	34
3.2 ชั้นวางผลิตภัณฑ์และท่ออากาศภายในระบบอบแห้ง.....	35
3.3 เครื่องเผาไหม้แก๊ส	35
3.4 พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12V ใช้กระแส 1.2A	36
3.5 โซลาร์เซลล์ที่ใช้กับกับระบบอบแห้ง	36
3.6 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ วิทยาลัยชุมชนตำบลดอนตูม อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม	37
3.7 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมเกษตรเขาค้อ จำกัด อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์.....	37
3.8 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี	38
3.9 ภาพถ่ายเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Elekthonik รุ่น EE23 B.....	40
3.10 ภาพถ่ายเครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5.....	40
3.11 ภาพถ่ายไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONENรุ่น CM11.....	41
3.12 ภาพถ่ายเครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100	41
3.13 ภาพถ่ายตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP	42
3.14 ภาพถ่ายเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์	42
3.15 ภาพถ่ายเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์	43
3.16 ภาพถ่ายเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42	43
3.17 ตำแหน่งที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ที่จุดต่างๆ (T คือจุดวัดอุณหภูมิ, Rh คือจุดวัดความชื้นของอากาศและM คือ จุดวัดมวลตัวอย่าง).....	44

ภาพที่	หน้า
3.18 การอบแห้งมะเขือเทศเชื่อมด้วยระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ณ วิสาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม	46
3.19 การแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	48
3.20 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	48
3.21 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อมระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	49
3.22 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	49
3.23 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	49
3.24 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	50
3.25 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบน ตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	50
3.26 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของมะเขือเทศเชื่อม ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552	50
3.27 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552 ..	52
3.28 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	52
3.29 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	52
3.30 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	53
3.31 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	53
3.32 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	53
3.33 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบน ตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	54

ภาพที่	หน้า
3.34 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของมะเขือเทศเช่อัม ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้งระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552	54
3.35 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	55
3.36 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552 ..	56
3.37 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	56
3.38 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	56
3.39 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	57
3.40 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	57
3.41 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	57
3.42 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของมะเขือเทศเช่อัม ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552	58
3.43 เครื่องวัดค่าอุณหภูมิแบบคงที่ Thermoconstanter, TH200 Novasina	59
3.44 การวัดสีมะเขือเทศเช่อัมอบแห้งด้วยเครื่อง Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus	59
3.45 การอบแห้งกล้วยในระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ณ โครงการอันเนื่องมาจาก พระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมเกษตรเขาค้อ จำกัด	60
3.46 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	61
3.47 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	62
3.48 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	62
3.49 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	62

ภาพที่	หน้า
3.50 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	63
3.51 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	63
3.52 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	63
3.53 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของกล้วยแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552	64
3.54 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	65
3.55 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	65
3.56 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	65
3.57 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	66
3.58 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	66
3.59 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	66
3.60 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	67
3.61 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของกล้วยแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552	67
3.62 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	68
3.63 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	69
3.64 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	69

ภาพที่	หน้า
3.65 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	69
3.66 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	70
3.67 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	70
3.68 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	70
3.69 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของกล้วยแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552	71
3.70 แสดงการวัดสีกล้วยแผ่นด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus	72
3.71 แสดงการอบแห้งพริกด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบเรือนกระจก ณ องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ	73
3.72 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	74
3.73 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	74
3.74 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	74
3.75 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	75
3.76 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	75
3.77 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	75
3.78 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	76
3.79 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของพริก ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552	76
3.80 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	77
3.81 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	77

ภาพที่	หน้า
3.82 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	78
3.83 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	78
3.84 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	78
3.85 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	79
3.86 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วน โคงีงของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	79
3.87 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของพริก ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552	79
3.88 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	80
3.89 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	81
3.90 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	81
3.91 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	81
3.92 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	82
3.93 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	82
3.94 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วน โคงีงของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	82
3.95 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของพริก ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552	83
3.96 การเปรียบเทียบสีพริกที่ตากในระบบอบแห้งกับตากตามธรรมชาติ	84
4.1 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์	86

ภาพที่	หน้า
4.2	แผนภูมิสำหรับคำนวณอุณหภูมิ ความชื้น และตัวแปรในระบบอบแห้ง 100
4.3	กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบมะเขือเทศเชื่อมระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552 101
4.4	กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบกล้วยแผ่นระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม พ.ศ. 2552 102
4.5	กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง และจากผลการทดลองอบพริกระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552 102
4.6	กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของมะเขือเทศเชื่อมที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552 103
4.7	กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของกล้วยแผ่นที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม พ.ศ. 2552 103
4.8	กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของพริกที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552 104
A1.1	เครื่องอบแห้งที่ทำงานร่วมกับเครื่องควบคุมความชื้น 113
A1.2	เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory dryer) ที่จะใช้ในการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการอบแห้ง 114
A1.3	การลดลงของความชื้นของมะเขือเทศเชื่อมที่ความชื้น 10%, 20%, 30% และอุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C 115
A1.4	การลดลงของความชื้นของกล้วยแผ่นที่ความชื้น 10%, 20%, 30% และอุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C 116
A1.5	การลดลงของความชื้นของพริกที่ความชื้น 10%, 20%, 30% และอุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C 117

ภาพที่	หน้า
A1.6	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Page model ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 10% 124
A1.7	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Page model ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 20% 124
A1.8	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Page model ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 30% 125
A1.9	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Henderson and Pabis model ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 10% 125
A1.10	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Henderson and Pabis model ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 20% 126
A1.11	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Henderson and Pabis model ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 30% 126
A1.12	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Wang and Singh ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 10% 127
A1.13	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Wang and Singh ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 20% 127
A1.14	ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Wang and Singh ที่อุณหภูมิ 50 ⁰ C, 60 ⁰ C และ 70 ⁰ C ที่ความชื้น 30% 128
A2.1	ลักษณะของกล่องใส่ตัวอย่าง 130
A2.2	ลักษณะของตู้อบไฟฟ้า 131
A2.3	ซอฟต์แวร์ไฮโดรเทอร์มอลของมะเขือเทศแช่อิ่ม ที่อุณหภูมิ 40 ⁰ C, 50 ⁰ C และ 60 ⁰ C 132
A2.4	ซอฟต์แวร์ไฮโดรเทอร์มอลของกล้วยแผ่น ที่อุณหภูมิ 40 ⁰ C, 50 ⁰ C และ 60 ⁰ C 133
A2.5	ซอฟต์แวร์ไฮโดรเทอร์มอลของพริก ที่อุณหภูมิ 40 ⁰ C, 50 ⁰ C และ 60 ⁰ C 133

สัญลักษณ์

A_f	=	พื้นที่ของพื้น, [m ²]
A_c	=	พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [m ²]
A_{in}	=	พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศขาเข้า, [m ²]
A_p	=	พื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [m ²]
A_{out}	=	พื้นที่หน้าตัดของช่องอากาศขาออก, [m ²]
A_T	=	พื้นที่ที่รับรังสีอาทิตย์, [m ²]
C_{pa}	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศในผลิตภัณฑ์, [J/kg- °C]
C_{pc}	=	ความร้อนจำเพาะของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [J/kg- °C]
C_{pg}	=	ความร้อนจำเพาะของอากาศภายในเครื่องอบ, [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	=	ระยะระหว่างพื้นกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [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]

สัญลักษณ์ (ต่อ)

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, [MJ/kg]
L_c	= ความหนาของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [m]
L_p	= ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำในผลิตภัณฑ์, [MJ/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_e	= ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของผลผลิต
M_f	= ความชื้นสุดท้ายของกล้วยที่ต้องการ, [% w.b.]
$M(t)$	= ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ, [% w.b.]
M_p	= ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [decimal d.b.]

สัญลักษณ์ (ต่อ)

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	= อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับรังสีอาทิตย์, [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]

สัญลักษณ์ (ต่อ)

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

ประเทศไทยมีการผลิตอาหารแห้ง เช่น ผักและผลไม้ ทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็กกระจายกันอยู่ทั่วประเทศ ซึ่งเป็นกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่สำคัญในระดับท้องถิ่นและระดับประเทศ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยมีการผลิตลำไยแห้งในจังหวัดตากภาคเหนือปีละกว่า 500,000 ตัน มีมูลค่าทางเศรษฐกิจปีละ 1,600 ล้านบาทและมีการผลิตกล้วยตากปีละประมาณ 4,000 ตัน คิดเป็นมูลค่าทางเศรษฐกิจปีละกว่า 100 ล้านบาท นอกจากนี้ยังมีการผลิตอาหารทะเลแห้ง และสมุนไพรต่างๆ โดยบางส่วนส่งไปจำหน่ายในต่างประเทศ การผลิตผลิตภัณฑ์แห้งในประเทศไทยยังประสบปัญหาที่สำคัญ ได้แก่ เกษตรกร และผู้ประกอบการส่วนใหญ่ทำผลิตภัณฑ์แห้งโดยการตากแดดตามธรรมชาติ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง การรบกวนของแมลง และการเปียกฝน มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐานสำหรับการส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศ ถึงแม้จะมีเกษตรกรบางส่วนเริ่มนำระบบอบแห้งแบบใช้แก๊สหรือหม้อไอน้ำซึ่งใช้น้ำมันหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิงมาใช้งาน แต่จากราคาน้ำมันและแก๊สที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้เครื่องอบแห้งดังกล่าวยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงตลอดปี ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อแก้ปัญหาการอบแห้งจึงมีความเป็นไปได้สูง จากเหตุผลดังกล่าว นักวิจัยในสถาบันต่างๆจึงได้มีการพัฒนาระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นหลายแบบ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบอบแห้งดังกล่าวมักมีขนาดเล็ก อบผลิตภัณฑ์ได้น้อย ซึ่งยังไม่เหมาะสมกับการใช้งานเชิงพาณิชย์ ดังนั้นนักวิจัยของหน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จึงได้พัฒนาระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ซึ่งสามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์สดได้ครั้งละ 300 กิโลกรัม (Janjai et al., 2007 ; Janjai et al., 2009) และได้นำไปติดตั้งใช้งานในหลายจังหวัด (Janjai et al., 2006) ถึงแม้ว่าระบบอบแห้งดังกล่าวส่วนใหญ่ใช้งานได้ดี อย่างไรก็ตาม หลังจากที่ใช้งานมาได้ระยะหนึ่งพบว่าระบบอบแห้งนี้ยังมีขนาดที่ยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมและไม่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องในช่วงฤดูฝน ดังนั้นหน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากรร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

จึงได้ดำเนินการพัฒนาระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่มีขนาดใหญ่ ให้สามารถใช้งานในระดับอุตสาหกรรม และทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริมเพื่อแก้ปัญหาการใช้งานในช่วงฤดูฝนให้สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่อง หลังจากพัฒนาระบบอบแห้งต้นแบบที่มหาวิทยาลัยศิลปากรแล้ว ได้นำไปติดตั้งใช้งานที่ วิสาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ที่โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมการเกษตรเขาค้อ จำกัด อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ และที่องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งทั้ง 3 แห่ง พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ ที่มีอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม
- 2) เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในระบบอบแห้งดังกล่าว

บทที่ 2

หลักทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทางวิชาการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและงานวิจัยการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านมารายละเอียดดังนี้

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]

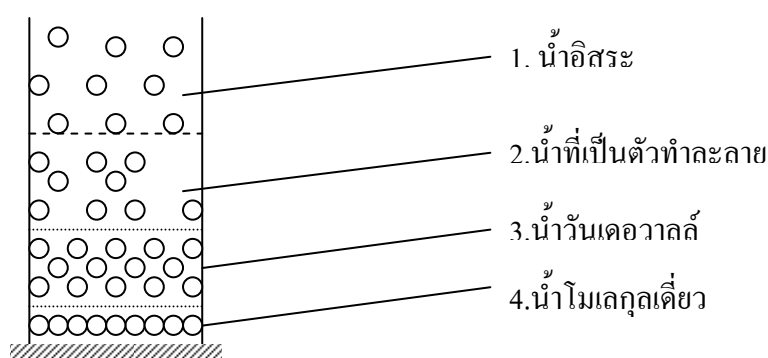
m_s = มวลของของแข็ง ในปริมาตรที่พิจารณา, [kg]

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)

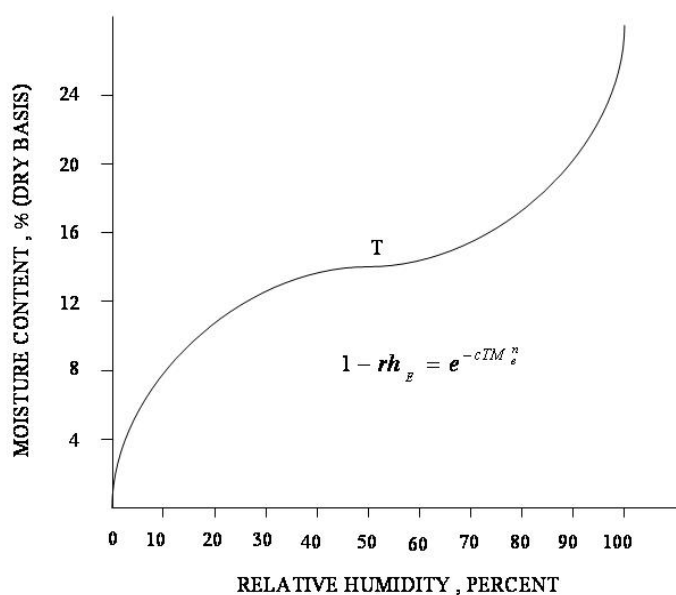


รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิน้ำประเภทต่างๆในวัตถุขึ้น (Bakker Arkemar, 1974)

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 แสดง sorption isotherm ของผลิตภัณฑ์เกษตรทั่วไป (Sodha M.S.,1987)

2.1.1.4 วอเตอร์แอคทิวิตี (water activity)

น้ำที่อยู่ในวัสดุชั้นประเภทไฮโกรสโคปิก จะมีความดันไอน้ำ (vapour pressure) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำ ชนิดของน้ำ โครงสร้างของวัสดุชั้น และสภาพทางชีวเคมีของวัสดุชั้นนั้นๆ ในทางเทคโนโลยีการอาหารจึงไม่มีการกำหนดพารามิเตอร์ที่จะบอกบทบาทของน้ำในวัสดุชั้นในรูปของวอเตอร์แอคทิวิตี (water activity) ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนของความดันไอน้ำในวัสดุชั้นต่อความดันไอน้ำของน้ำอิสระ (free water) หรือน้ำที่อยู่นอกวัสดุชั้น หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Iglesias and Chirife, 1982)

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (2.3)$$

เมื่อ a_w	เป็นวอเตอร์แอคทิวิตี [-]
P	เป็นความดันไอน้ำในวัสดุชั้น [Pa]
P_0	เป็นความดันไอน้ำของน้ำอิสระ [Pa]

เมื่อนำวัสดุขึ้นไปวางอยู่ในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ rh และอุณหภูมิ T วัสดุชิ้นจะมีการดูดหรือคายความชื้นจนกระทั่งถึงจุดสมดุลในสภาพดังกล่าววอเตอร์แอคติวิตีจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ดังสมการ

$$a_w = \frac{rh}{100} \quad (2.4)$$

เมื่อ a_w เป็นวอเตอร์แอคติวิตี [-]
 rh เป็นความชื้นสัมพัทธ์ [%]

เนื่องจากวอเตอร์แอคติวิตีเป็นค่าความดันไอน้ำในผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับความดันไอน้ำของน้ำอิสระ ดังนั้นวอเตอร์แอคติวิตีจึงมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และชีวเคมีของผลิตภัณฑ์

- (1) ผลต่อการเจริญเติบโตของราและแบคทีเรีย เช่น แบคทีเรียส่วนใหญ่ไม่สามารถเติบโตเมื่อค่าวอเตอร์แอคติวิตีของผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำกว่า 0.60
- (2) ผลต่อปฏิกิริยาเอนไซม์เมติก โดยปฏิกิริยาดังกล่าวบางชนิดที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำโดยไม่ต้องถูกกระตุ้นด้วยความร้อนมีการพบว่าปฏิกิริยานี้มีความสัมพันธ์กับ วอเตอร์แอคติวิตีของผลิตภัณฑ์
- (3) ผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผล มีผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าในผลิตภัณฑ์บางชนิด การเปลี่ยนแปลงของการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying)

2.1.1.5 ซอรัชันไอโซเทอม (sorption isotherm)

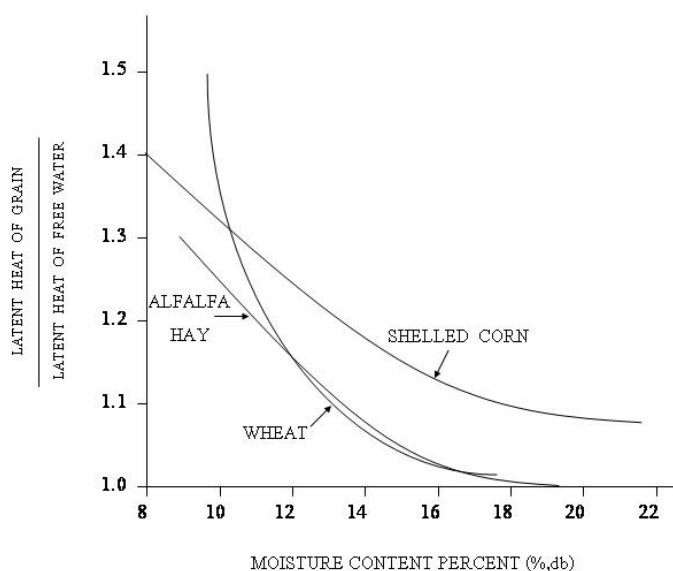
โดยทั่วไป ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์จะมีความสัมพันธ์กับวอเตอร์แอคติวิตี ถ้ากำหนดให้อุณหภูมิคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับวอเตอร์แอคติวิตีจะเรียกว่า ซอรัชันไอโซเทอม (sorption isotherm) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นกราฟรูปซิกมอยด์ (sigmoid) โดยเส้นของอุณหภูมิสูงจะอยู่ด้านล่าง ดังตัวอย่างในกราฟรูปที่ 2.2

ในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถทำได้โดยใช้กรดหรือสารละลายเกลืออิ่มตัว กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) ที่มีความเข้มข้นต่างๆ สามารถควบคุมความชื้นของอากาศระหว่าง 0 ถึง 100 % ได้ โดยความดันไอน้ำของสารละลายกรดจะขึ้นกับความเข้มข้นและอุณหภูมิของกรด โดยทั่วไปไม่นิยมใช้กรดเพราะมีอันตรายและมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ในขณะที่ทำการทดลอง เนื่องจากการเพิ่มหรือลดของความเข้มข้นของกรด

สารละลายเกลืออิมตัวมีความปลอดภัยในการใช้มากกว่าสารละลายกรดและสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ดีกว่าสารละลายกรด เพราะความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลอง เราสามารถใช้เกลือชนิดต่างๆควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 10 – 95 %

2.1.1.6 ความร้อนแฝง (latent heat)

ความร้อนแฝง คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบซึ่งมีค่าขึ้นกับชนิดและความชื้นของวัตถุ ตัวอย่างความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตร แสดงในรูปที่ 2.3



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

ความร้อนแฝงของผลิตภัณฑ์การเกษตรสามารถเขียนในรูปของสูตร เอ็มไพริคัลได้ ดังนี้

$$\frac{L}{L'} = 1 + a \exp(-bM_d) \quad (2.5)$$

เมื่อ L = ความร้อนแฝงของวัตถุดิบ, [J/kg]

L' = ความร้อนแฝงของน้ำ, [J/kg]

M_d = ความชื้นของวัตถุดิบแห้ง [%]

a, b = ค่าคงที่ ขึ้นกับชนิดของวัตถุ

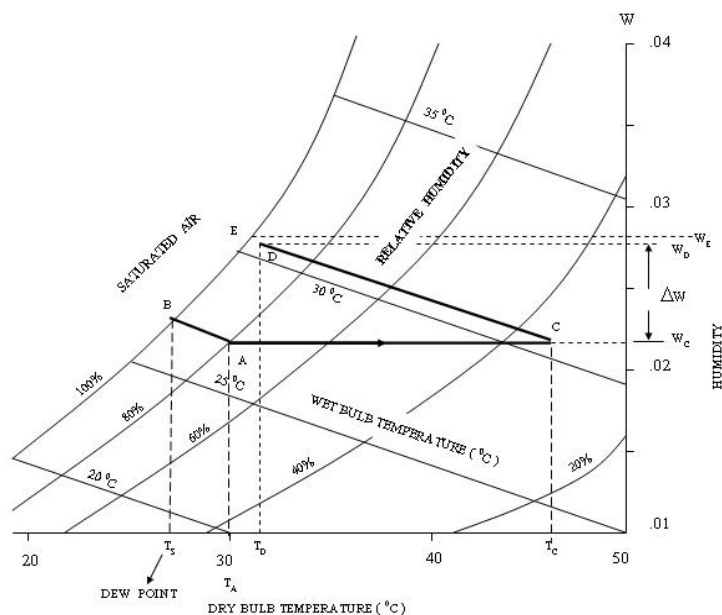
นอกจากนี้ยังมีสมบัติความร้อนอื่นๆ ของวัตถุขึ้นที่มีผลต่อการอบแห้ง เช่น ความร้อนจำเพาะ (specific heat) สภาพนำความร้อน (heat conductivity) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) และพื้นที่ผิวต่อปริมาตรวัตถุ เป็นต้น สมบัติเหล่านี้มักจะขึ้นกับความชื้นของวัตถุ และหาได้โดยการทดลอง

2.1.2 สมบัติของอากาศชื้น (properties of moist air)

อากาศซึ่งใช้เป็นตัวกลางในการพาความร้อนไปสู่วัตถุชื้น และพาความชื้นจากวัตถุนั้นออกมาภายนอก 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) เอนทัลปี (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 ถ้าอากาศร้อนนี้ไปใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลง และความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากอากาศถ่ายเทความร้อนให้กับวัตถุดิบและรับความชื้นจากวัตถุดิบ การเปลี่ยนแปลงของอากาศนี้แทนได้ด้วยเส้นตรง CD ในแผนภูมิอากาศชื้นรูปที่ 2.4

2.1.3 ทฤษฎีการอบแห้ง

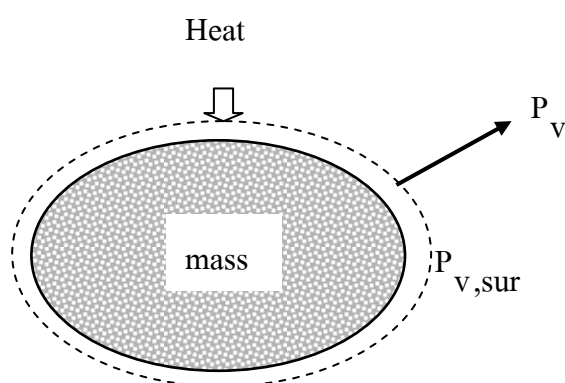
การอบแห้ง เป็นการแยกน้ำออกจากวัตถุดิบ (moist material) โดยการทำให้ น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอโดยอาศัยความร้อน สำหรับการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรมักเป็นการอบแห้งแบบการพาความร้อน (convective drying) โดยจะเป่าอากาศร้อนผ่านผลิตผลที่เป็นวัตถุดิบ ความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทไปยังวัตถุ ทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำในวัตถุจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยออกมา การถ่ายเทมวลของน้ำจากวัตถุดิบไปยังอากาศจะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัตถุเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศ

$$P_{v,sur} = P_v \quad (2.6)$$

โดยที่

$P_{v,sur}$ = ความดันของไอน้ำที่ผิววัตถุ

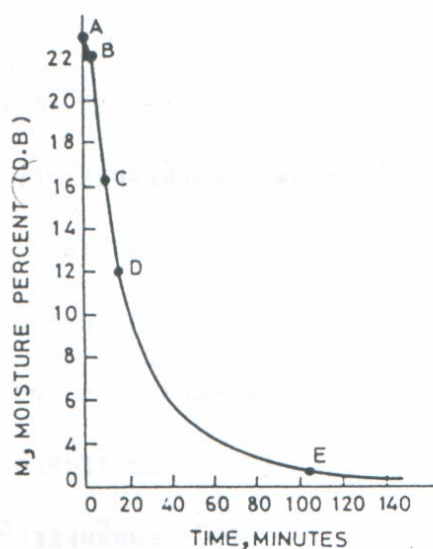
P_v = ความดันไอน้ำในอากาศ



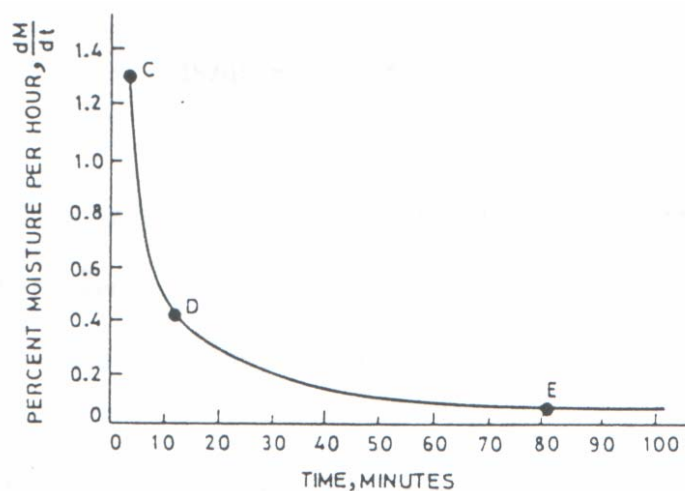
รูปที่ 2.5 แสดงการถ่ายเทมวลและความร้อนในการอบแห้ง (Sodha M.S.,1987)

การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัตถุขึ้นออกมาที่ผิว เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน และขึ้นกับโครงสร้างของวัตถุนั้น 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 แสดงการลดลงของความชื้นในการอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรทั่วไป (Sodha M.S.,1987)



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

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

ในช่วงอัตราการแห้งคงที่การระเหยของน้ำจะเกิดที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ลักษณะการระเหยจะคล้ายกับการระเหยน้ำจากภาชนะ เราสามารถเขียนอัตราการแห้งในช่วงเวลานี้เป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_a - T_{sur}) \quad (2.7)$$

- เมื่อ dM/dt = อัตราการแห้ง, [kg/s]
- h_c = การนำความร้อนของฟิล์มอากาศที่อยู่เหนือผิวผลผลิต
(thermal conductance of air film), [W/m²-K]
- A = พื้นที่ผิวของผลผลิต, [m²]
- L = ความร้อนแฝงของน้ำในผลผลิต, [J/kg]
- T_a = อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง, [°C]
- T_{sur} = อุณหภูมิที่ผิวของผลผลิต, [°C]

สำหรับช่วงที่อัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) โดยทั่วไปเราสามารถเขียนอัตราการแห้งในรูปสมการได้ดังนี้

$$dM/dt = -k(M-M_e) \quad (2.8)$$

- เมื่อ M_e = ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ของผลผลิต
- M = ความชื้นของผลผลิต
- k = ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant)

2.1.4 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการอบแห้ง

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลดลงของความชื้นของวัตถุได้แก่

- 1) อุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูง อัตราการแห้ง (drying rate) จะมีค่าสูงกว่ากรณีของอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ
- 2) ความชื้นสัมพัทธ์ อากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถรับความชื้นที่ถ่ายเทจากวัตถุขึ้นได้มากกว่ากรณีที่อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูง
- 3) ความเร็วอากาศที่ไหลผ่านวัตถุขึ้น ถ้าความเร็วอากาศมีค่าสูงความชื้นจากวัตถุจะถ่ายเทออกมาสู่อากาศได้ดีกว่ากรณีที่อากาศที่อยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ แต่ผลดังกล่าวจะมีค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับผลจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.1.5 ประเภทของการอบแห้ง

การอบแห้งแบบพาความร้อน โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1) การอบแห้งชั้นบาง (thin layer drying)

การอบแห้งแบบนี้ วัสดุชิ้นจะเรียงเป็นชั้นบางๆ หรือเพียงหนึ่งชั้นของเมล็ดพืชกรณีที่การอบเมล็ดพืชแบบชั้นบาง การลดลงของความชื้น สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (2.9)$$

เมื่อ $M(t)$ = ความชื้นขณะเวลา t

M_e = ความชื้นสมดุล

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น

k = ค่าคงที่การอบแห้ง

2) การอบแห้งชั้นหนา (deep bed drying)

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

2.2 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying)

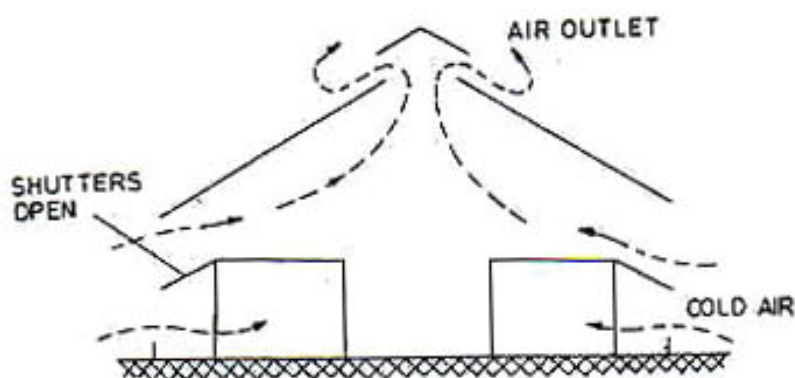
การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการอบแห้งผลผลิตโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปจะอาศัยการพาความร้อน (convective heat transfer) โดยทั่วไปสามารถแบ่งการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนได้เป็น 2 แบบ คือ แบบการไหลตามธรรมชาติ (natural convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงลอยตัวเนื่องจากการพาความร้อน และแบบการไหลเป็นแบบบังคับอากาศ (forced-convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงดันจากพัดลมในการพาความร้อนไปยังผลผลิต นอกจากนี้ยังอาจแบ่งชนิดของการอบแห้งตามวิธีการรับรังสี โดยสามารถแบ่งได้ 4 แบบ ได้แก่ แบบรับรังสีโดยตรง (direct) แบบรับรังสีโดยอ้อม (indirect) แบบผสม (direct-indirect) แบบกรีนเฮาส์ (greenhouse) สำหรับรายละเอียดของเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆจะกล่าวในรายละเอียดตามหัวข้อต่างๆดังนี้

2.2.1 ระบบอบแห้งแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural-convection solar dryer)

ระบบอบแห้งแบบนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

ก. แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง (direct mode)

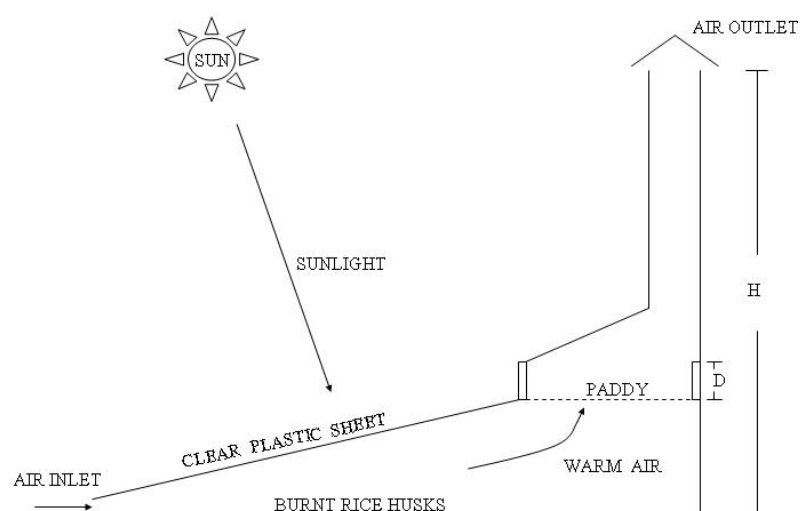
ระบบอบแห้งแบบนี้ รังสีดวงอาทิตย์จะตกลงบนผลผลิตที่ต้องการอบแห้งโดยตรง ความชื้นจากผลผลิตจะถูกพาขึ้นไปด้านบน โดยการไหลของอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ รังสีดวงอาทิตย์จะส่งผ่านวัสดุโปร่งแสง ซึ่งอาจเป็นพลาสติกหรือกระจกก็ได้ แผ่นโปร่งแสงดังกล่าว ทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ทั้งยังป้องกันฝุ่นละออง ฝน และแมลงรบกวนต่างๆด้วย



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

ข. ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode)

ระบบอบแห้งแบบนี้จะมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งทำงานโดยอาศัย การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) อากาศร้อนที่ได้จะลอยตัวและไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง

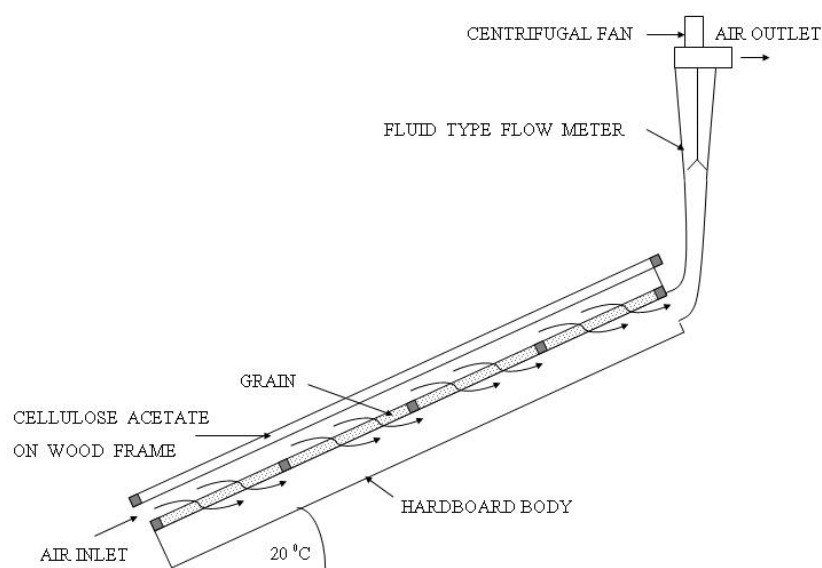


รูปที่ 2.9 ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Sodha M.S., 1987)

2.2.2 ระบบอบแห้งแบบพาความร้อนโดยบังคับอากาศ (forced-convection solar dryer)

ก.แบบรับพลังงานแสงดวงอาทิตย์โดยตรง

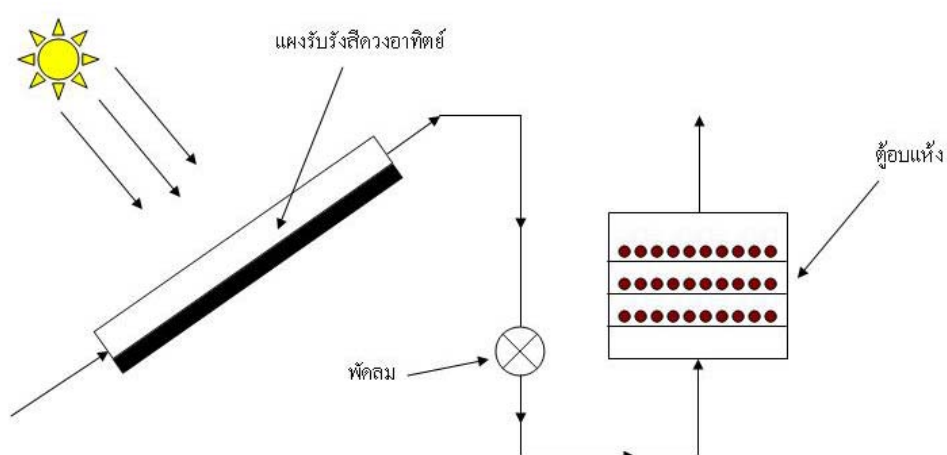
ระบบอบแห้งแบบนี้ ผลผลิตที่ต้องการอบแห้งจะรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง อากาศร้อนจะถูกดูดผ่านผลิตภัณฑ์โดยอาศัยพัดลมดังตัวอย่างในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงและใช้พัดลม
(Sodha M.S., 1987)

ข.แบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (indirect mode)

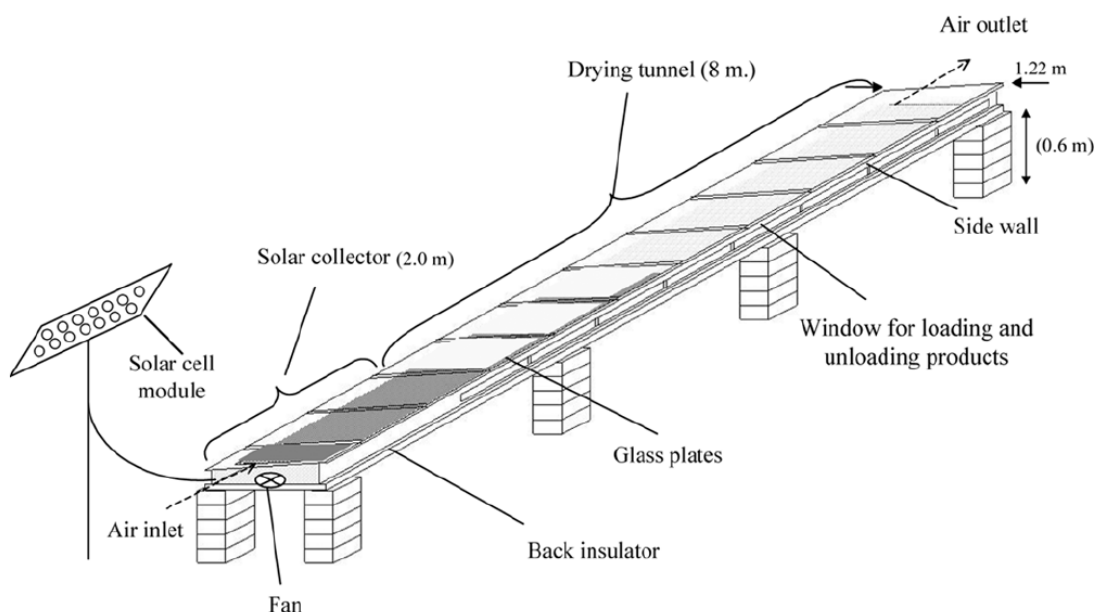
ระบบอบแห้งแบบนี้จะมีแผงรับรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นราบซึ่งทำหน้าที่ผลิตอากาศร้อน แล้วเป่าหรือดูดผ่านส่วนที่บรรจุผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ต่างหากจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงระบบอบแห้งแบบรับพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมดูดอากาศ

ก. แบบผสม

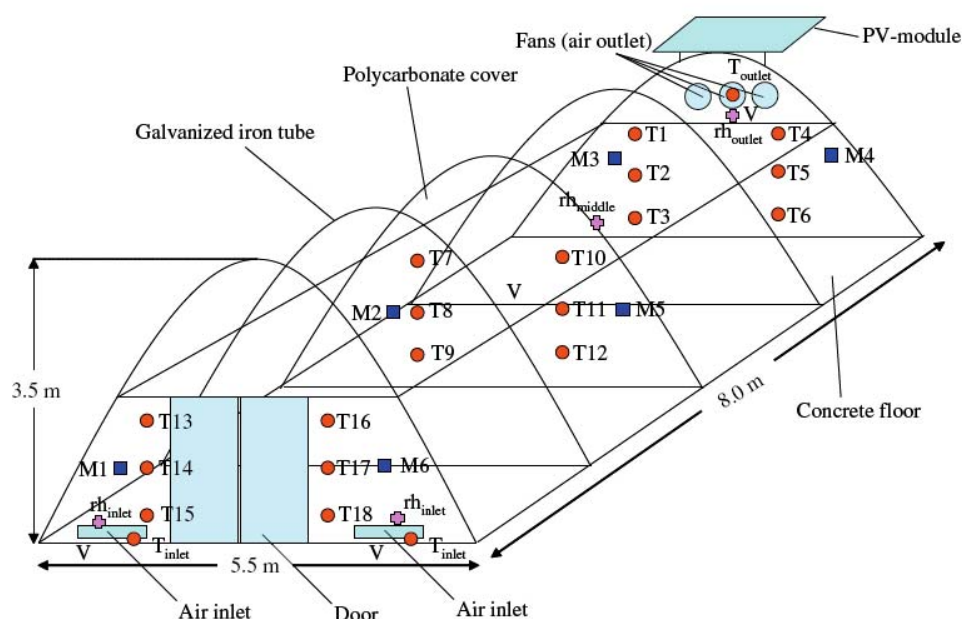
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมนี้ จะประกอบด้วยช่องบรรจุผลิตภัณฑ์และส่วนแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ ตัวอย่างเช่น ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (solar tunnel dryer) โดยผลิตภัณฑ์จะได้รับพลังงานความร้อนทั้งจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์และรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผลิตภัณฑ์โดยตรง และจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีพัดลมเป่าอากาศจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์เข้าไปยังช่องบรรจุผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (Janjai et al., 2009)

ง. ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ (greenhouse solar drying)

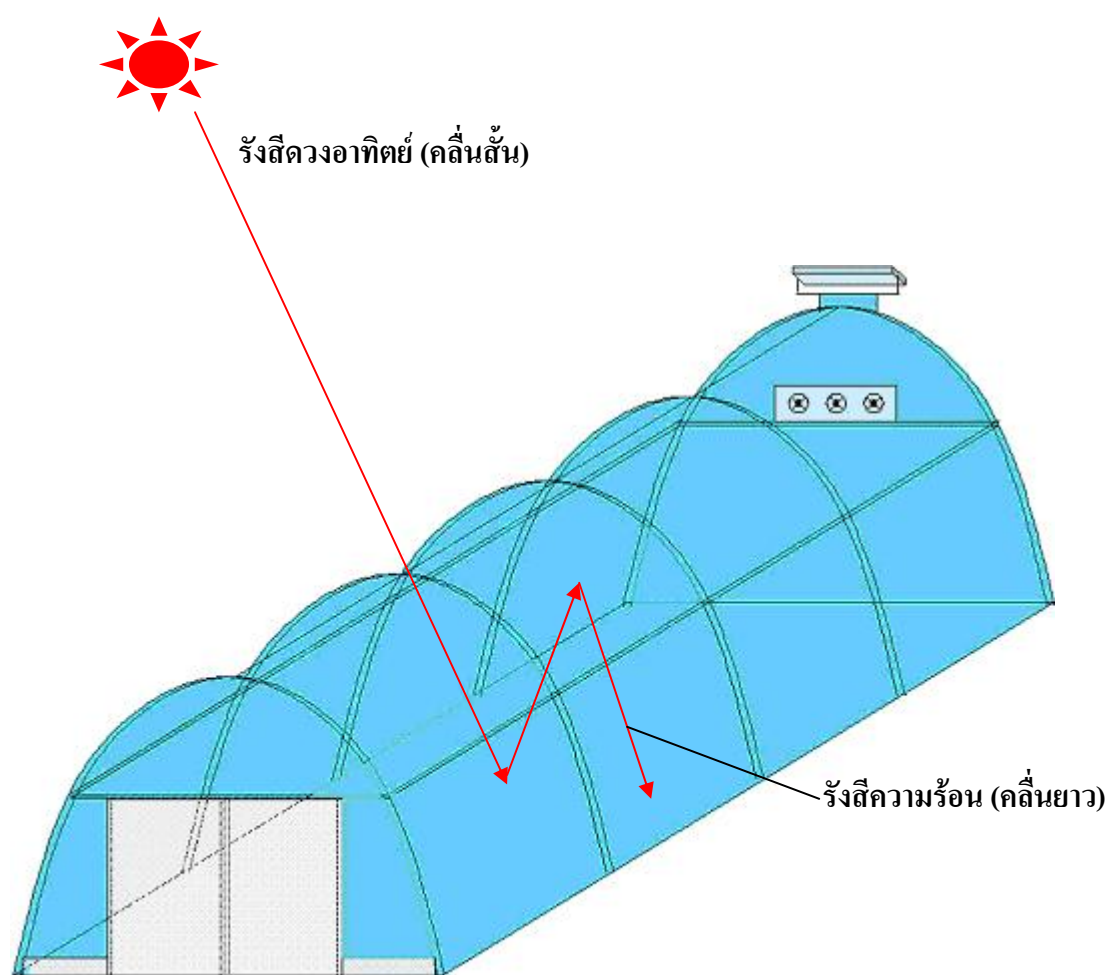
ระบบอบแห้งนี้จะมีลักษณะเป็นโรงเรือน ซึ่งปิดคลุมด้วยวัสดุโปร่งแสง เช่น กระดาษ หรือพลาสติกชนิดต่างๆ เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ส่องผ่านวัสดุดังกล่าวเข้าไปตกกระทบยังผลิตภัณฑ์ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่รังสีดังกล่าวผ่านแผ่นวัสดุโปร่งแสงออกมาได้น้อย ทำให้ความร้อนถูกกักเก็บอยู่ภายใน อุณหภูมิอากาศภายในจึงสูงขึ้น ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้เร็ว โดยความชื้นที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์จะมีพัดลมดูดอากาศเพื่อระบายความชื้นที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์ออกมาสู่ภายนอกแวดล้อมภายนอก ตัวอย่างระบบอบแห้งแบบเรือนกระจกแสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์แบบ ม.ศิลปากร (Janjai et al., 2009)

2.3 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบบนระบบอบแห้งจะส่งผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในชั้นวาง บางส่วนจะตกกระทบบนพื้นของระบบอบแห้ง ทำให้ภายในระบบอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้น และแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา แต่เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีคลื่นยาว ซึ่งส่วนมากไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตออกไปภายนอกได้จึงเก็บกักอยู่ภายในระบบอบแห้ง อุณหภูมิภายในส่วนอบแห้งจึงสูงขึ้น ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมา และถูกพัดลมดูดอากาศด้านหลังของระบบอบแห้งดูดออกไปภายนอก อากาศแวดล้อมจะไหลผ่านช่องระบายอากาศด้านหน้าเข้ามาแทนที่ (รูปที่ 2.14) ความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงค่อยๆ ลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานทั้งจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโดยตรง และจากอากาศร้อนภายในส่วนอบแห้ง ดังนั้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วกว่าการตากแดดโดยวิธีธรรมชาติ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ภายในระบบอบแห้งยังไม่ถูกรบกวนจากสิ่งสกปรกและการเปียกฝนด้วย

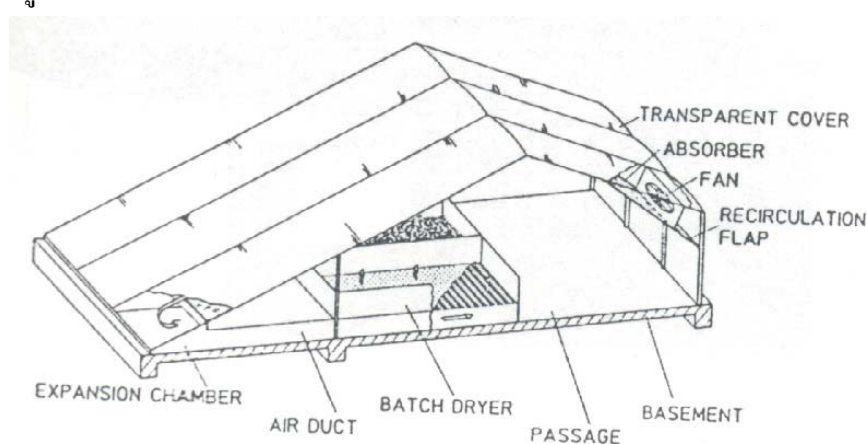


รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์

2.4 งานวิจัยและการพัฒนาระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์

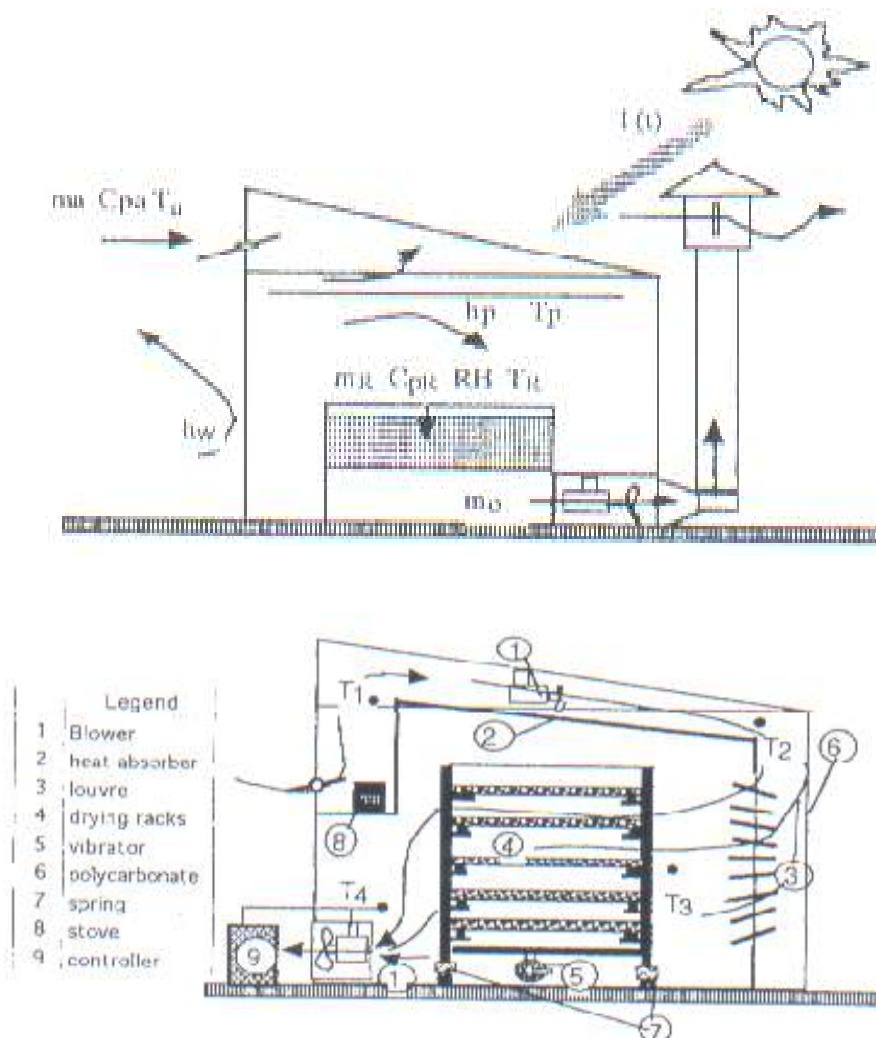
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยในเรื่องเกี่ยวกับระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

Muller และคณะ (1989) ได้พัฒนาระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ขึ้นเพื่อใช้ในการอบแห้งสมุนไพร ระบบอบแห้งดังกล่าวคลุมด้วยแผ่นพลาสติก และสามารถใช้งานได้ถึง 5 ปี โดยโครงสร้างจะแบ่งเป็นส่วนๆ แต่ละส่วนได้ติดตั้งพัดลมเพื่อทำให้อากาศภายในเกิดการไหลเวียน ระบบอบแห้งนี้มีขนาด 4 x 15 ตารางเมตร และมีความยาวตามความเหมาะสมในการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์กรีนเฮาส์สำหรับใช้อบแห้งสมุนไพร
ที่พัฒนาโดย Muller และคณะ (1989)

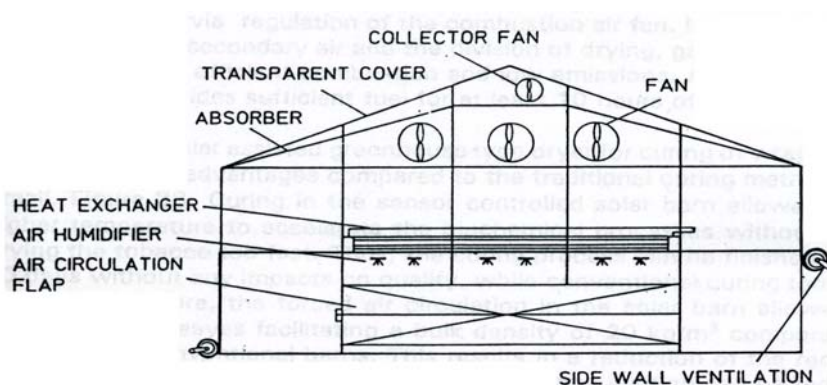
Kamaruddin และคณะ (1996) ได้พัฒนาระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นฉนวนโปร่งแสงขึ้นสองรูปแบบ คือแบบที่มีแผงดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์และแบบไม่มีแผงดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และได้ทำการศึกษาสมรรถนะระบบอบแห้งดังกล่าวโดยใช้อบแห้งผลผลิตต่างๆ เช่น กาแฟ โกโก้ เมล็ดวานิลลา (vanilla pods) และพบว่าระบบอบแห้งดังกล่าวมีสมรรถนะเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐกิจอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยระบบอบแห้งใช้แผงดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์จะมีราคาแพงกว่า เครื่องอบดังกล่าวมีพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ 107 m² สามารถอบกาแฟได้ปริมาณมากถึง 1.1 ตัน จากความชื้นเริ่มต้น 63.2 % เมื่ออบเสร็จแล้วจะเหลือความชื้นสุดท้าย 11.3% และมีอัตราการไหล 0.57 kg/s



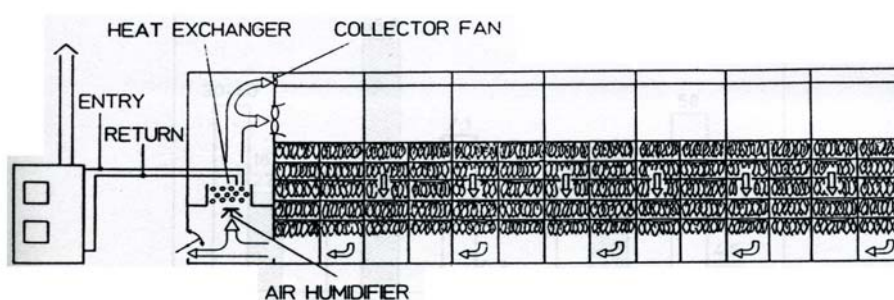
รูปที่ 2.16 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนา

โดย Kamaruddin และคณะ (1996)

Bux และคณะ (1996) ได้สร้างระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์เพื่อใช้บ่มใบยาสูบดังแสดงในรูปที่ 2.17 ระบบอบแห้งนี้นอกจากจะใช้บ่มใบยาสูบแล้วยังสามารถใช้อบวัสดุอย่างอื่นได้เช่น ไม้ เครื่องหนัง ในตัวระบบอบแห้งประกอบด้วย หลังคาทำหน้าที่เป็นแผงรับรังสีดวงอาทิตย์ (solar air heater) มีแหล่งความร้อนเสริมและใช้พัดลม 5 ตัว แต่ละตัวมีกำลังไฟฟ้า 500 วัตต์ ทำหน้าที่เป่าให้อากาศไหลเวียน

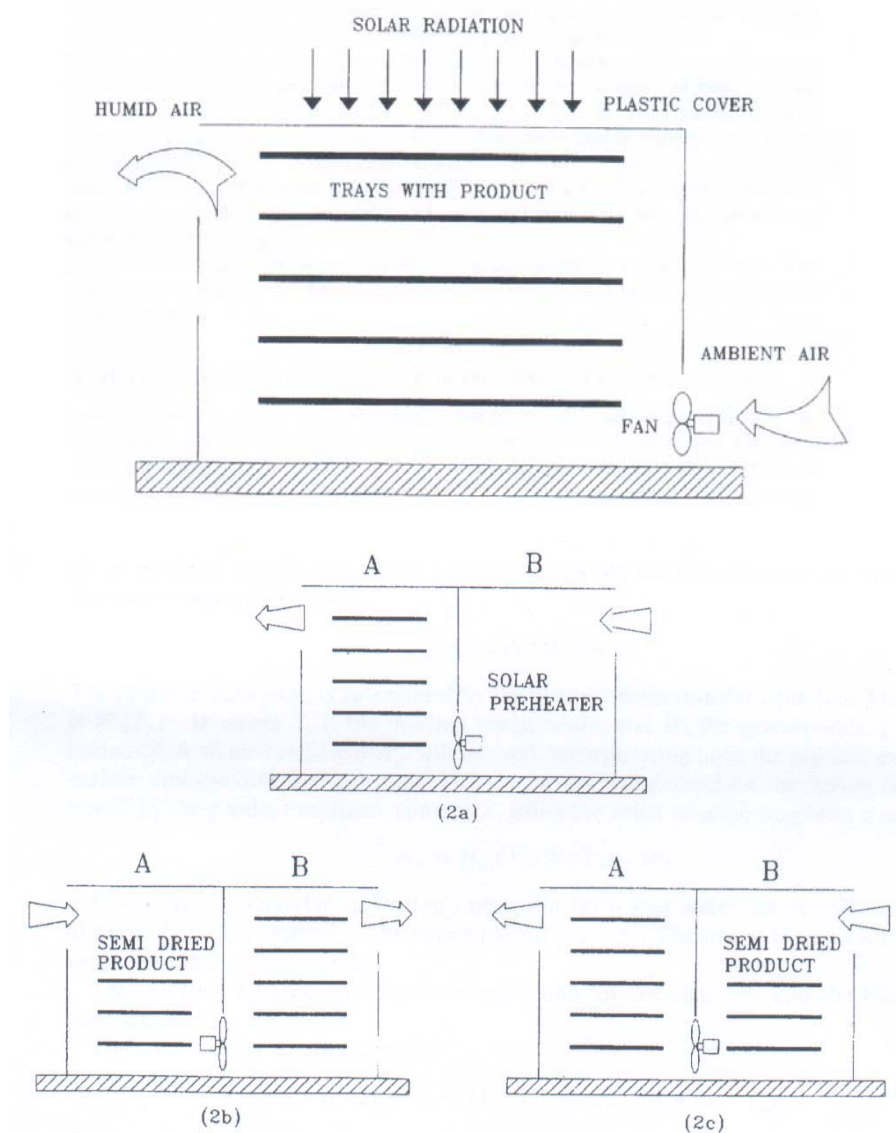


Cross section of the solar heated curing barn



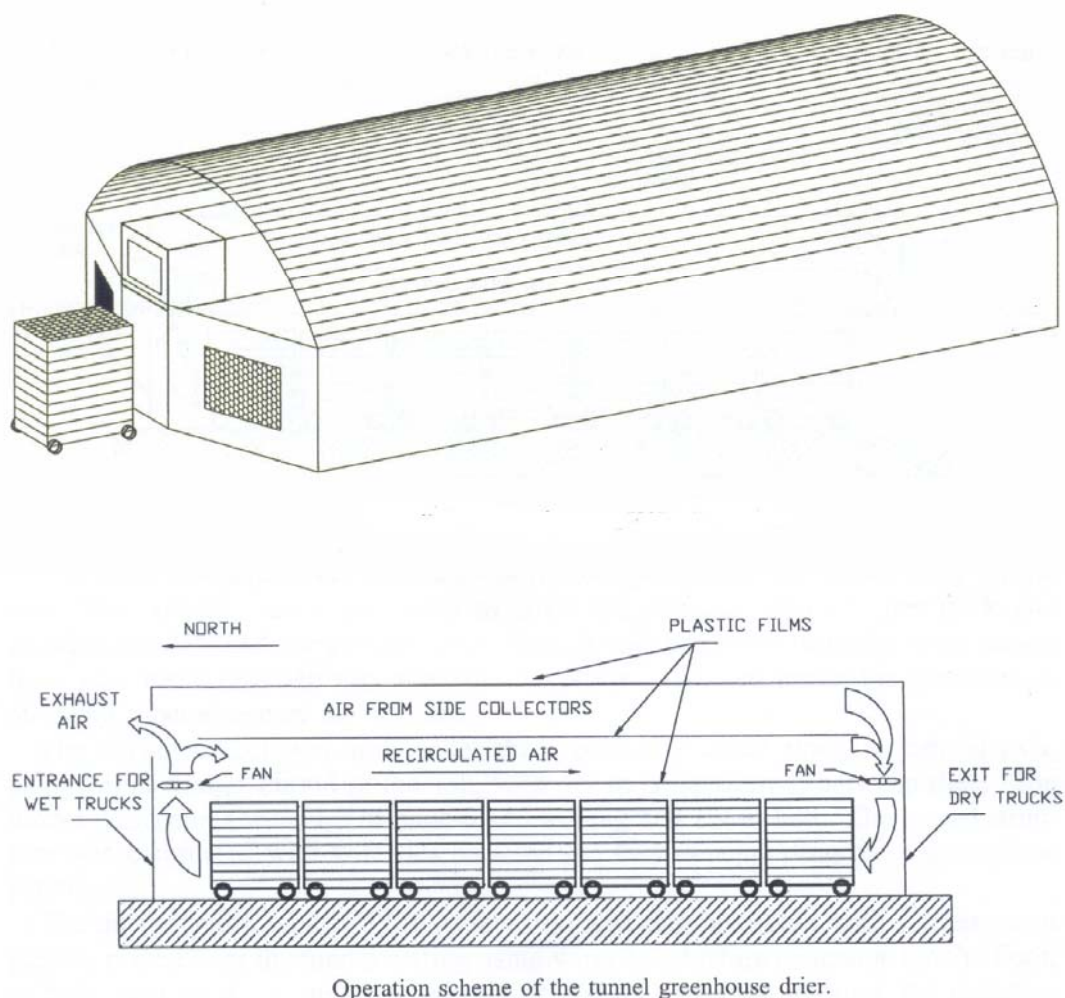
รูปที่ 2.17 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Bux และคณะ (1996)

Miguel และ Lui (1998) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้พลาสติกเป็นฉนวนโปร่งแสงที่มีพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์รวม 50 ตารางเมตร ซึ่งทำงานด้วยการพาความร้อนแบบบังคับ รูปแบบโครงสร้างของระบบอบแห้งมี 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จากการศึกษาสมรรถนะระบบอบแห้งดังกล่าว พบว่า ระบบอบแห้งแบบห้องเดี่ยวสามารถใช้อบแห้งผลิตผลได้ 200 กิโลกรัม เมื่ออบเสร็จแล้วเหลือผลิตผล 187 กิโลกรัม โดยใช้เวลา 110 ชั่วโมง สำหรับ ห้องอบคู่จะใช้เวลา 53 ชั่วโมง โดยระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ทำเป็นห้องคู่จะมีสมรรถนะเชิงเทคนิคดีกว่าแบบห้องเดี่ยว



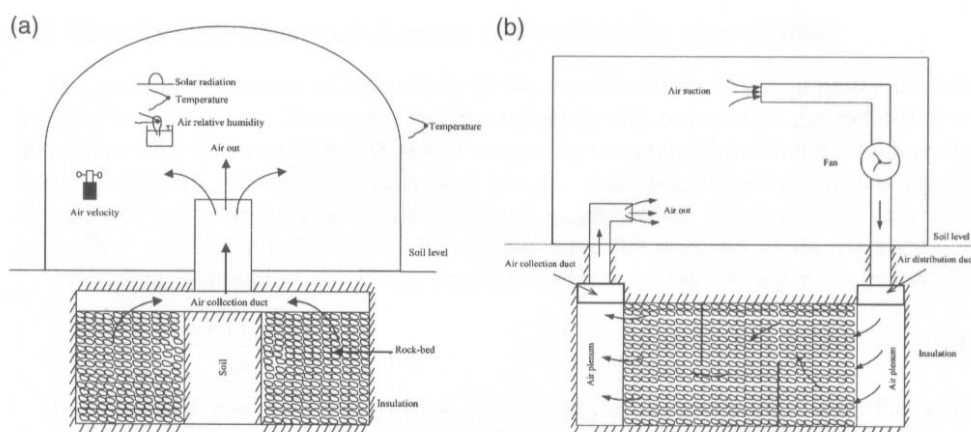
รูปที่ 2.18 รูประบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์แบบห้องเดียว และห้องคู่ที่พัฒนาโดย Miguel และ Lui (1998)

Condori และ คณะ (2000) ได้พัฒนาระบบอบแห้งอุโมงค์ลมแบบกรีนเฮาส์ขึ้น โดยได้ทำการทดลองอบพริกไทยหวาน (sweet pepper) และกระเทียม ระบบอบแห้งนี้มีขนาด $7 \times 13 \times 3.7 \text{ m}^3$ และมีโครงสร้างเป็นรูปกึ่งทรงกระบอก วางตามทิศตะวันออกเฉียงเหนือและคลุมด้วยพลาสติกใสหนา $150 \text{ }\mu\text{m}$ ดังรูป 2.19



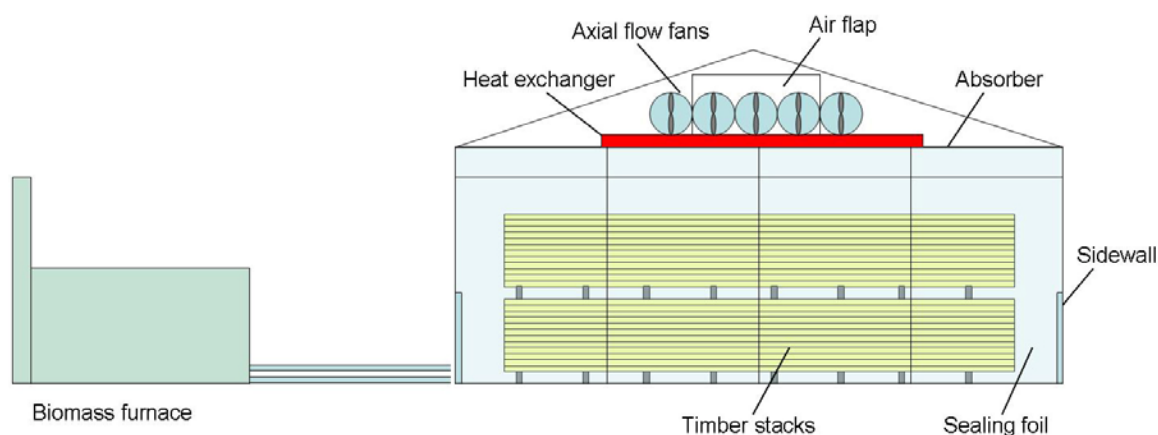
รูปที่ 2.19 รูปภาพภายนอกและภายในของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่
พัฒนาโดย Condori และคณะ (2000)

Kurlu และคณะ (2003) ได้ออกแบบและสร้างระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์โดยใช้พลาสติก polyethylene เป็นฉนวนโปร่งแสงและหนา 0.2 mm มีพื้นที่รวม 15 m² ซึ่งพื้นบรรจุด้วย rock bed เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แล้วคายความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.20 และใช้พัดลมขนาด 1.1 kw และมีอัตราการไหล 1100 m³/h เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศภายในได้ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก 10°C ในช่วงเย็น และการรับรังสีดวงอาทิตย์ของระบบอบแห้งมีประสิทธิภาพ 34 %



รูปที่ 2.20 ระบบอบแห้งแบบอุโมงค์ลมแบบกรีนเฮาส์ที่ใช้ rock bed ดูดกลืนและ
สะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Kurlu และคณะ (2003)

ระบบอบแห้งไม้แบบกรีนเฮาส์พัฒนาโดย Hohenheim University (Bauer, 2003) มีโครงสร้างคล้ายกับบ้าน ซึ่งมีหลังคาเป็นจั่ว และปิดคลุมทุกด้านด้วยพลาสติกแบบมีโพรงอากาศอยู่ภายใน (bubble foil) ด้านใต้หลังคาจะเป็นผ้าใบสีดำ เพื่อใช้ดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ และมีพัดลมไฟฟ้าช่วยเป่าอากาศผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์กับหลังคาและไหลเข้าไปในส่วนบรรจุผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ด้านล่าง อากาศบางส่วนจะถูกเป่าออกไปภายนอกทางช่องอากาศด้านหน้า ระบบอบแห้งแบบนี้จะใช้ความร้อนจากน้ำร้อนที่ได้จากหม้อต้มไอน้ำที่ทำงานโดยอาศัยเตาเผาชีวมวล ซึ่งอยู่ภายนอกระบบอบแห้ง นอกจากนี้ยังมีระบบควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งแบบอัตโนมัติ สำหรับความจุจะมีขนาดตั้งแต่ 40 ลูกบาศก์เมตร จนถึง 200 ลูกบาศก์เมตร ปัจจุบันมีการใช้งานที่ประเทศบราซิล อาร์เจนตินา และเยอรมัน ลักษณะของระบบอบแห้งดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ของ Hohenheim University (Bauer, 2003)

Koyuncu และ คณะ(2005) ได้พัฒนาระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ สร้างให้มีลักษณะเป็น ชั้นบันได โดยจะมีทั้งหมด 7 ชั้น แบ่งเป็นซ้ายและขวาอย่างละ 3 ชั้น และตรงกลางอีก 1 ชั้น มีพื้นที่ ส่วนอบ 1 m^2 โดยแผ่นคูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์จะวางอยู่บนฉนวนที่มีความหนา 5 cm โดยที่ช่อง อากาศเข้ามี 2 ช่อง ช่องแรกอยู่ด้านหน้า ช่องสองอยู่ด้านหลัง โดยช่องอากาศเข้ามีขนาด $1.5 \times 175 \text{ cm}^2$ และช่องอากาศออกขนาด $5 \times 20 \text{ cm}^2$ อยู่ด้านบนของระบบอบแห้ง โดยตัวระบบอบแห้งจะปิด คลุมด้วยแผ่นพลาสติก

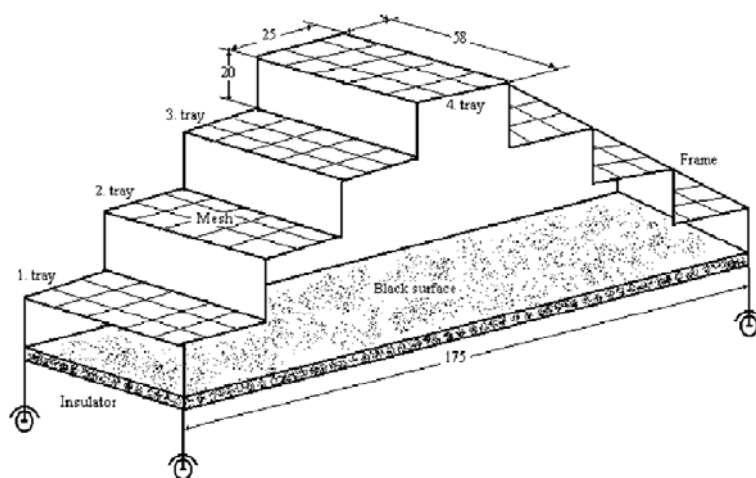


Fig. 3. Schematic presentation of M-II.

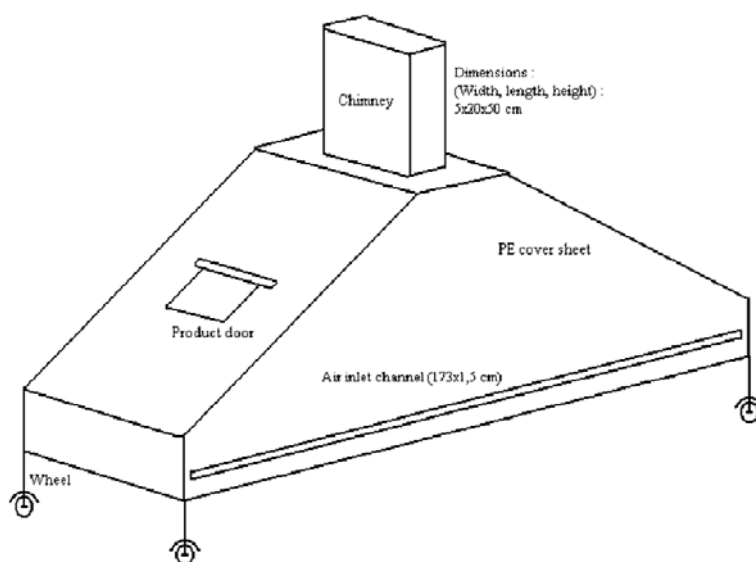
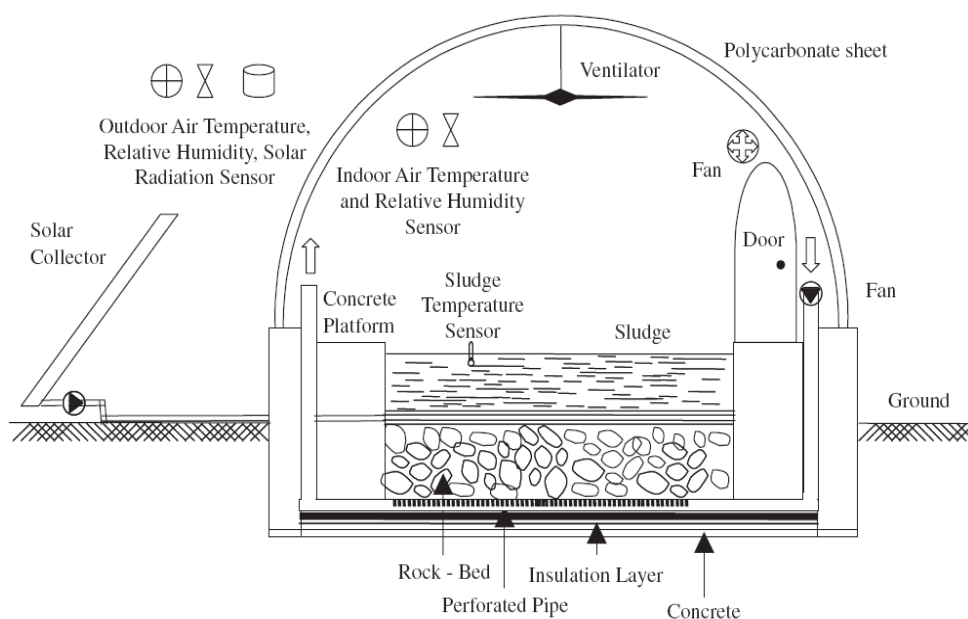


Fig. 4. A simple presentation of M-II.

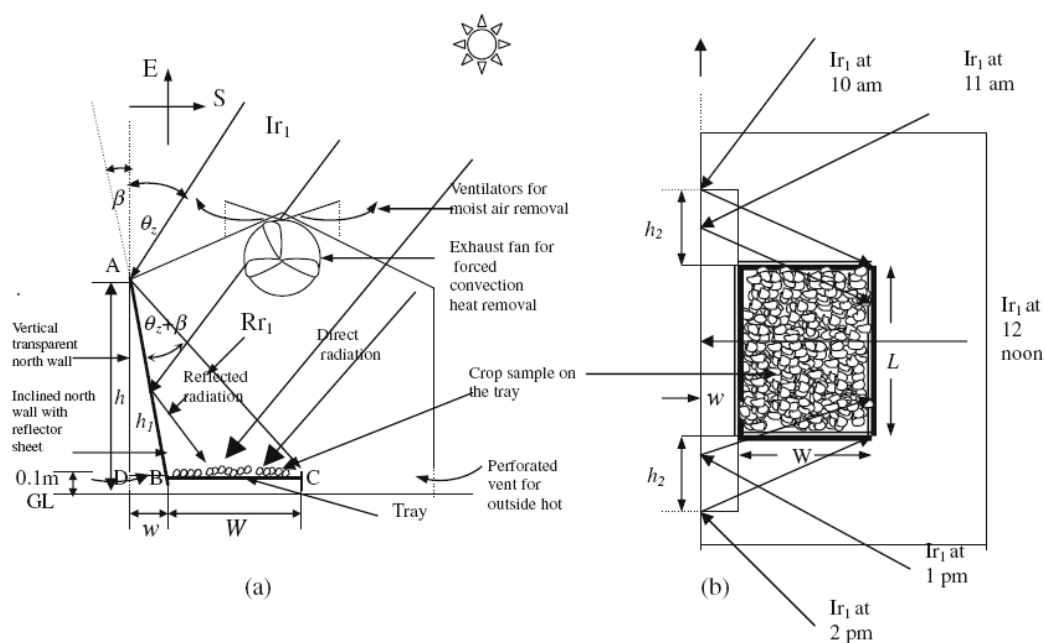
รูปที่ 2.22 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ที่พัฒนาโดย Koyuncu และ คณะ (2005)

Salihoglu และคณะ (2006) ได้พัฒนาระบบอบแห้งแบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ โดยโครงสร้างรูปทรงพาราโบลาและปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต โดยใช้พัดลมดูดอากาศขนาด 12 วัตต์ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีอัตราการไหล $90 \text{ m}^3/\text{h}$ ดูดอากาศขึ้นภายในเครื่องออกมาภายนอก ระบบอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่ฐานขนาด 2×5 ตารางเมตร สูง 2.5 เมตร พื้นบรรจุด้วย rock bed เพื่อทำหน้าที่ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.23 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ ที่ใช้ rock bed ดูดกลืนและสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาโดย Salihoglu และคณะ (2006)

Sethi และ Sadhna Arora (2009) ได้สร้างระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ขนาด 4×6 ตารางเมตร โดยอาศัยหลักการสะท้อนจากแผ่นสะท้อนที่อยู่ภายในระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ โดยใช้แผ่นสะท้อนที่มีความหนา 50 ไมโครเมตร



รูปที่ 2.24 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่อาศัยหลักการสะท้อน

พัฒนาโดย Sethi และ Sadhna Arora (2009)

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



รูปที่ 2.25 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2007)

Janjai และคณะ (2009) ได้พัฒนาระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต ซึ่งสามารถถอดประกอบได้ โดยใช้พัดลมดูดอากาศขนาด 14.4 วัตต์ จำนวน 3 ตัวต่อโซลาร์เซลล์ขนาด 50 วัตต์ 1 แผง ซึ่งใช้ในการดูดอากาศขึ้นภายในระบบอบแห้งให้ออกมาภายนอก ระบบอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่ฐานขนาด 5.5 x 8 ตารางเมตร สูง 3.5 เมตร สามารถบดลองกองและกล้วยได้ประมาณครั้งละ 300 กิโลกรัม โดยในงานวิจัยนี้สามารถอบกล้วยให้แห้งได้ภายในเวลา 3 วัน ซึ่งต่างจากการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลานานกว่าประมาณ 5 – 6 วัน

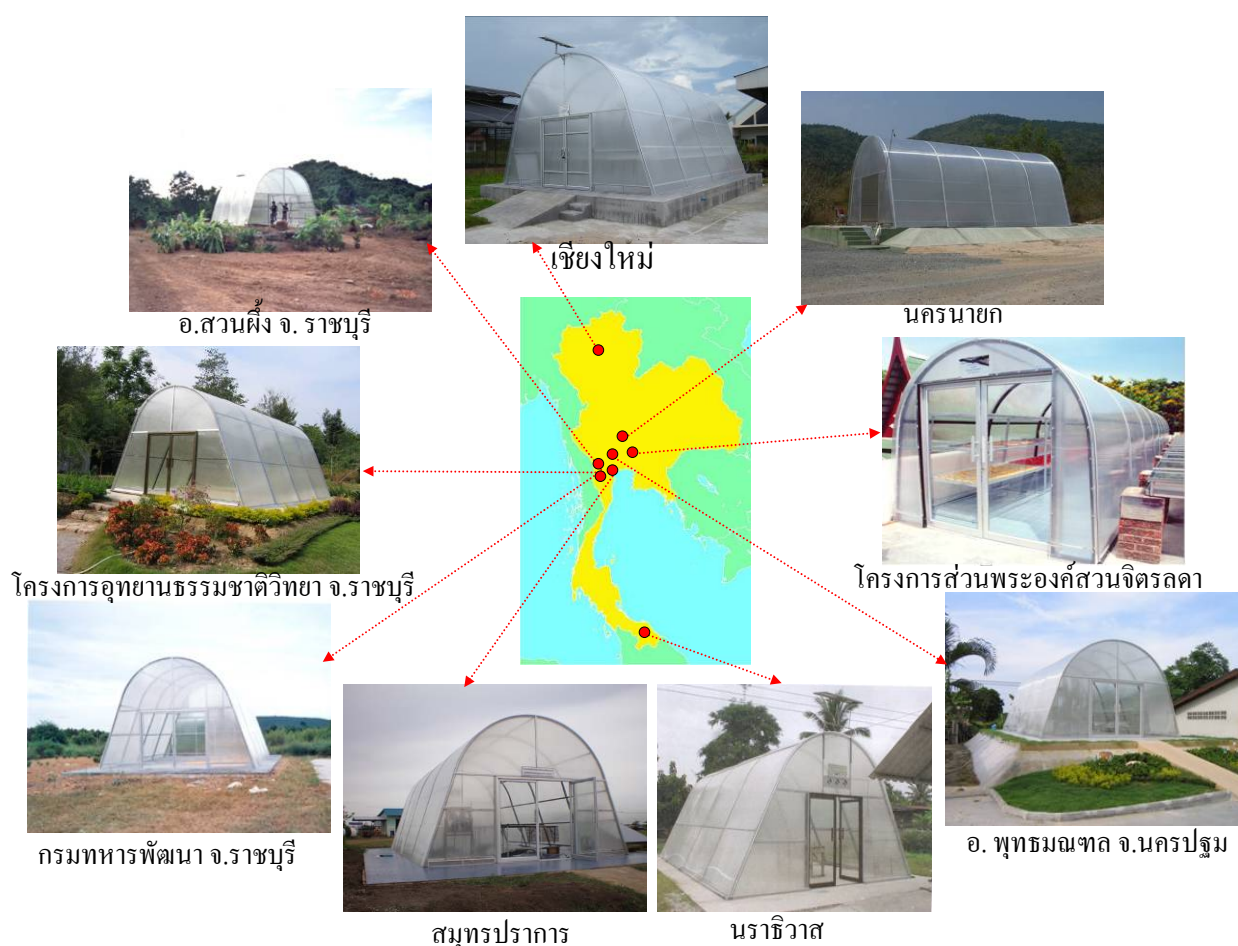


รูปที่ 2.26 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่สามารถถอดประกอบได้
พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2009)

ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่พัฒนาโดย Janjai และคณะ (2007) และ Janjai และคณะ (2009) ได้นำไปติดตั้งใช้งานหลายแห่ง (Janjai et al., 2006) ดังรูปที่ 2.27 โดยสามารถใช้งานอบแห้งผักและผลไม้ได้ครั้งละ 100 – 300 กิโลกรัม และใช้งานได้ดีในช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว แต่ในช่วงฤดูฝนไม่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง นอกจากนี้ ผู้ประกอบการบางแห่งยังเห็นว่าระบบอบแห้งนี้ยังมีความจุไม่เพียงพอต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้น หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากรจึงร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานทำการพัฒนาระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่มีความจุประมาณ 1,000 กิโลกรัม และอุปกรณ์ให้ความร้อน

เสริมเพื่อให้สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องในช่วงฤดูฝน และนำไปติดตั้งใช้งานที่ วิชาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม ตั้งอยู่ที่ 65 หมู่ 5 ต.คอนตูม อ.บางเลน จ.นครปฐม ที่โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมการเกษตรเขาค้อ จำกัด ตั้งอยู่ที่หมู่ที่ 1 สี่แยกกรีนฤดี ตำบลสะเดาะพงษ์ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ และที่องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะทำการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งดังกล่าว พร้อมทั้งได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายสมรรถนะของระบบอบแห้งดังกล่าวตามรายละเอียดในบทที่ 3 และ บทที่ 4



รูปที่ 2.27 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่นำไปติดตั้งใช้งานในจังหวัดต่างๆ

บทที่ 3

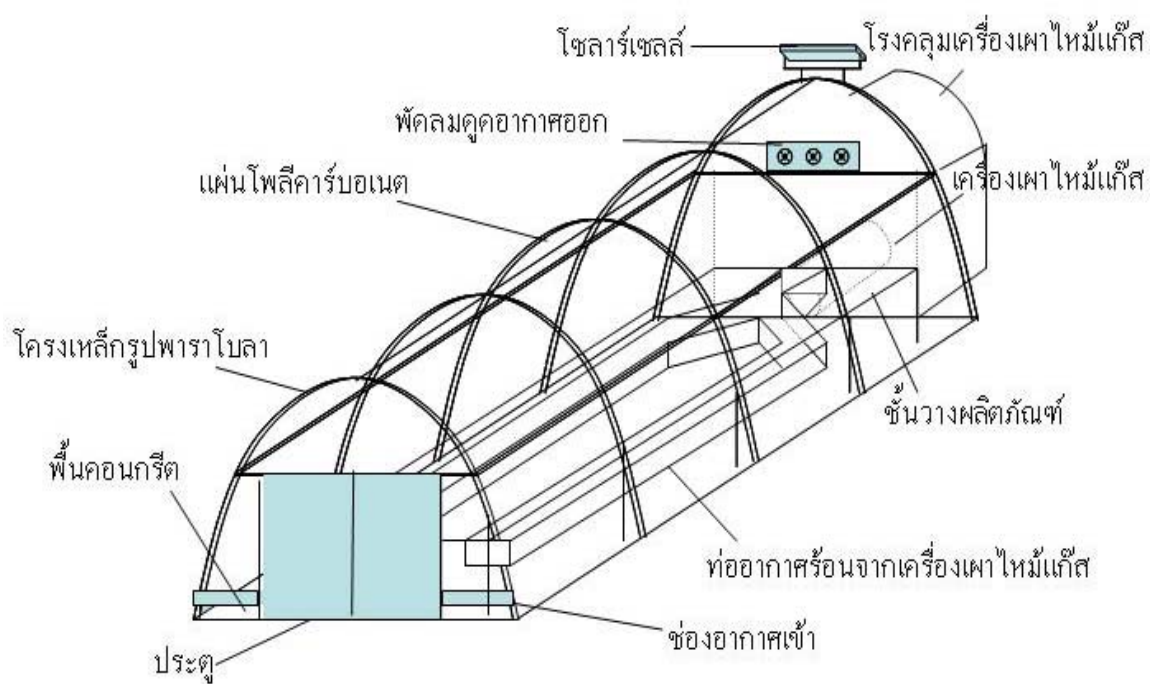
การดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์และการศึกษาสมรรถนะของระบบอบแห้งดังกล่าว

3.1 โครงสร้างของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ขนาดใหญ่ที่มีระบบให้ความร้อนเสริม

ระบบอบแห้งดังกล่าวมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงแบบพาราโบลา ปิดคลุมทุกด้านด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต เพื่อช่วยทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ระบบอบแห้งนี้มีขนาดพื้นที่ฐาน 8.0×20.0 ตารางเมตร และสูง 4.5 เมตร โดยโครงหลังคาของระบบอบแห้งซึ่งมีลักษณะเป็นเหล็กโค้งรูปพาราโบลา จำนวน 11 ชิ้น โดยใช้เหล็กทอกลมแต่ละชิ้นจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ยาว 6 เมตร ซึ่งยึดติดกับเสาเหล็กยาว 2.9 เมตร จำนวน 22 ท่อน ทำเสาเหล็กดังกล่าวและยึดติดกับฐานคอนกรีต ด้านข้างมีเหล็กยึดติดกับโครงเหล็กพาราโบลา เพื่อเสริมความแข็งแรงและทำหน้าที่เป็นโครงสำหรับยึดแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้วยด้านหน้ามีประตูกระจกสำหรับนำผลิตภัณฑ์เข้าออกและมีช่องระบายอากาศ ส่วนด้านหลังมีพัดลมระบายอากาศเพื่อดูดอากาศขึ้นภายในระบบอบแห้งออกสู่อากาศแวดล้อมภายนอก พัดลมดังกล่าวใช้กำลังไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 50 วัตต์จำนวน 3 แผง ระบบอบแห้งดังกล่าวมีระบบให้ความร้อนเสริมซึ่งเป็นเครื่องเผาไหม้แก๊สขนาด 100 กิโลวัตต์ ติดตั้งอยู่ด้านหลังภายในโรงคลุม และมีท่อนำอากาศร้อนเข้าไปภายในระบบอบแห้งซึ่งภายในมีชั้นวางและตะแกรงวางผลิตภัณฑ์ รวมพื้นที่สำหรับวางผลิตภัณฑ์ประมาณ 100 ตารางเมตร ลักษณะและโครงสร้างของระบบอบแห้งแสดงดังรูปที่ 3.1 – 3.8

โดยที่ระบบอบแห้งดังกล่าวติดตั้งอยู่ที่ วิสาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม ตั้งอยู่ที่ 65 หมู่ 5 ต.คอนตูม อ.บางเลน จ.นครปฐม ที่โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมกรรมการเกษตรเขาคือ จำกัด ตั้งอยู่ที่หมู่ที่ 1 ต.แยกรื่นฤดี ตำบลสะเคาะพงษ์ อำเภอเขาคือ จังหวัดเพชรบูรณ์ และที่ องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์



รูปที่ 3.2 ชั้นวางผลิตภัณฑ์และท่ออากาศภายในระบบบอบแห้ง



รูปที่ 3.3 เครื่องเผาไหม้แก๊ส



รูปที่ 3.4 พัดลมไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12V ใช้กระแส 1.2 A



รูปที่ 3.5 โซลาร์เซลล์ที่ใช้กับระบบอบแห้ง



รูปที่ 3.6 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่ วิสาหกิจชุมชนตำบลคอนตูมตูม อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 3.7 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมการเกษตรเขาค้อ จำกัด อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์



รูปที่ 3.8 ระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง
จังหวัดอุบลราชธานี

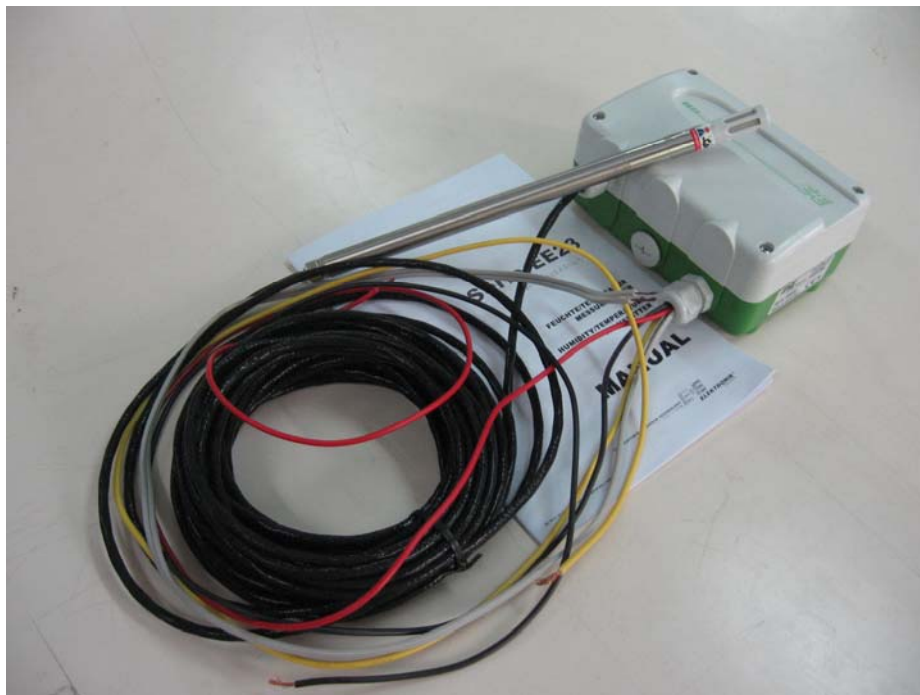
3.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งทั้ง 3 แห่ง โดยใช้วิธีการเหมือนกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 อุปกรณ์การวัดและบันทึกข้อมูล

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้ง จะใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) สายเทอร์โมคอปเปิลชนิดเค (K-type thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศในระบบอบแห้ง
- 2) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ (hygrometer) ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 B สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ
- 3) เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศแบบฮ็อตไวร์ (hot wire anemometer) ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5
- 4) แอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าสำหรับหาค่ากำลังไฟฟ้าของพัดลม
- 5) เครื่องวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (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 3.9 ภาพถ่ายเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ยี่ห้อ Elektronik รุ่น EE23 B



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายเครื่องวัดความเร็วลมแบบ hot wire ยี่ห้อ Airflow รุ่น TA5



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CM11



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายเครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DC100



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายตู้อบไฟฟ้ายี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEMP



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายเครื่องวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

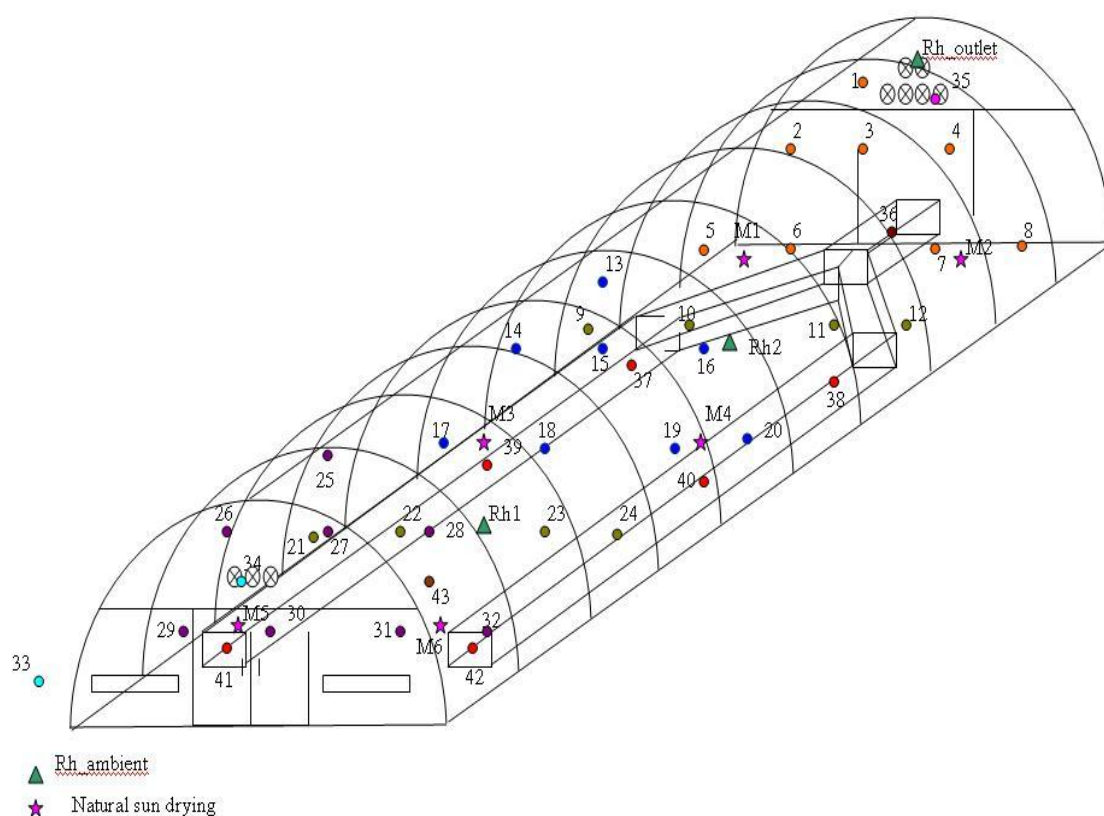


รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายเครื่องวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ KERN รุ่น 474-42

ในการดำเนินการทดลองทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งจำเป็นต้องทราบข้อมูลต่างๆ ดังเช่น ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิในระบบอบแห้ง อุณหภูมิขาออก มวลตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลของอากาศ ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และอัตราการไหลของอากาศ จะอ่านค่าจากอุปกรณ์ต่างๆ ทุกๆ 1 ชั่วโมง ส่วนมวลตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ จะชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมง สำหรับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิในเครื่องอบ อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากระบบอบแห้งออก ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องอบ และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งจะถูกบันทึกโดย data logger ทุกๆ 10 นาที โดยตำแหน่งของหัววัดต่างๆ แสดงไว้ตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (T คือจุดวัดอุณหภูมิ, Rh คือจุดวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและ M คือ จุดวัดมวลของตัวอย่าง

3.2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ที่วิสาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม อ.บางเลน จ.นครปฐม จะทำการอบแห้งมะเขือเทศแช่เย็นครั้งละ 1,000 กิโลกรัม จำนวน 3 ครั้ง สำหรับโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมการเกษตรเขาค้อ จำกัด อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ จะทำการอบแห้งกล้วยแผ่นครั้งละ 200 กิโลกรัม จำนวน 3 ครั้ง กรณีของระบบอบแห้งที่องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี จะทำการอบแห้งพริกครั้งละ 500 กิโลกรัม จำนวน 3 ครั้ง โดยการทดลองแต่ละแห่งจะมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ที่จะอบ และตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งในเครื่องอบแห้งและที่ตากแดดตามธรรมชาติ โดยทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมง
- 2) นำผลิตภัณฑ์วางเป็นชั้นบางบนตะแกรงในระบบอบแห้ง
- 3) บันทึกข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ทุกๆ 1 ชั่วโมง
- 4) ปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอยู่ในระบบอบแห้งทั้งในช่วงกลางวันและกลางคืน
- 5) ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 – 4 จนกว่าผลิตภัณฑ์จะแห้งตามต้องการ
- 6) นำตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้ง

ในการหาความชื้นของผลิตภัณฑ์จะใช้สมการ

$$M(t) = \frac{m_p(t) - m_s}{m_p(t)} \quad (3.1)$$

โดย $M(t)$ = ความชื้นมาตรฐานเปียกที่เวลาใดๆ, [%wb]
 $m_p(t)$ = มวลของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใดๆ, [kg]
 m_s = มวลแห้งของผลิตภัณฑ์, [kg]

3.2.3 วิชาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม

การอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่ม ณ วิชาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม นั้นก่อนจะนำมาอบแห้งต้องผ่านกระบวนการแช่อิ่มก่อน โดยจะทำการคัดเลือกมะเขือเทศที่สุกก่อน หลังจากนั้นก็นำมะเขือเทศมาหั่นแบ่งครึ่งและทำการแช่น้ำปูนใสเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อให้มะเขือเทศมีความสดมากขึ้น เมื่อแช่น้ำปูนใสเสร็จก็จะนำมาแช่ในน้ำตาลต่อเป็นระยะเวลา 2 วันในการเตรียมมะเขือเทศก่อนตาก หลังจากผ่านกระบวนการแช่อิ่มเสร็จแล้วก็จะนำมะเขือเทศมาอบแห้ง ซึ่งผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่มจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 1,000 กิโลกรัม การทดลองได้นำมะเขือเทศแช่อิ่มใส่ตะแกรงแล้วนำไปวางในระบบอบแห้งในตอนเช้า เริ่มทำการบันทึกข้อมูลและชั่งน้ำหนักมวลตัวอย่างตั้งแต่วันที่ 8.00 น. จนถึงเวลา 18.00 น. ตอนเย็นไม่ต้องทำการเก็บให้มะเขือเทศแช่อิ่มอยู่ในระบบอบแห้งตลอดเวลา ตอนเช้าของวันต่อไปให้เริ่มทำการบันทึกข้อมูลและชั่งน้ำหนักมวลตัวอย่างเหมือนกับวันแรก โดยความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่มก่อนอบแห้งนั้นมีประมาณ 50% - 55% (wb) และเมื่อทำการอบแห้งเสร็จจะเหลือความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่มเพียง 10% - 20% (wb) ซึ่งตรงกับความต้องการของผู้ผลิต โดยรายละเอียดของการทดลองมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.18 การอบแห้งมะเขือเทศแช่อิ่มด้วยระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์
ณ วิชาหกิจชุมชนตำบลคอนตูม

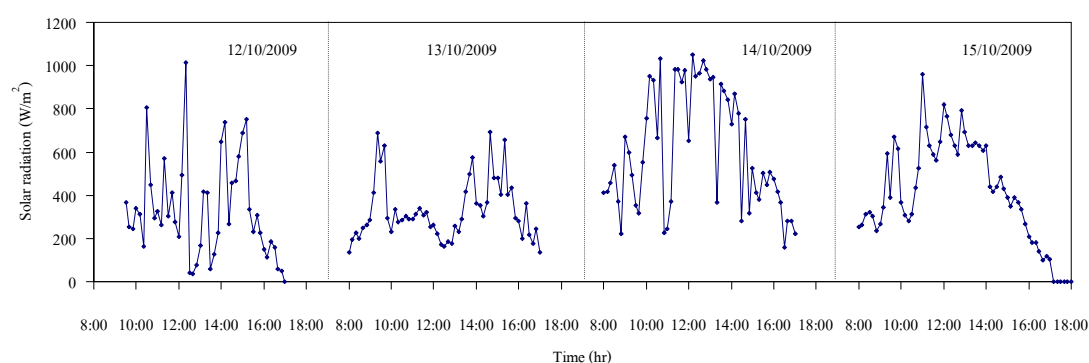
1) ผลการทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่แข็งครั้งที่ 1 (12 – 15 ตุลาคม 2552)

การทดลองครั้งแรกใช้มะเขือเทศที่ผ่านกระบวนการแช่แข็งแล้วจำนวน 1,000 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 48 % (wb) ในช่วงที่ทำการทดลองเป็นช่วงปลายฝน ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมและมีฝนตกโดยมีแสงแดดเป็นช่วงๆ ทำให้ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (รูปที่ 3.19) ในวันแรกของการทดลองมีเมฆมากตลอดทั้งวัน มีฝนตกในช่วงบ่ายเวลา 13:00 – 14:30 น. และช่วงเย็นเวลา 16:30 – 18:00 น. ผู้ดำเนินโครงการจึงทำการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สเพื่อให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องในเวลาดังกล่าว รวมระยะเวลาในการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สของวันแรกทั้งหมด 3 ชั่วโมง ในวันที่สองของการทดลอง ช่วงเช้ามีแสงแดด ช่วงกลางวันมีเมฆมากและมีฝนตกช่วงเวลา 12:30 – 14:30 น. ผู้ดำเนินโครงการจึงได้ทำการเปิดเครื่องเผาไหม้ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนช่วงเย็นมีเมฆเป็นบางส่วน ในวันที่สามของการทดลองมีเมฆเป็นบางส่วน มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ $1,050 \text{ W/m}^2$ วันที่สี่ของการทดลองมีเมฆสลับกันกับแสงแดดทั้งช่วงเช้าและช่วงบ่าย มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 950 W/m^2 ในการทดลองครั้งแรกผู้ดำเนินโครงการได้ใช้เครื่องเผาไหม้แก๊สอบแห้งมะเขือเทศแช่แข็งขณะฝนตกเป็นระยะเวลาทั้งหมด 5 ชั่วโมง ตั้งอุณหภูมิของเครื่องเผาไหม้แก๊สไว้ที่ 55°C ใช้ปริมาณแก๊ส LPG ไปทั้งสิ้น 14 กิโลกรัม และปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ไปสำหรับการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สเท่ากับ 14 หน่วย

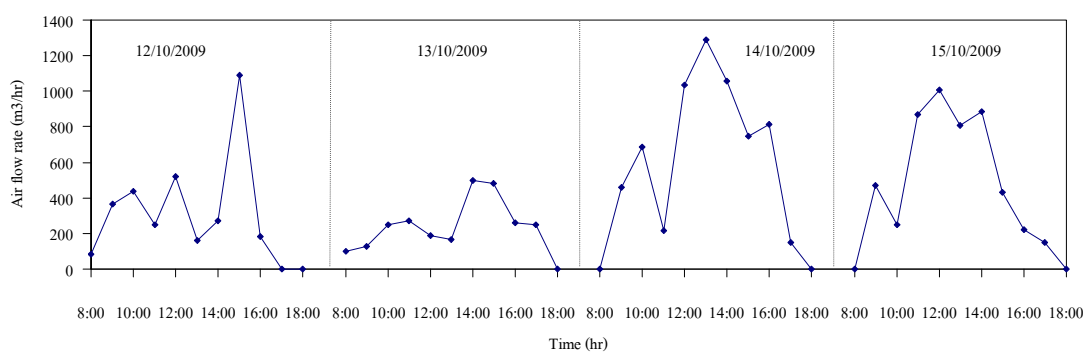
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.20) จะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งนี้เพราะพัดลมดูดอากาศทำงานด้วยโซลาร์เซลล์ ซึ่งให้กำลังไฟฟ้าแปรตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยในช่วงเวลากลางวันจะแปรค่าอยู่ในช่วง $100 - 1300 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับช่วงที่ฝนตกอากาศชื้นจะถูกเป่าโดยพัดลมของเครื่องเผาไหม้แก๊สออกไปภายนอกผ่านทางช่องอากาศด้านหน้าของระบบอบแห้ง ในอัตราการไหลประมาณ $800 \text{ m}^3/\text{hr}$ สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.21) จะเห็นว่ามีความต่ำกว่าอากาศแวดล้อม โดยช่วงเวลาฝนตกความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมมีค่าสูงแต่ในขณะที่ระบบอบแห้งได้รับความร้อนจากเครื่องเผาไหม้แก๊สและความร้อนจากการสะสมของพื้นซีเมนต์ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งไม่สูงตาม

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.22-3.25) จะเห็นว่าในช่วงเวลากลางวันจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5-25^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ฝนตกใช้ความร้อนจากเครื่องเผาไหม้แก๊ส อุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง $40 - 43^\circ\text{C}$ ช่วยทำให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

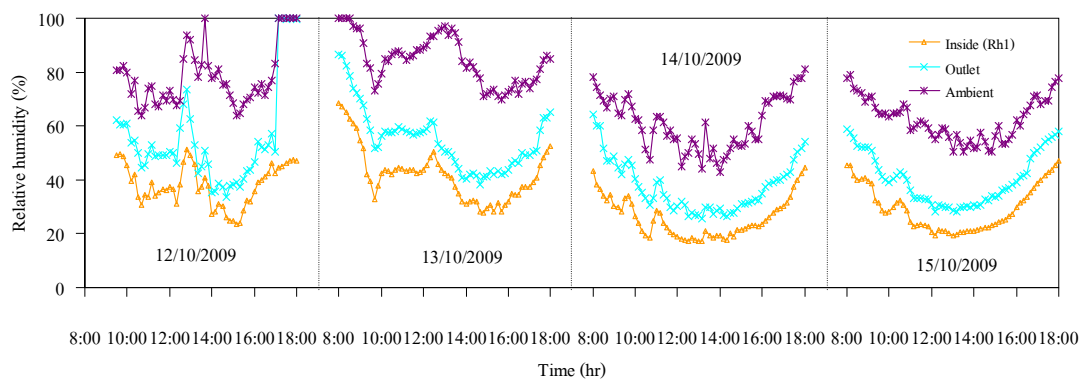
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมะเขือเทศเชื่อมมีน้ำตาลค่อนข้างมาก ทำให้น้ำระเหยออกมาได้ยาก มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างของแข็งของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง (mono-layer water) ทำให้อัตราการลดลงของความชื้นจะค่อยๆลดลง (รูปที่ 3.26) ใช้เวลาในการอบแห้ง 4 วัน โดยในวันที่สี่ของการอบแห้ง ความชื้นของผลิตภัณฑ์เริ่มจะคงที่ ความชื้นสุดท้ายของความชื้นผลิตภัณฑ์ มีค่าประมาณ 15 % (wb)ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 6 – 7 วัน จากเส้นกราฟการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นว่า ในช่วงสุดท้ายจะได้ค่าความชื้นเกือบเท่ากัน แสดงว่าอัตราการแห้งของความชื้นผลิตภัณฑ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดธรรมชาติ ซึ่งค่าความชื้นลดลงช้ามาก ต้องใช้เวลานานกว่าการอบภายในระบบอบแห้งกว่าหนึ่งเท่า หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นเหลือมะเขือเทศเชื่อมอบแห้งประมาณ 590 กิโลกรัม



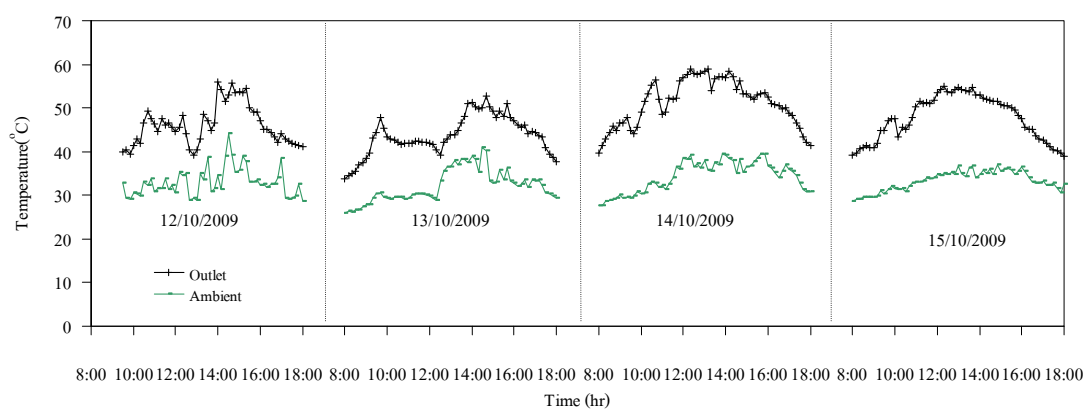
รูปที่ 3.19 การแปรค่าของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



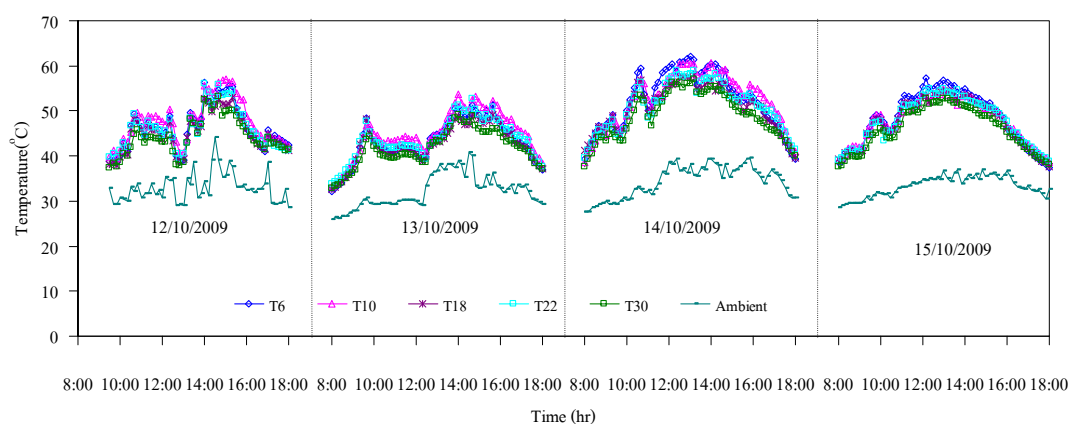
รูปที่ 3.20 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



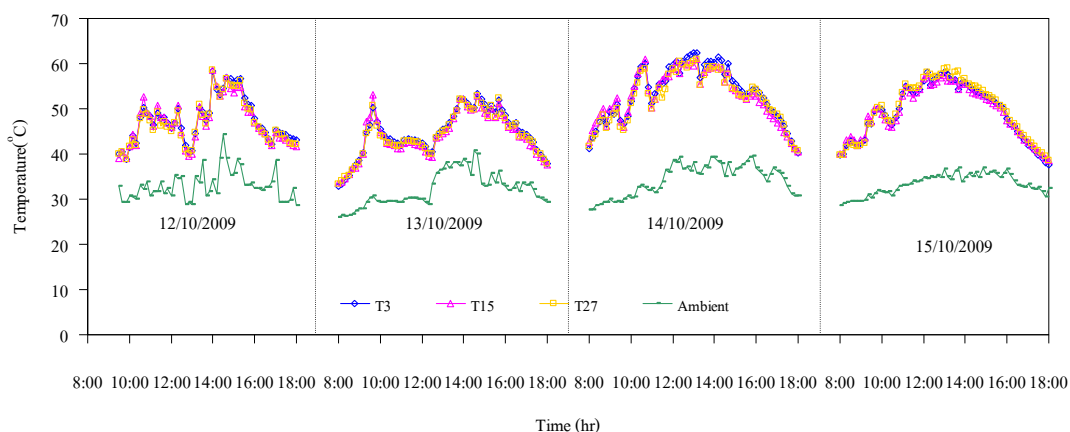
รูปที่ 3.21 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อมระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



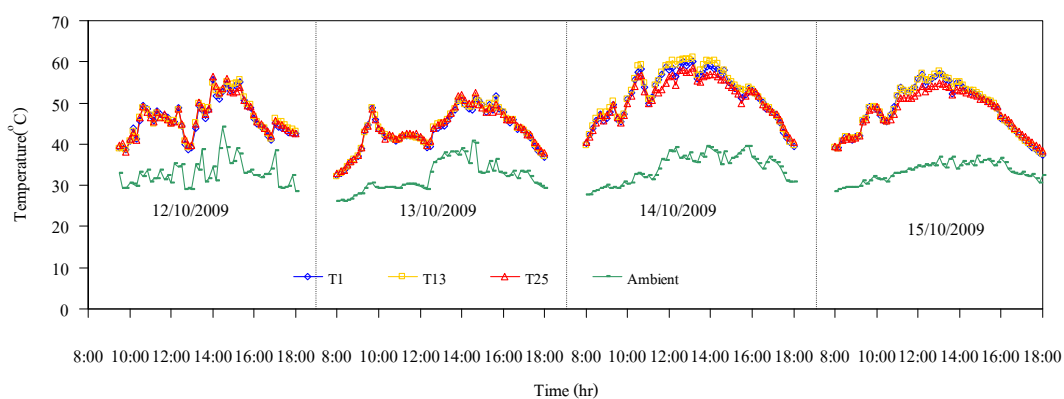
รูปที่ 3.22 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



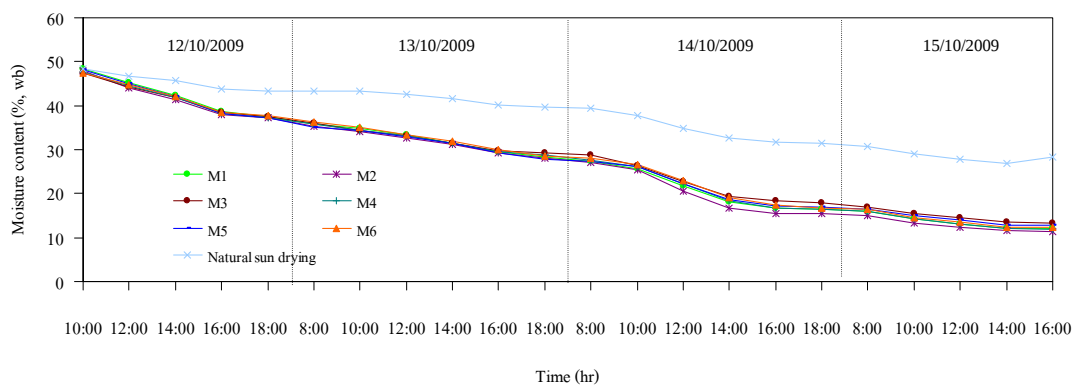
รูปที่ 3.23 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบน ตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552



รูปที่ 3.26 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่ม ณ ตำแหน่งต่างๆ
ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 12 – 15 ตุลาคม 2552

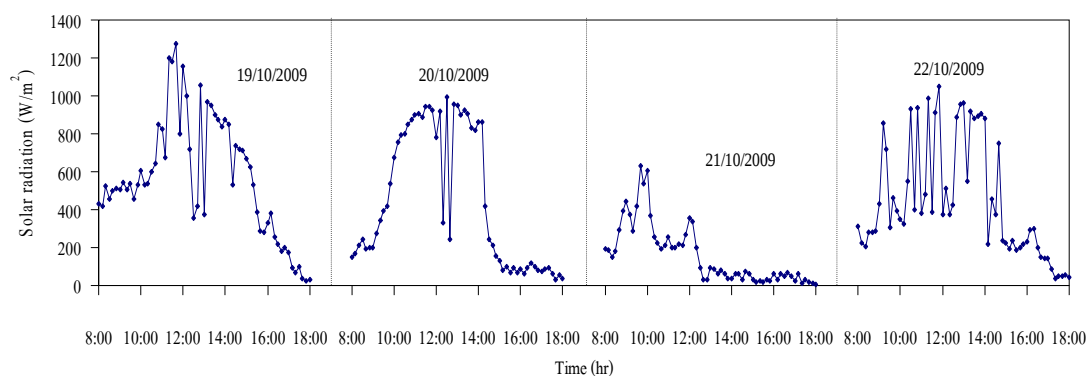
2) ผลการทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่เย็นครั้งที่ 2 (19 – 22 ตุลาคม 2552)

การทดลองครั้งที่สองใช้มะเขือเทศแช่เย็นจำนวน 1,000 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 48 % (wb) ในช่วงที่ทำการทดลอง ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมและมีฝนตกโดยมีแสงแดดเป็นช่วงๆ ในวันแรกของการทดลองท้องฟ้ามีเมฆมากในตอนเช้า ตอนเที่ยงถึงตอนเย็นมีเมฆปกคลุมเล็กน้อย มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ $1,200 \text{ W/m}^2$ ในวันที่สองของการทดลองท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมเล็กน้อย แต่ช่วงตอนเย็นมีเมฆปกคลุมมาก มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ $1,000 \text{ W/m}^2$ ในวันที่สามของการทดลอง มีฝนตกในช่วงบ่ายเวลา 13:00 – 18:00 น. ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปิดเครื่องเผาไหม้ในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง ตั้งอุณหภูมิของเครื่องเผาไหม้แก๊สไว้ที่ 55°C ใช้ปริมาณแก๊ส LPG ไปทั้งสิ้น 14.5 กิโลกรัม และปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ไปสำหรับการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สเท่ากับ 14 หน่วย วันที่สี่ของการทดลองมีเมฆสลับกันกับแสงแดดทั้งช่วงเช้าและช่วงบ่าย มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ $1,000 \text{ W/m}^2$ การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.27

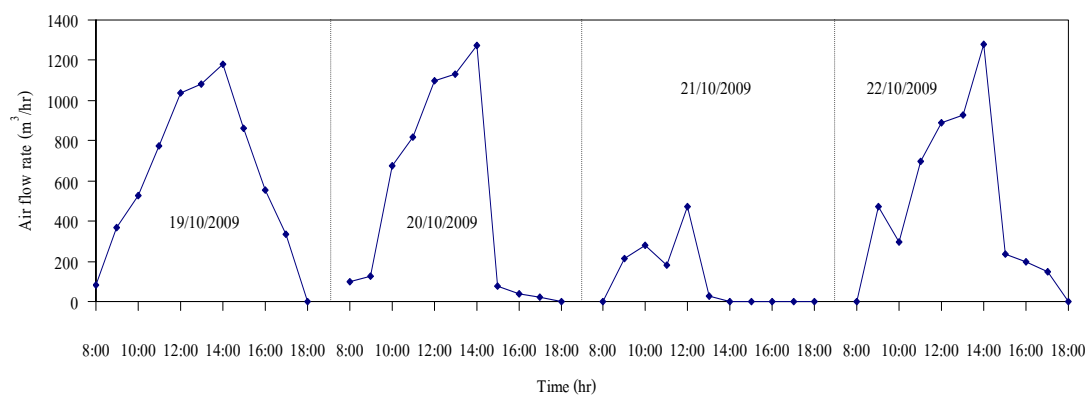
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.28) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง 100 – $1,300 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.29) จะเห็นว่ามีความต่ำกว่าอากาศแวดล้อม

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.30-3.33) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5-25^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

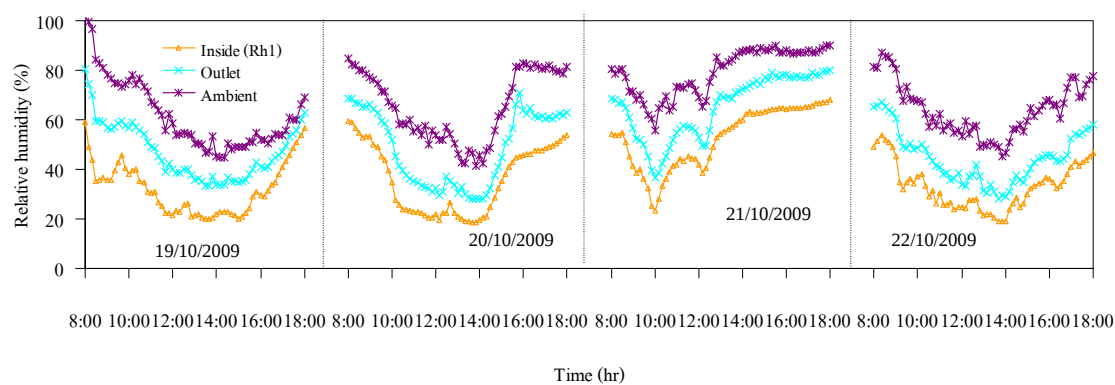
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ อัตราการลดลงของความชื้นจะค่อยๆ ลดลง (รูปที่ 3.34) โดยในวันที่สี่ของการอบแห้ง ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการทดลองนี้ใช้เวลา 4 วัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 % (wb) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 6 – 7 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นเหลือมะเขือเทศแช่เย็นอบแห้งประมาณ 600 กิโลกรัม



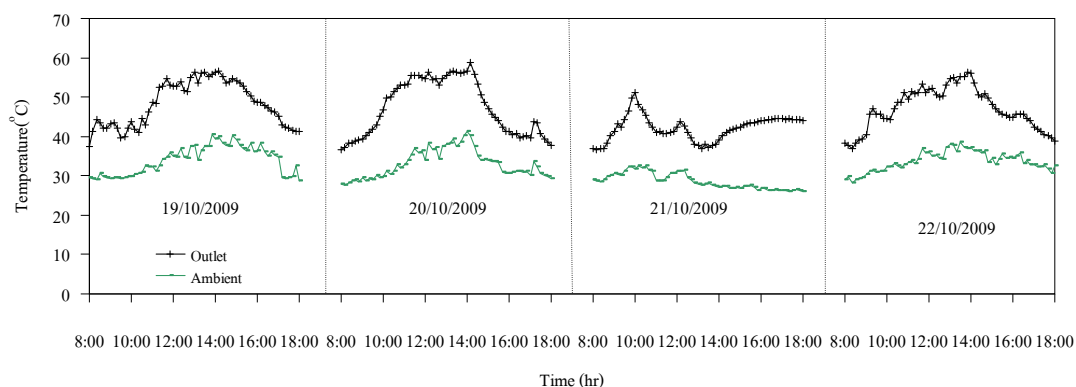
รูปที่ 3.27 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



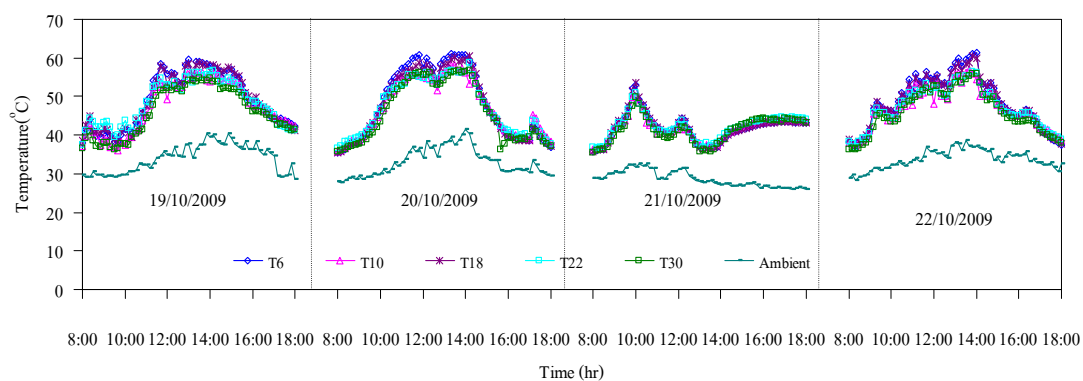
รูปที่ 3.28 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



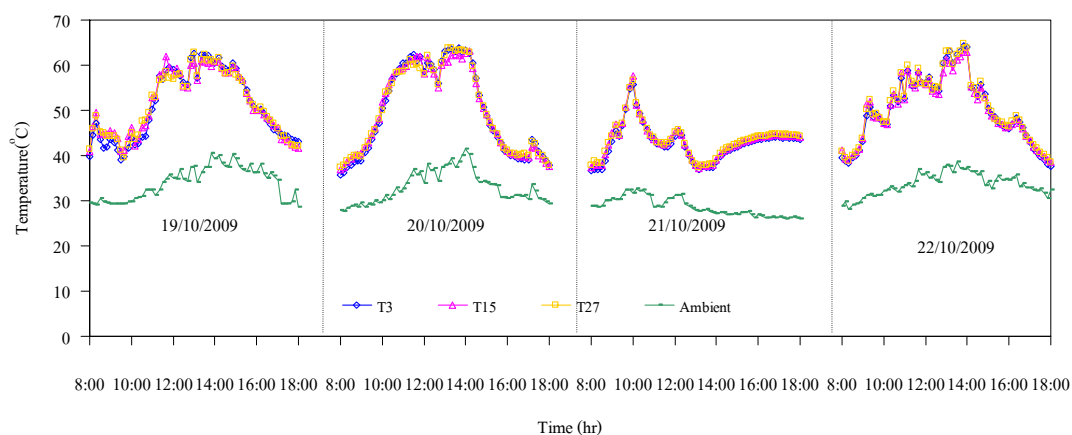
รูปที่ 3.29 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



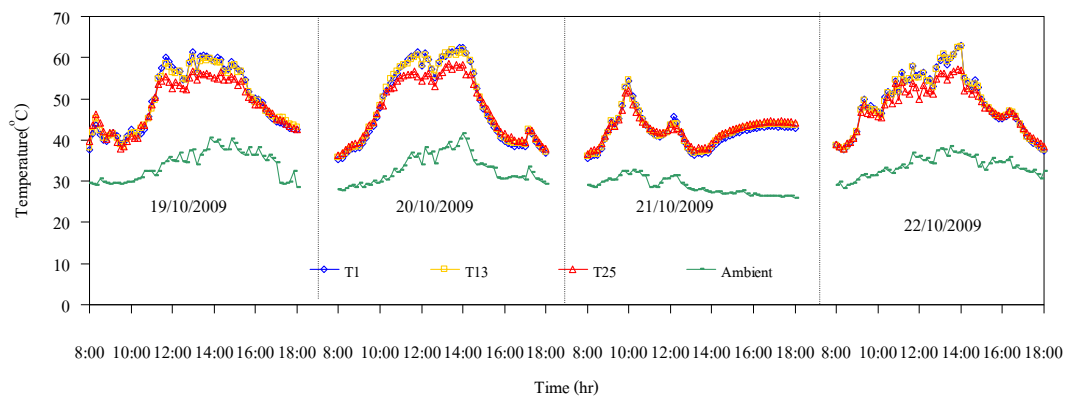
รูปที่ 3.30 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



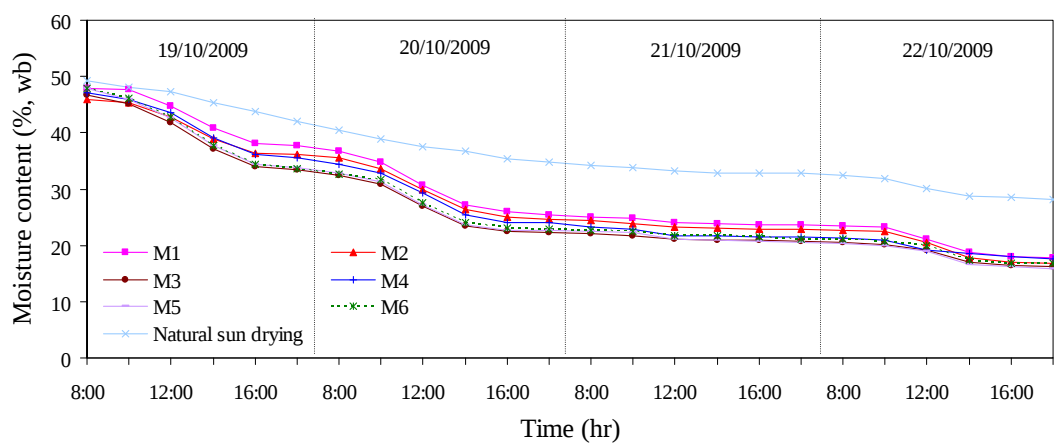
รูปที่ 3.31 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



รูปที่ 3.32 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



รูปที่ 3.33 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบน ตรงส่วนโค้งของระบบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552



รูปที่ 3.34 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่ม ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบบอบแห้งระหว่างวันที่ 19 – 22 ตุลาคม 2552

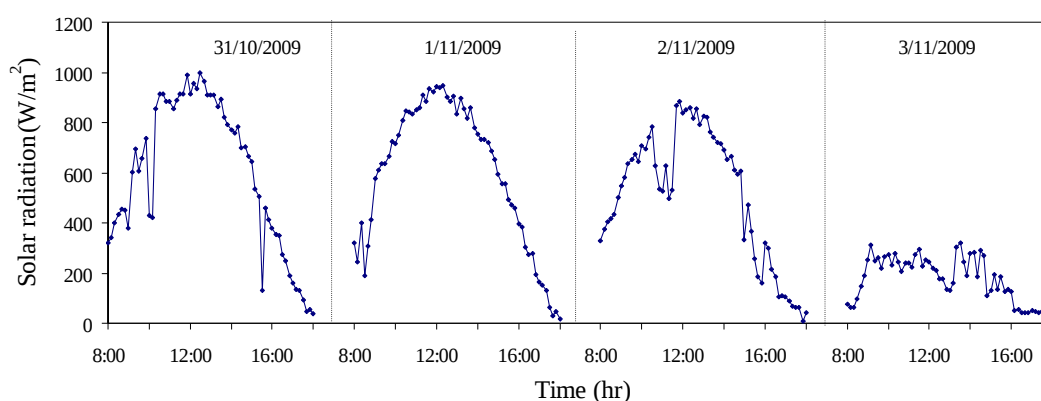
3) ผลการทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่เย็นครั้งที่ 3 (31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552)

การทดลองครั้งที่สามใช้มะเขือเทศแช่เย็นจำนวน 1,000 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 53 % (wb) ในวันแรกของการทดลองห้องฟามีเมฆปกคลุมเล็กน้อยตลอดทั้งวัน มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ $1,000 \text{ W/m}^2$ ในวันที่สองของการทดลองห้องฟามีเมฆปกคลุมเพียงเล็กน้อย มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 980 W/m^2 ในวันที่สามของการทดลองห้องฟามีเมฆปกคลุมมากเป็นบางช่วงของวันมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 900 W/m^2 วันที่สี่ของการทดลองห้องฟามีเมฆปกคลุมมากตลอดทั้งวันและมีฝนตกในช่วงเย็นแต่ไม่เป็นอุปสรรคในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ เนื่องจากความชื้นของผลิตภัณฑ์เริ่มคงตัว ผู้ดำเนินโครงการจึงไม่ได้ทำการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊ส การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.35

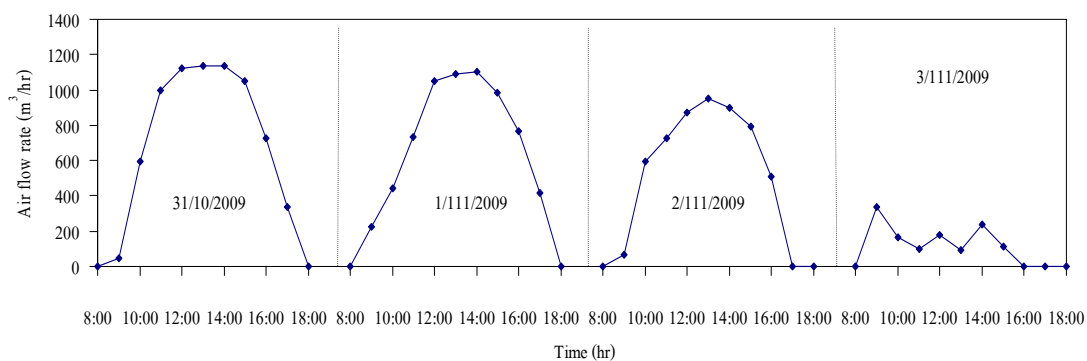
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.36) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง $100 - 1200 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.37) จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าอากาศแวดล้อม

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.38-3.41) จะเห็นว่ามีเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5-25^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

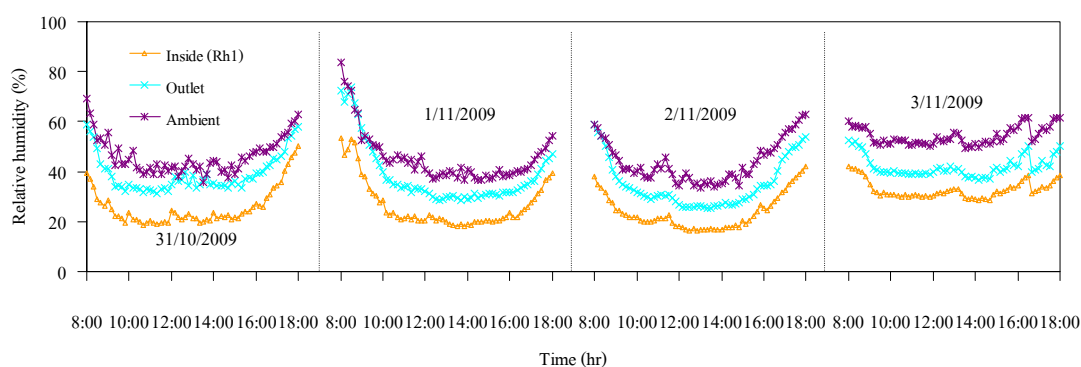
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ อัตราการลดลงของความชื้นจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในสามวันแรกของการทดลอง (รูปที่ 3.42) และในวันที่สี่ของการอบแห้ง ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการทดลองนี้ใช้เวลา 4 วัน โดยผลิตภัณฑ์มีความชื้นสุดท้ายประมาณ 17 % (wb) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลาในการอบ 6 – 7 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นเหลือมะเขือเทศแช่เย็นอบแห้งประมาณ 600 กิโลกรัม



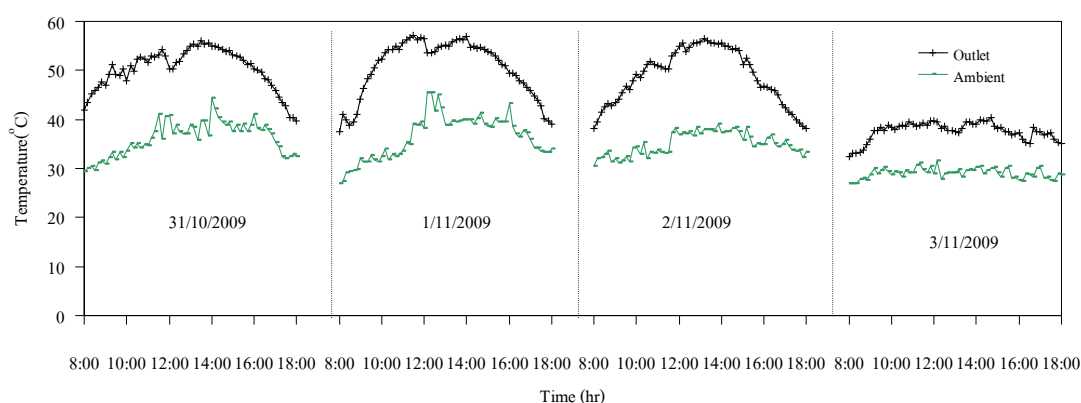
รูปที่ 3.35 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



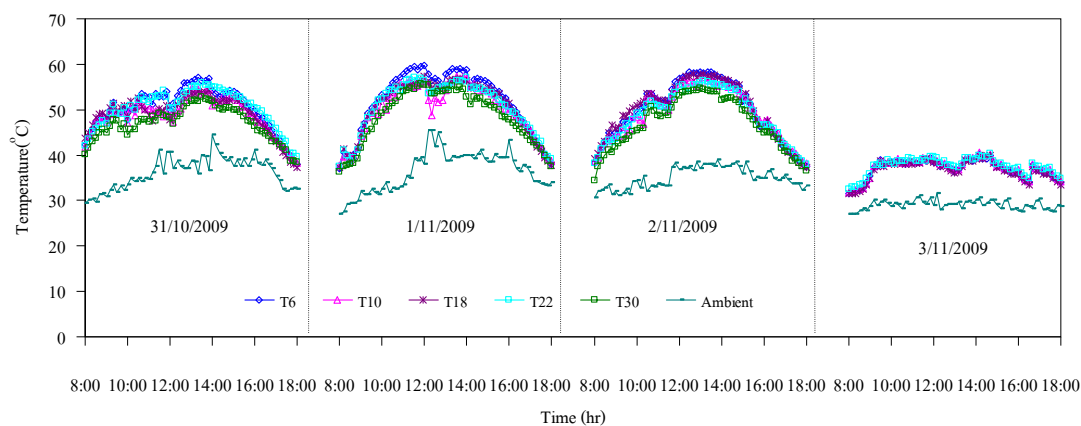
รูปที่ 3.36 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



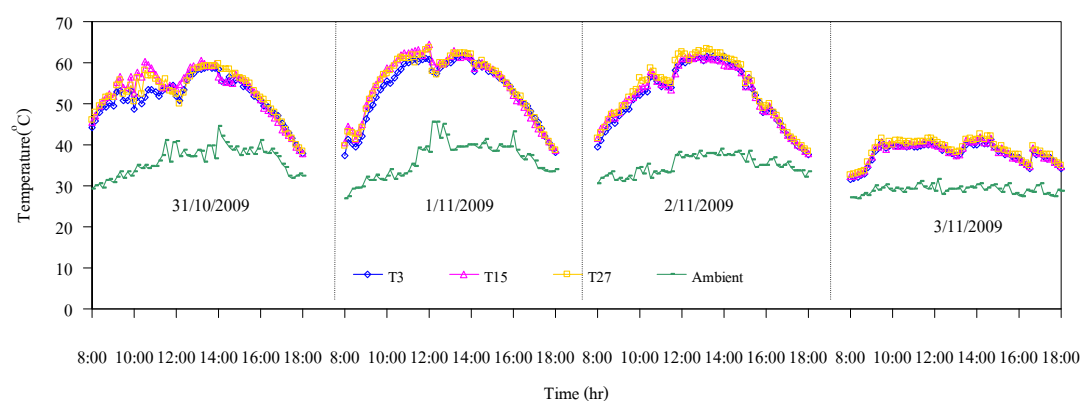
รูปที่ 3.37 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



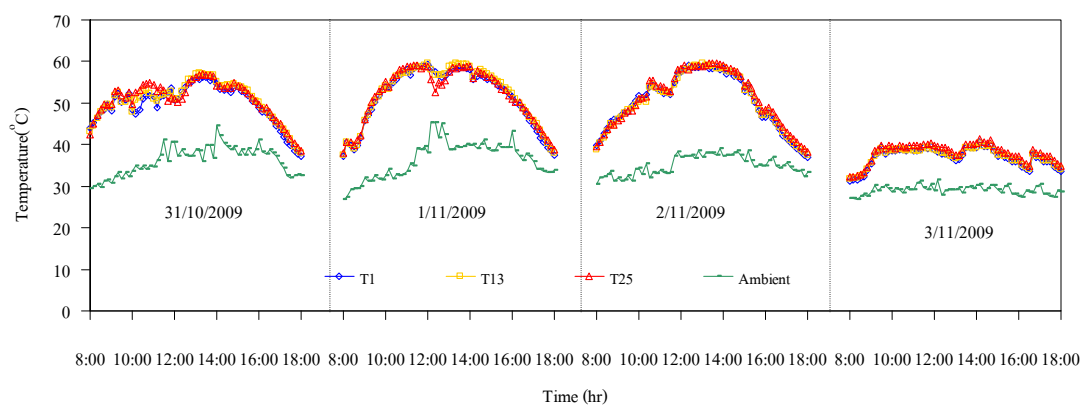
รูปที่ 3.38 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



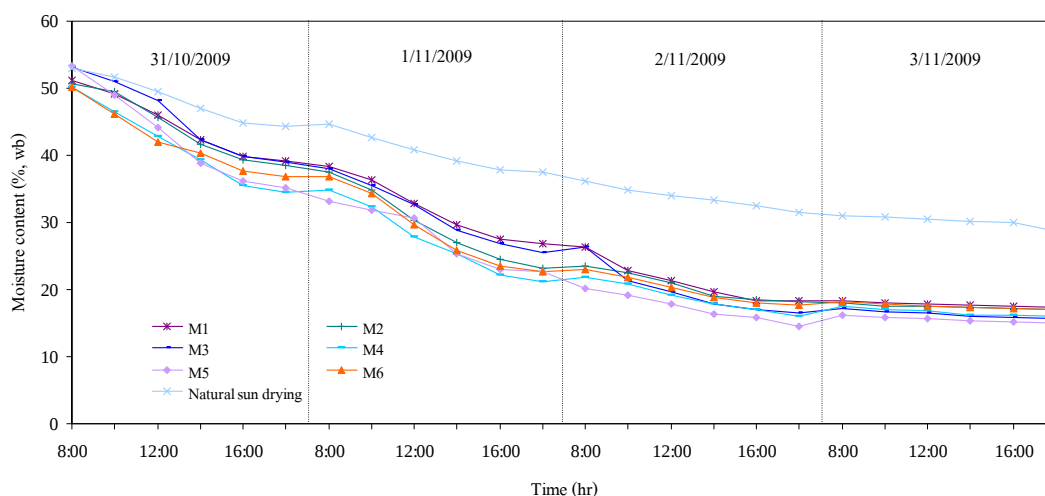
รูปที่ 3.39 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.40 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.41 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.42 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของมะเขือเทศแช่อิ่ม ณ ตำแหน่งต่างๆ
ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน 2552

หลังจากทำการทดลองเสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างมะเขือเทศแช่อิ่มอบแห้งที่อบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกไปตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์แห้ง โดยนำตัวอย่างมะเขือเทศแช่อิ่มอบแห้งที่มีความชื้น 17 % (wb) มาทำการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (Water Activity, a_w) ด้วยเครื่อง Thermoconstanter, TH200 Novasina (รูปที่ 3.43) ผลการวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีของมะเขือเทศแช่อิ่มอบแห้งมีค่าอยู่ที่ 0.53 ซึ่งค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่น้อยกว่า 0.6 เป็นค่าที่แสดงว่ารา แบคทีเรียและเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้งไว้ได้นาน นอกจากนี้ได้ทำการวัดสีมะเขือเทศแช่อิ่มอบแห้งด้วยเครื่อง Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus (รูปที่ 3.44) พบว่ามะเขือเทศแช่อิ่มที่ตากแดดตามธรรมชาติมีสีแดงคล้ำกว่ามะเขือเทศแช่อิ่มที่ตากในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก



รูปที่ 3.43 เครื่องวัดค่าอุณหภูมิ Thermoconstanter, TH200 Novasina



รูปที่ 3.44 การวัดสีมะเขือเทศแช่หมอนแห้งด้วยเครื่อง Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus

3.2.4 โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมเกษตร เขาค้อ จำกัด

อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ณ โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมเกษตรเขาค้อ จำกัด โดยทำการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นจำนวน 3 ครั้ง ดังรูปที่ 3.45 เนื่องจากกล้วยแผ่นใช้พื้นที่ในการตากมากทำให้สามารถอบกล้วยแผ่นได้เพียงครั้งละ 200 กิโลกรัม ในการทดลองให้นำกล้วยมาทาบจนแบนกลายเป็นกล้วยแผ่นแล้วนำไปวางบนแผ่นพลาสติกหรือใส่ถาดอลูมิเนียมและนำเข้าวางในระบบอบแห้งในตอนเช้า เริ่มทำการบันทึกข้อมูลและชั่งน้ำหนักมวลตัวอย่างตั้งแต่เวลา 8.00 น. จนถึงเวลา 18:00 น. ตอนเย็นไม่ต้องทำการเก็บ ให้อากาศอยู่ในระบบอบแห้งตลอดเวลา ตอนเช้าของวันต่อไปให้เริ่มทำการบันทึกข้อมูลและชั่งน้ำหนักมวลตัวอย่างเหมือนกับวันแรก ทำการทดลองจนกว่าจะได้กล้วยแผ่นที่ผู้ผลิตต้องการ หากมีฝนตกหรือฟ้ามีดครึ้มจะทำการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สให้ทำงานเพื่อช่วยให้การอบแห้งดำเนินต่อไป



รูปที่ 3.45 การอบแห้งกล้วยในระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ณ โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมเกษตรเขาค้อ จำกัด

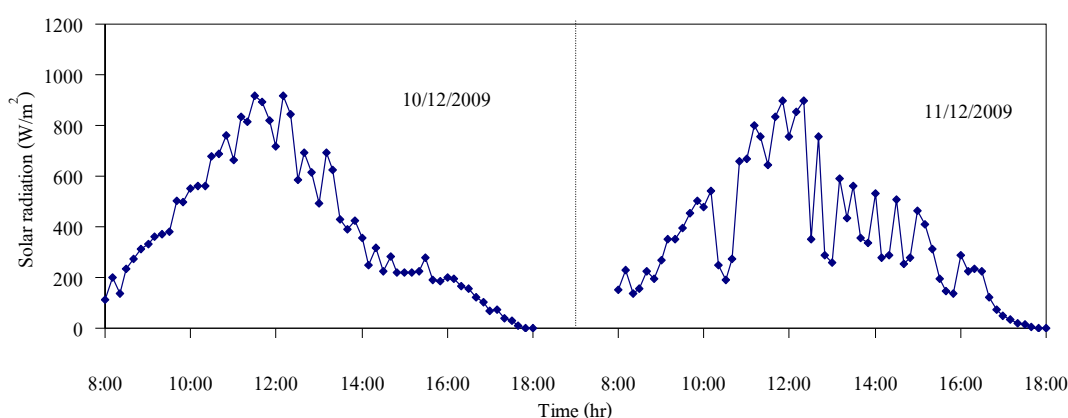
1) ผลการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นครั้งที่ 1 (10 – 11 ธันวาคม 2552)

การทดลองครั้งแรกใช้กล้วยแผ่นจำนวน 200 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 68 % (wb) ช่วงที่ทำการทดลองมีเมฆปกคลุมเล็กน้อยตลอดทั้งวัน วันแรกของการทดลองมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 950 W/m^2 ในวันที่สองของการทดลองมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 900 W/m^2 การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.46

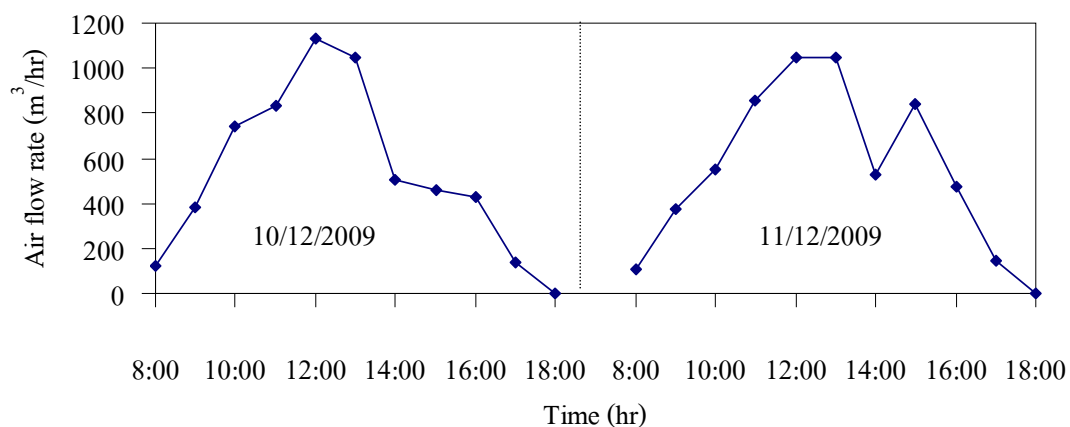
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.47) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง $100 - 1150 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.48) จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าอากาศแวดล้อม

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.49-3.52) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ เนื่องจากพื้นที่เป็นภูเขาและมีต้นไม้มาก ทำให้ในตอนเช้าและตอนเย็นมีอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง มีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5-20^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

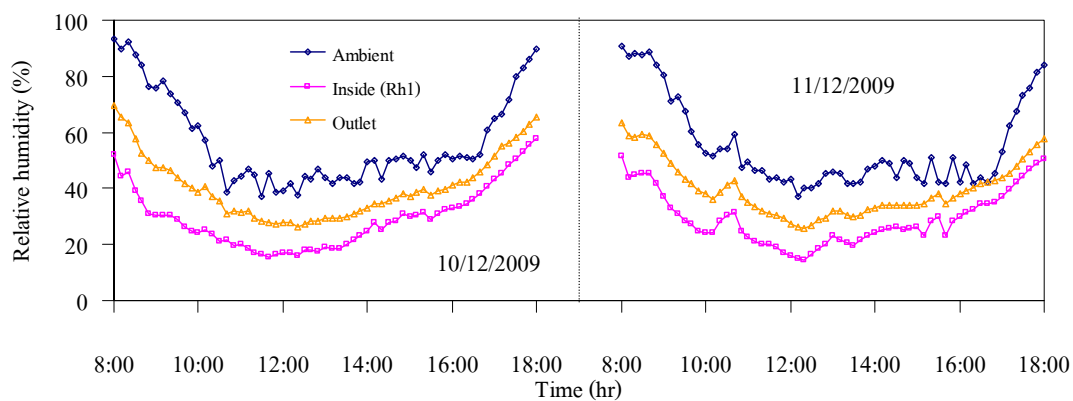
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกล้วยแผ่นมีขนาดบางทำให้สามารถระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว อัตราการลดลงของความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.53) ใช้เวลาในการทดลองเพียง 2 วันทำให้กล้วยแผ่นมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 13 % (wb) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 4 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นจะเหลือกล้วยแผ่นประมาณ 74 กิโลกรัม



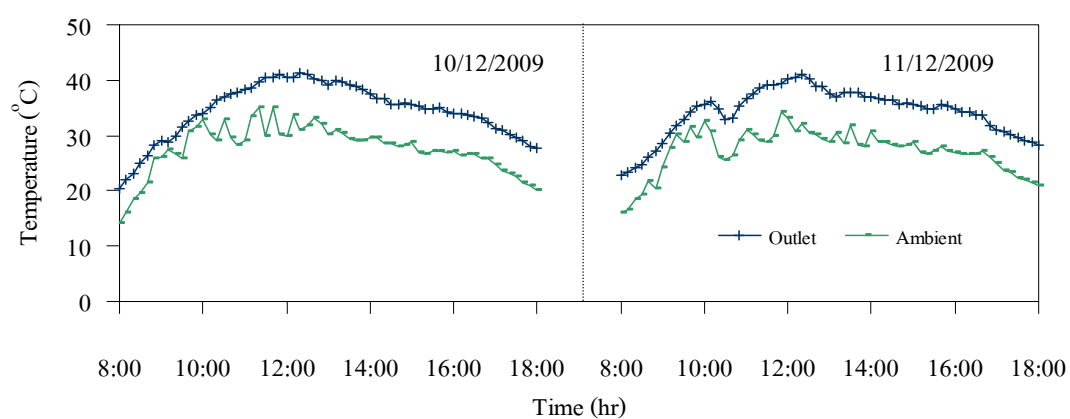
รูปที่ 3.46 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



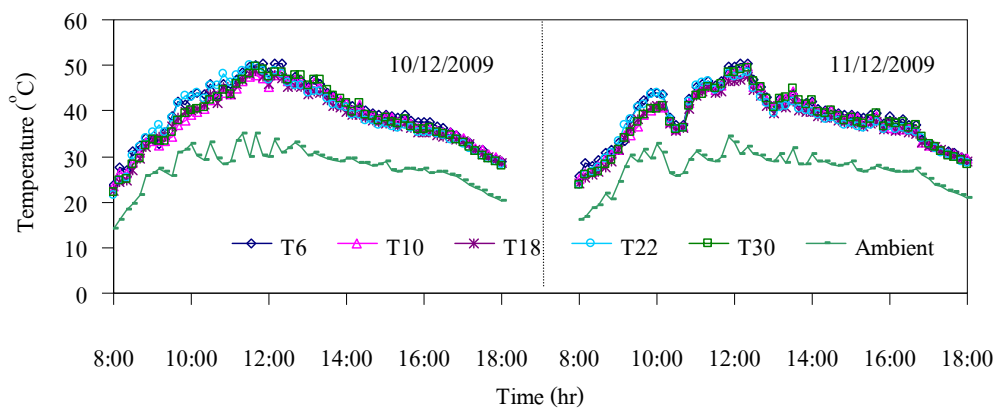
รูปที่ 3.47 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



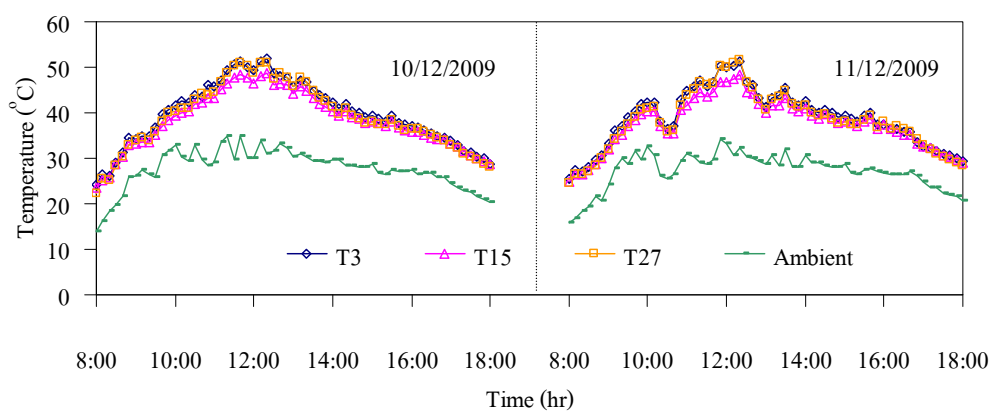
รูปที่ 3.48 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



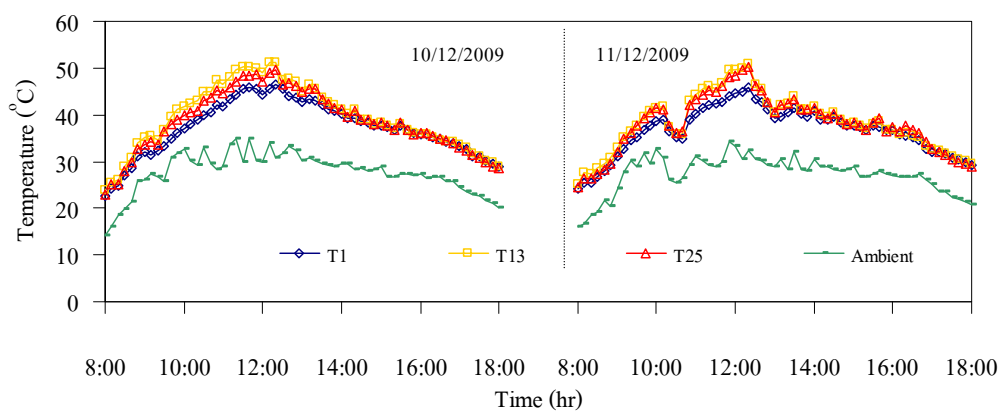
รูปที่ 3.49 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



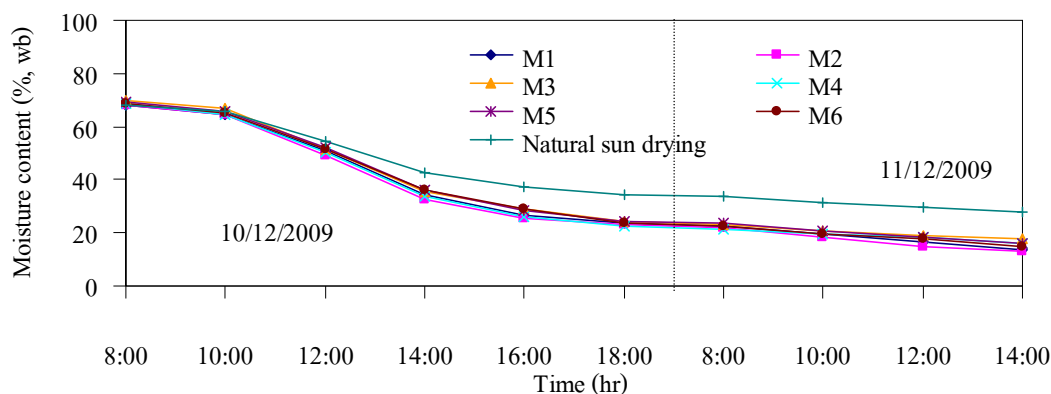
รูปที่ 3.50 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.51 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.52 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.53 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของกล้วยแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม 2552

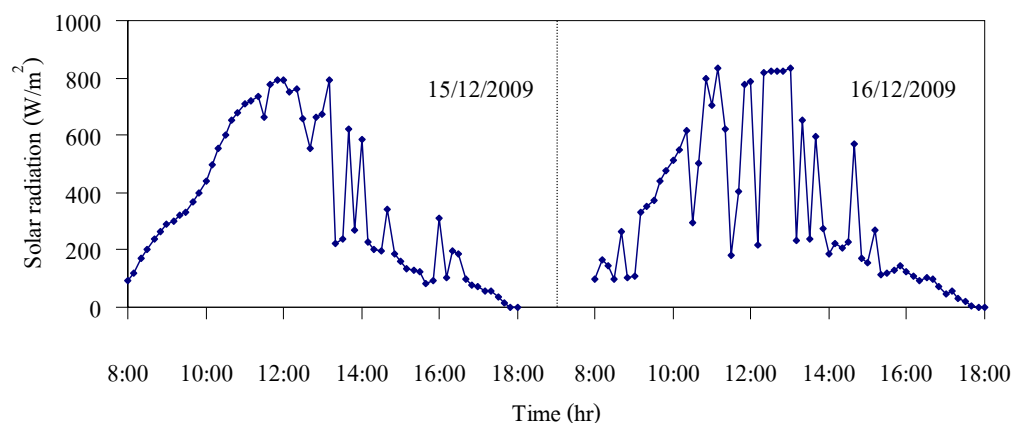
2) ผลการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นครั้งที่ 2 (15 – 16 ธันวาคม 2552)

การทดลองครั้งที่สองใช้กล้วยแผ่นจำนวน 200 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 70 % (wb) ช่วงที่ทำการทดลองในช่วงนี้อากาศมีลักษณะเย็นและมีหมอกในตอนเช้า มีเมฆสลับมีแดดตลอดทั้งวัน วันแรกของการทดลองมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 800 W/m^2 ในวันที่สองของการทดลองมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 900 W/m^2 การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.54

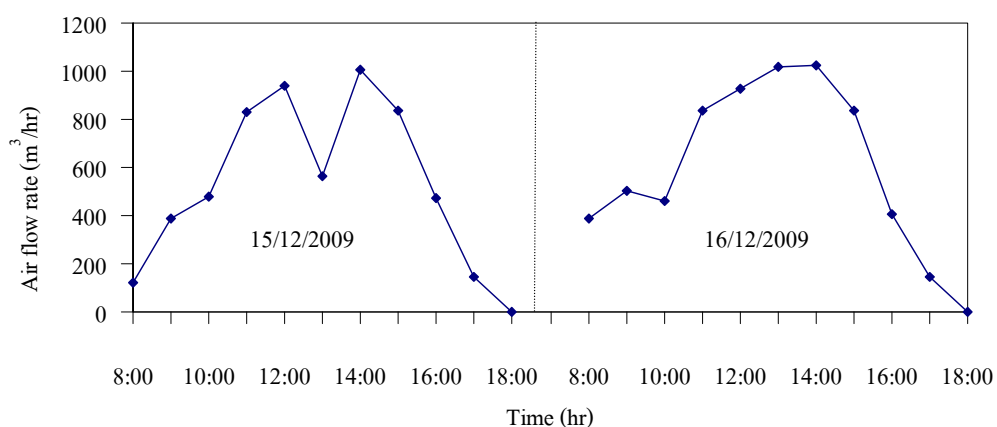
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.55) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง $100 - 1000 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.56) จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าอากาศแวดล้อม

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.57-3.60) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ในตอนเช้าและตอนเย็นมีอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง มีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5-20^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

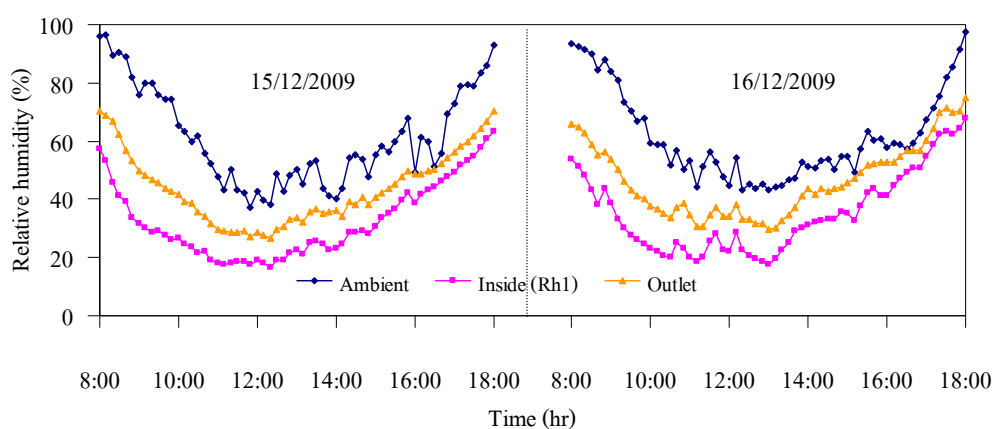
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกล้วยแผ่นมีขนาดบางทำให้สามารถระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว อัตราการลดลงของความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.61) ใช้เวลาในการทดลองเพียง 2 วันทำให้กล้วยแผ่นมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 15 % (wb) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 4 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นสุดท้ายกล้วยแผ่นประมาณ 70 กิโลกรัม



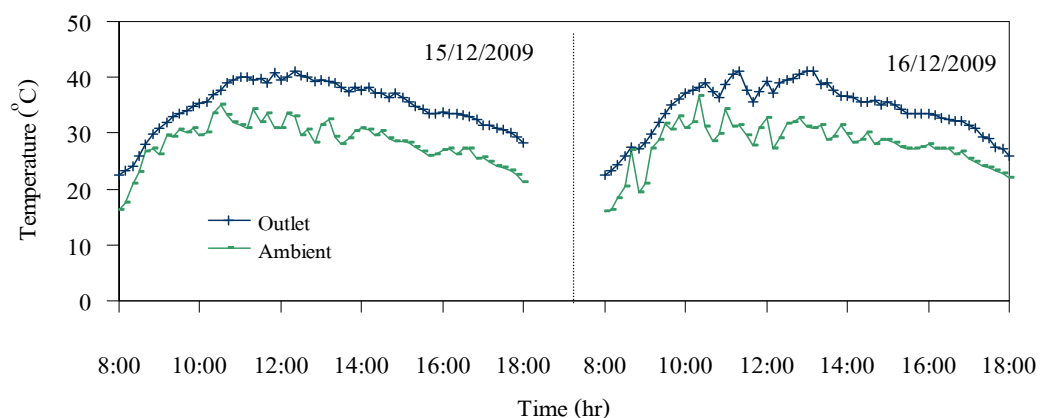
รูปที่ 3.54 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



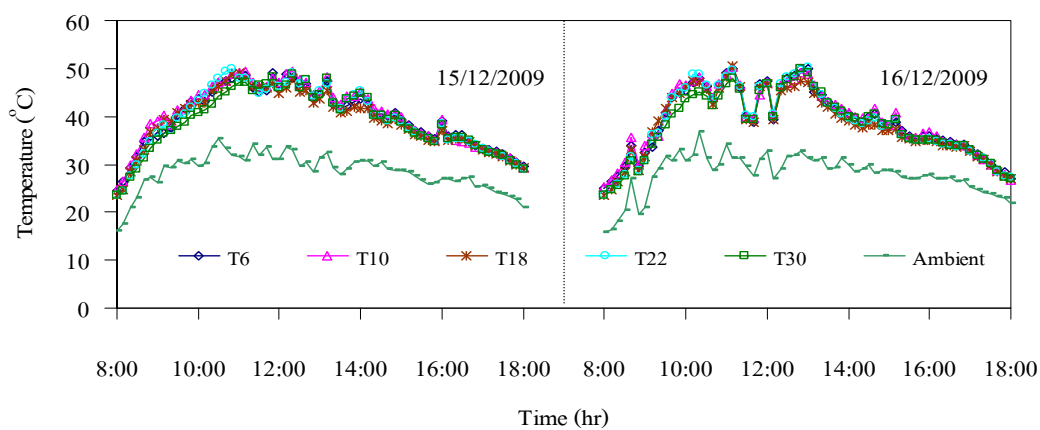
รูปที่ 3.55 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



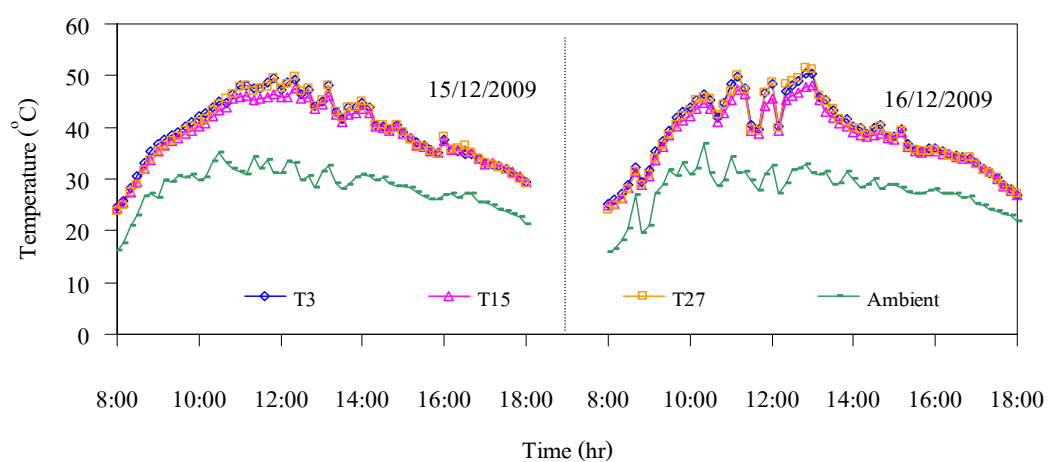
รูปที่ 3.56 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



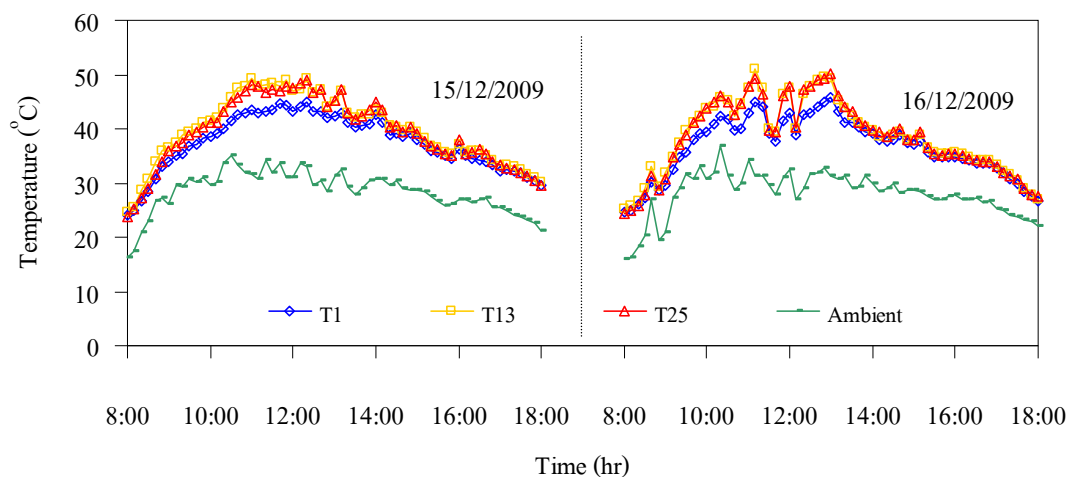
รูปที่ 3.57 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



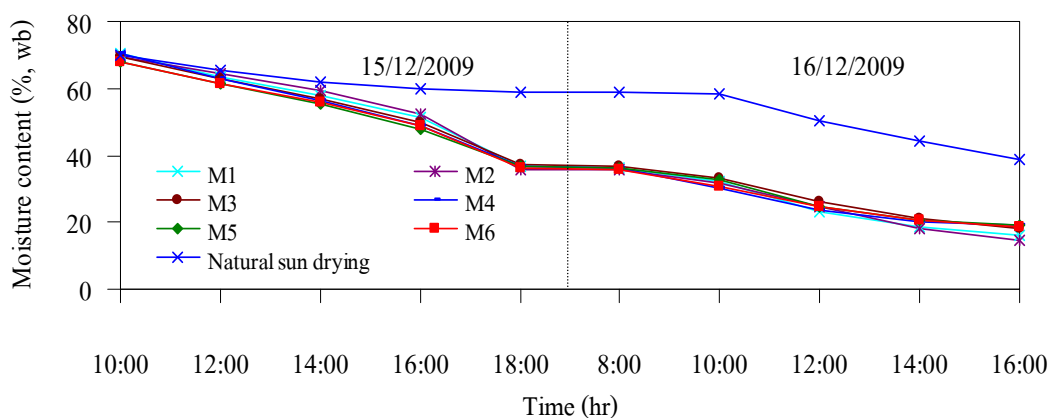
รูปที่ 3.58 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.59 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.60 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.61 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของกล้วยแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 15 – 16 ธันวาคม 2552

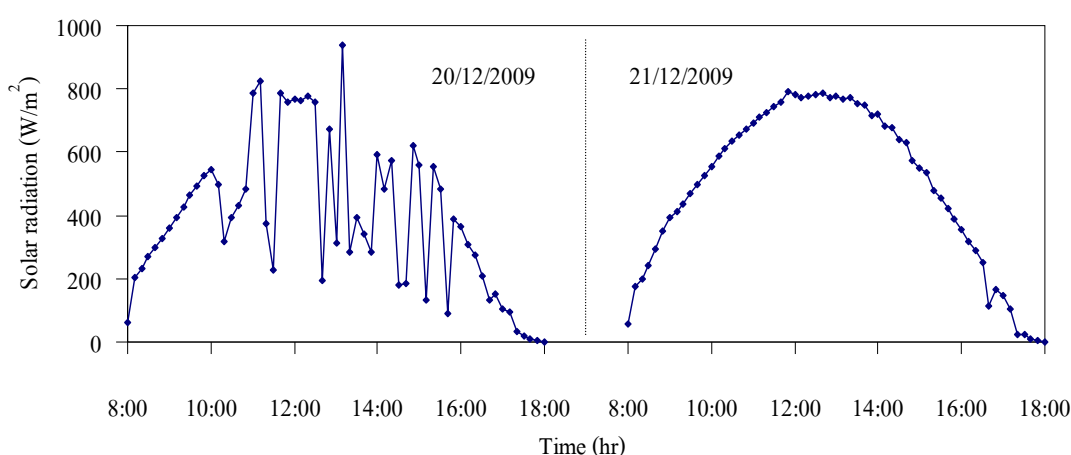
3) ผลการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่นครั้งที่ 3 (20 – 21 ธันวาคม 2552)

การทดลองครั้งที่สามใช้กล้วยแผ่นจำนวน 200 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 67 % (wb) ช่วงที่ทำการทดลองในช่วงนี้อากาศมีลักษณะเย็นและมีหมอกในตอนเช้า วันแรกของการทดลองมีเมฆสลับมีแดดตลอดทั้งวัน มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 900 W/m^2 ในวันที่สองของการทดลองท้องฟ้าแจ่มใส มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 800 W/m^2 การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.62

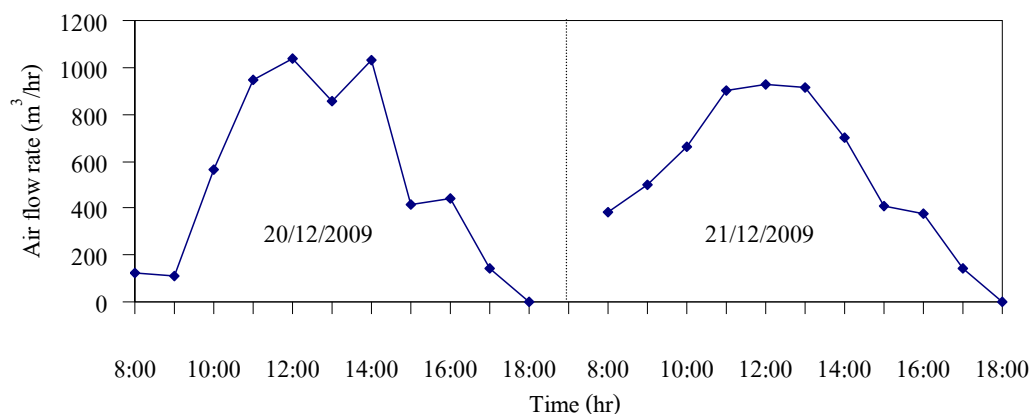
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.63) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง $100 - 1000 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.64) จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าอากาศแวดล้อม

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.65-3.68) จะเห็นว่ามีเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ในตอนเช้าและตอนเย็นมีอุณหภูมิแวดล้อมมีค่าต่ำ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง มีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5-20^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน

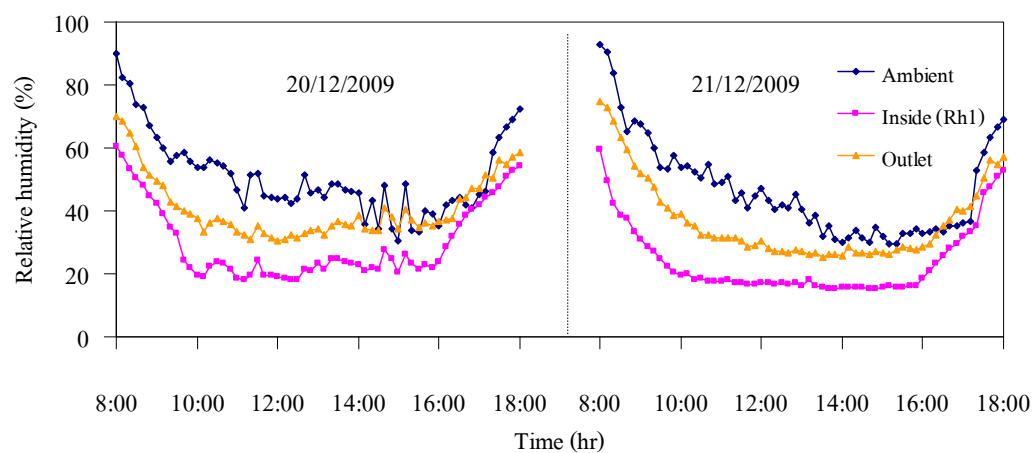
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกล้วยแผ่นมีขนาดบางทำให้สามารถระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว อัตราการลดลงของความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.69) ใช้เวลาในการทดลองเพียง 2 วันทำให้กล้วยแผ่นมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 12 % (wb) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 4 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นเหลือกล้วยแผ่นประมาณ 73 กิโลกรัม



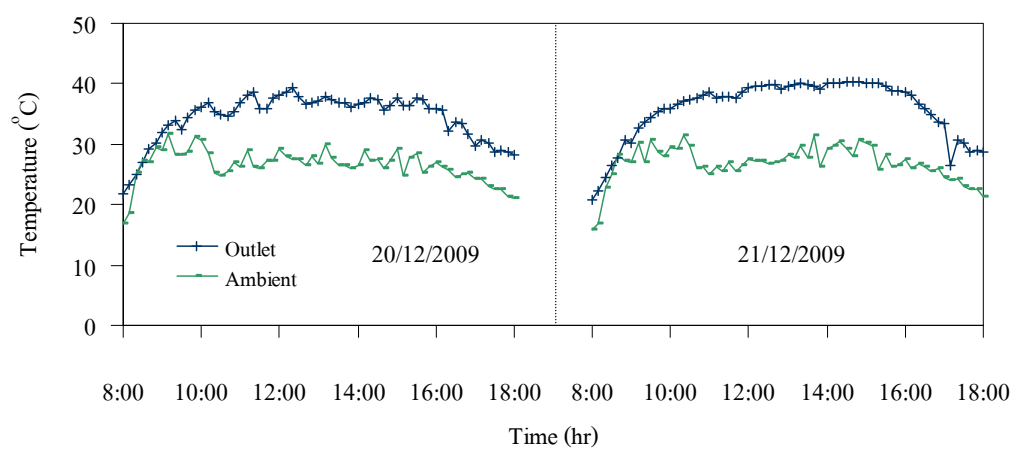
รูปที่ 3.62 กราฟแสดงการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



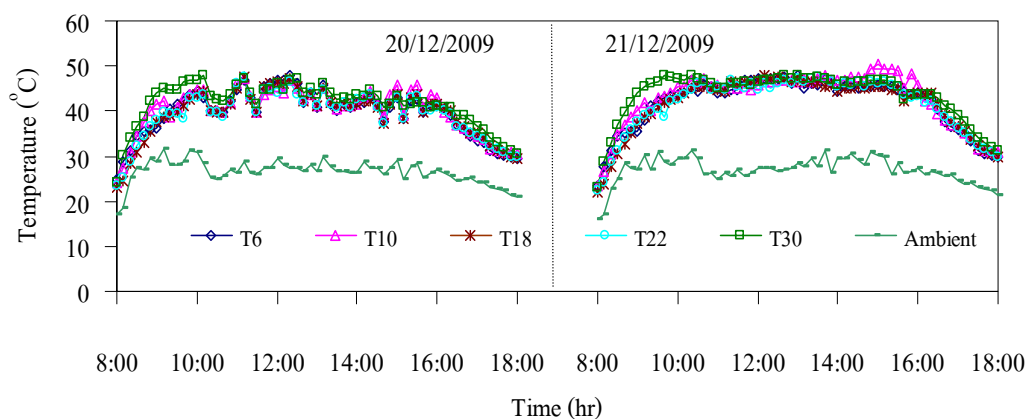
รูปที่ 3.63 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



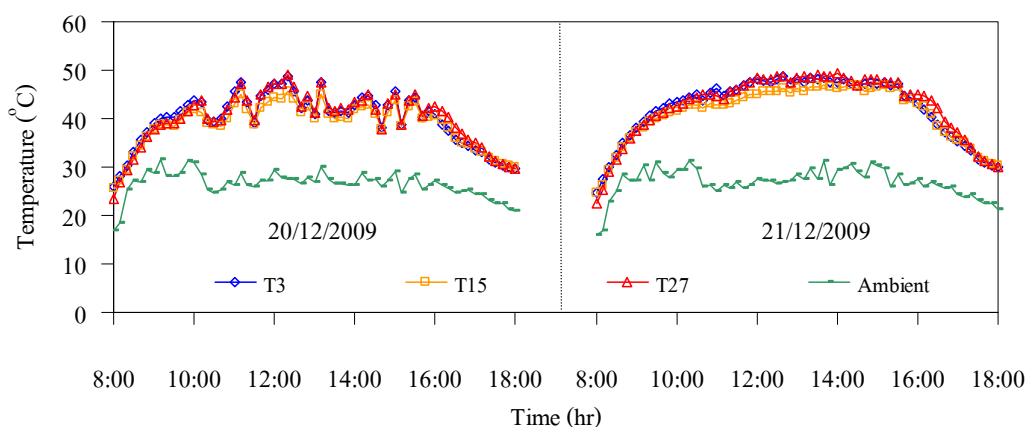
รูปที่ 3.64 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



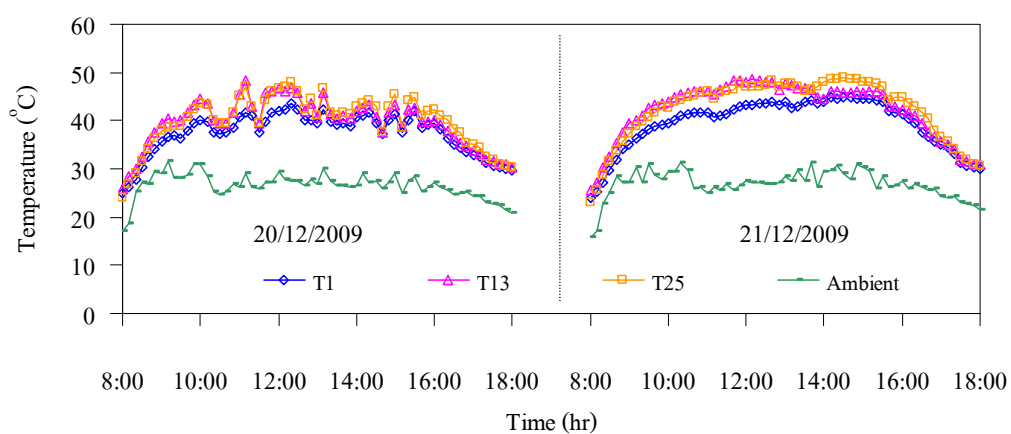
รูปที่ 3.65 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



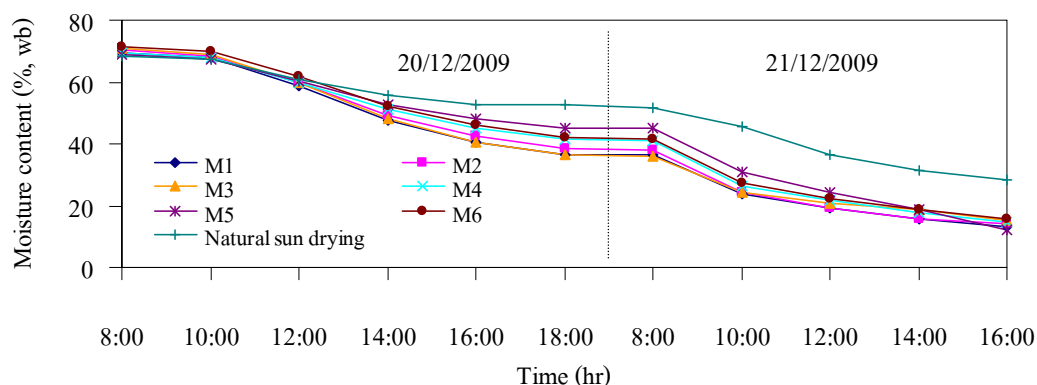
รูปที่ 3.66 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.67 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.68 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552



รูปที่ 3.69 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของกล้วยแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 20 – 21 ธันวาคม 2552

หลังจากทำการทดลอง ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างกล้วยแผ่นไปตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์แห้ง โดยนำตัวอย่างกล้วยแผ่นที่มีความชื้น 13 % (wb) มาทำการวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water Activity, a_w) ด้วยเครื่อง Thermoconstanter, TH200 Novasina ผลการวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของกล้วยแผ่นที่อบด้วยระบบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีค่าอยู่ที่ 0.48 ซึ่งค่าวอเตอร์แอคทิวิตีที่น้อยกว่า 0.6 เป็นค่าที่แสดงว่ารา แบคทีเรียและจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้งไว้ได้นาน นอกจากนี้ได้ทำการวัดสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus (รูปที่ 3.70) พบว่ากล้วยแผ่นที่ตากแดดตามธรรมชาติมีสีเหลืองคล้ำกว่ากล้วยแผ่นที่อบแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก



รูปที่ 3.70 แสดงการวัดสีกล้วยแผ่นด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus

3.2.5 องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้ง ณ องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ โดยทำการทดลองอบแห้งพริกจำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 500 กิโลกรัม ดังรูปที่ 3.76 พริกที่ใช้ในการทดลองเป็นพริกพันธุ์สุรแดง ในการทดลองนำพริกใส่ตะแกรงแล้วนำไปวางในระบบอบแห้งในตอนเช้า เริ่มทำการบันทึกข้อมูลและชั่งน้ำหนักมวลตัวอย่างตั้งแต่เวลา 8.00 น.จนถึงเวลา 18:00 น. ตอนเย็นไม่ต้องทำการเก็บพริก ให้พริกอยู่ในระบบอบแห้งตลอดเวลา ตอนเช้าของวันต่อไปให้เริ่มทำการบันทึกข้อมูลและชั่งน้ำหนักมวลตัวอย่างเหมือนกับวันแรก ทำการทดลองจนกว่าจะได้พริกที่ผู้ผลิตต้องการ หากมีฝนตกหรือฟ้ามีดครึ้มจะทำการเปิดเครื่องเผาไหม้แก๊สให้ทำงานเพื่อช่วยในการอบแห้งดำเนินต่อไป



รูปที่ 3.71 แสดงการอบแห้งพริกด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
แบบเรือนกระจก ณ องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ

1) ผลการทดลองอบแห้งพริกครั้งที่ 1 (21 – 23 พฤศจิกายน 2552)

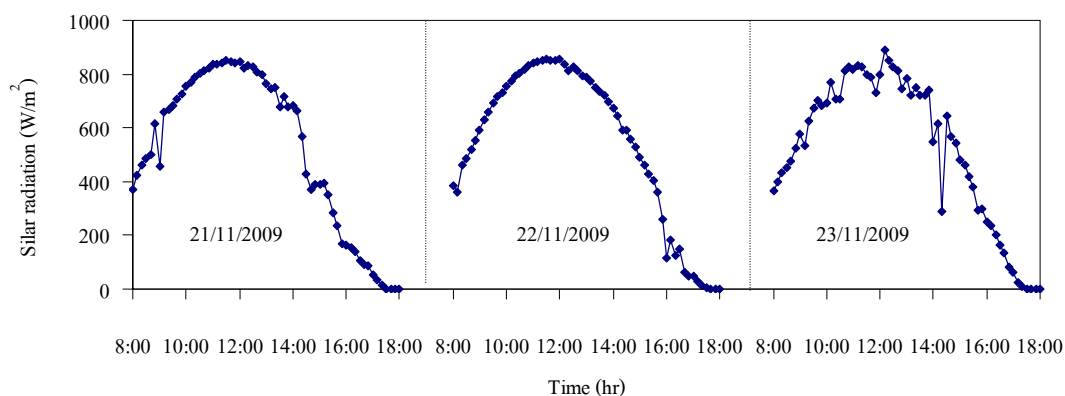
การทดลองครั้งแรกใช้พริกจำนวน 500 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 74 % (wb) ในช่วงที่ทำการทดลองอบแห้งพริกนั้นสภาพท้องฟ้ามีลักษณะแจ่มใสตลอดทั้ง 3 วัน มีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 900 W/m^2 การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.72

ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.73) พบว่าการแปรค่าอยู่ในช่วง $350\text{--}1100 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.74) จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าอากาศแวดล้อม

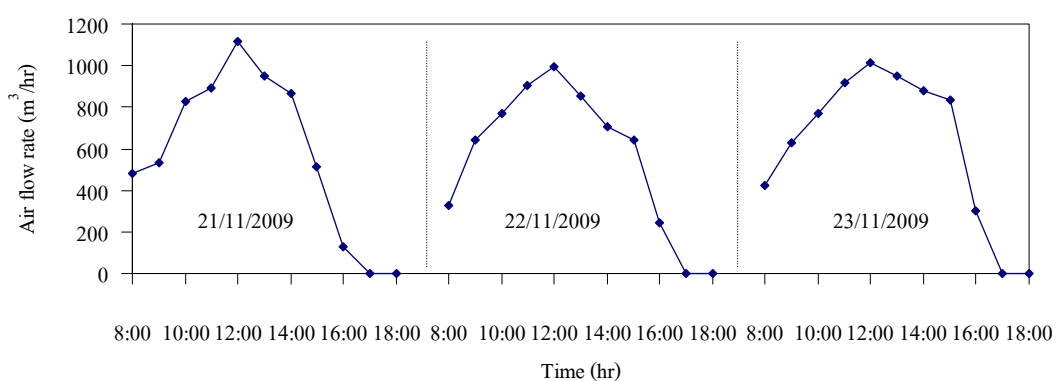
ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.75-3.78) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง มีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $5\text{--}22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งที่อยู่ในระดับเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน

สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพริกมีการเกลี่ยให้บางสม่ำเสมอทำให้สามารถระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว อัตราการลดลงของความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.79) ใช้เวลาในการทดลองเพียง 3 วันทำให้พริกแห้งมีความชื้นของสุดท้ายประมาณ 9 %

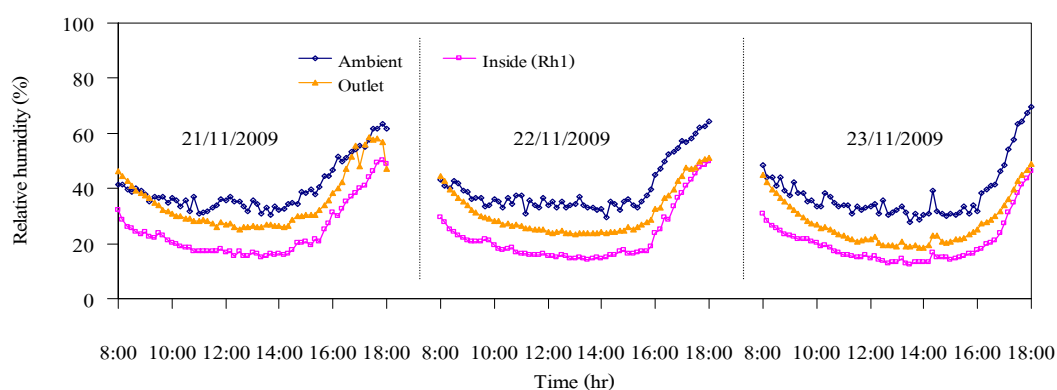
(wb)ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 6 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นเหลือพริกแห้งประมาณ 115 กิโลกรัม



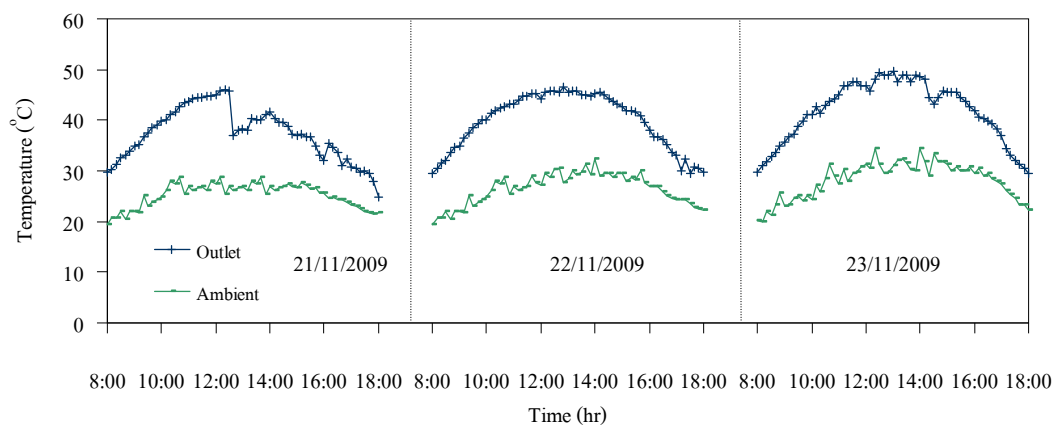
รูปที่ 3.72 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



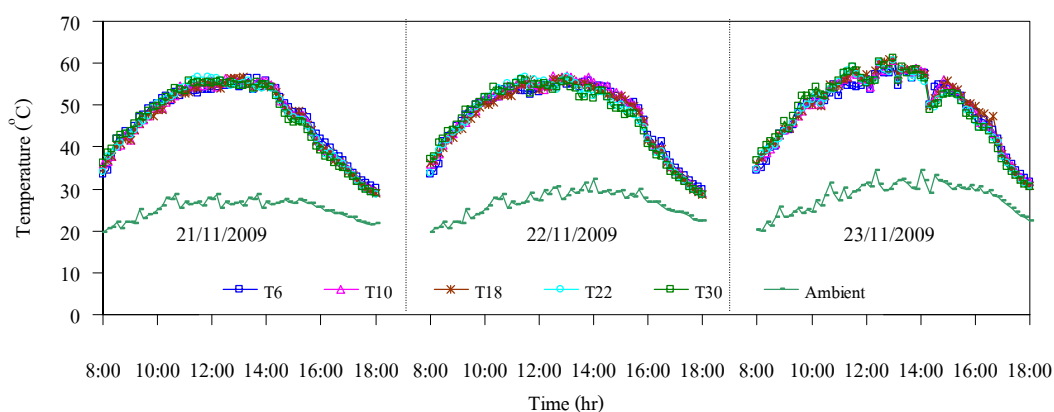
รูปที่ 3.73 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



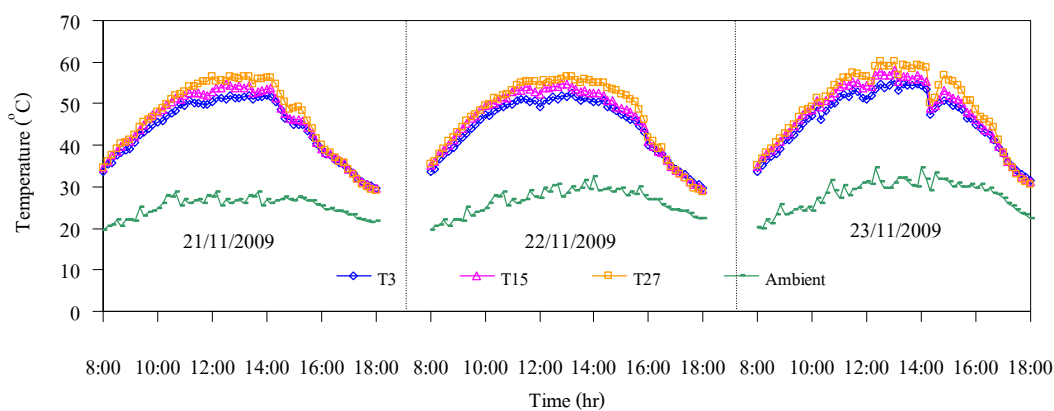
รูปที่ 3.74 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้งกับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



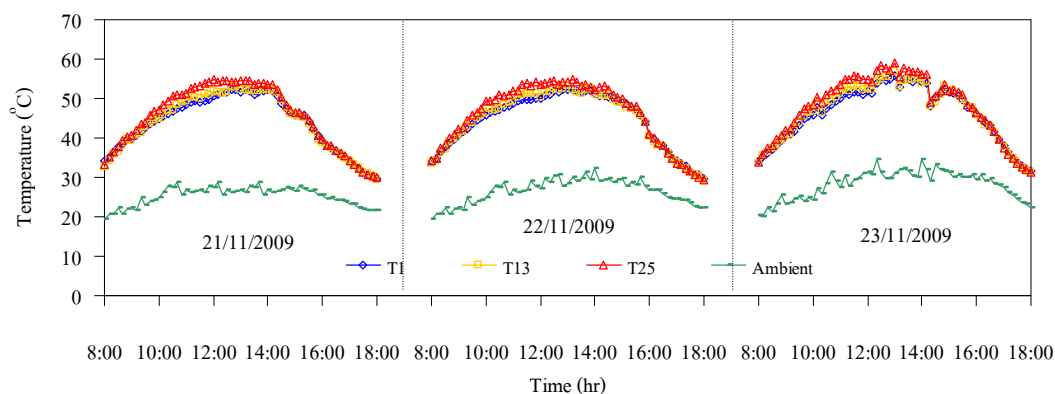
รูปที่ 3.75 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



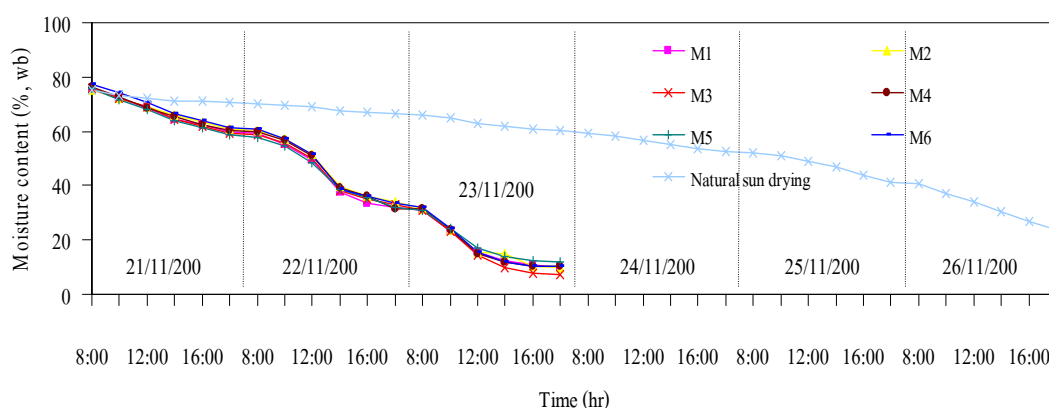
รูปที่ 3.76 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.77 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.78 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.79 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของพริก ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน 2552

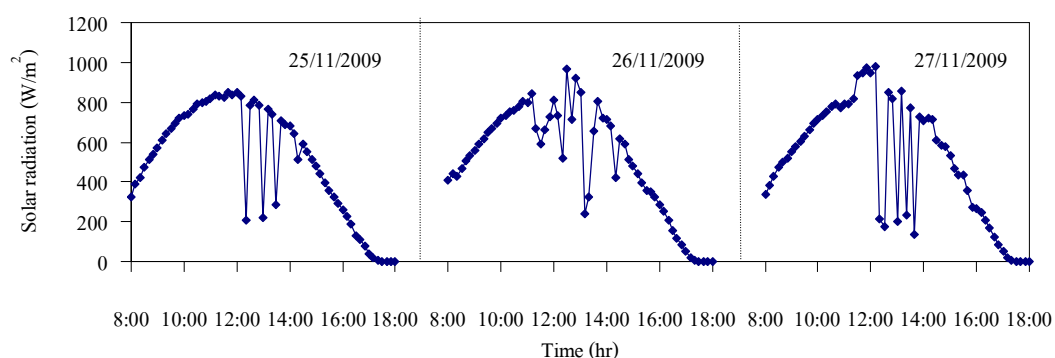
2) ผลการทดลองอบแห้งพริกครั้งที่ 2 (25 – 27 พฤศจิกายน 2552)

การทดลองครั้งที่สองใช้พริกจำนวน 500 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 74 % (wb) ในช่วงที่ทำการทดลองอบแห้งพริกนั้นสภาพท้องฟ้าในวันแรกมีลักษณะแจ่มใสตลอดทั้งวัน มีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 850 W/m^2 ส่วนในวันที่ 2 และ 3 นั้นสภาพท้องฟ้าช่วงบ่ายจะมีเมฆมากเป็นบางเวลา โดยที่ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดของวันที่ 2 และ 3 จะมีค่า 920 W/m^2 และ 980 W/m^2 ตามลำดับ การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.80

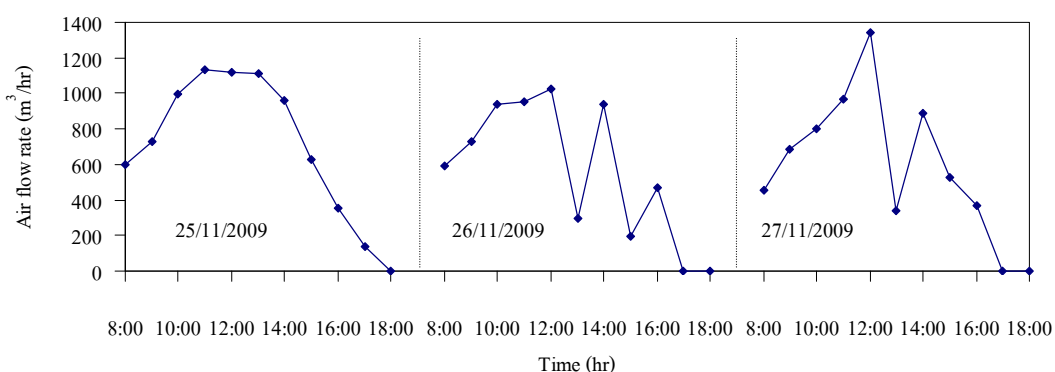
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.81) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง $450\text{--}1350 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.82) จะเห็นว่ามีความต่ำกว่าอากาศแวดล้อมทั้ง 3 วัน

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.83-3.86) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง มีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม 6-20 °C นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งที่อยู่ในระดับเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน

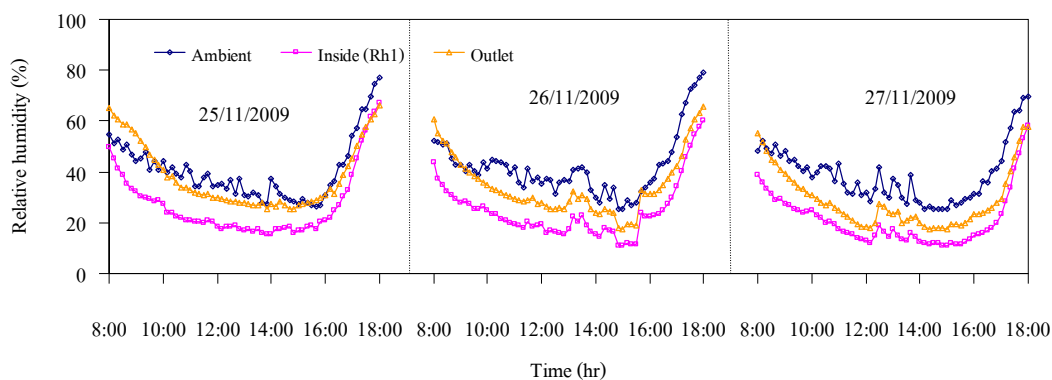
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพริกมีการเกลี่ยให้บางสม่ำเสมอทำให้สามารถระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว อัตราการลดลงของความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง(รูปที่ 3.87) ใช้เวลาในการทดลองเพียง 3 วันทำให้พริกแห้งมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 10 % (wb) ซึ่งใช้น้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 6 วัน หลังการอบแห้งเสร็จสิ้นเหลือพริกแห้งประมาณ 114 กิโลกรัม



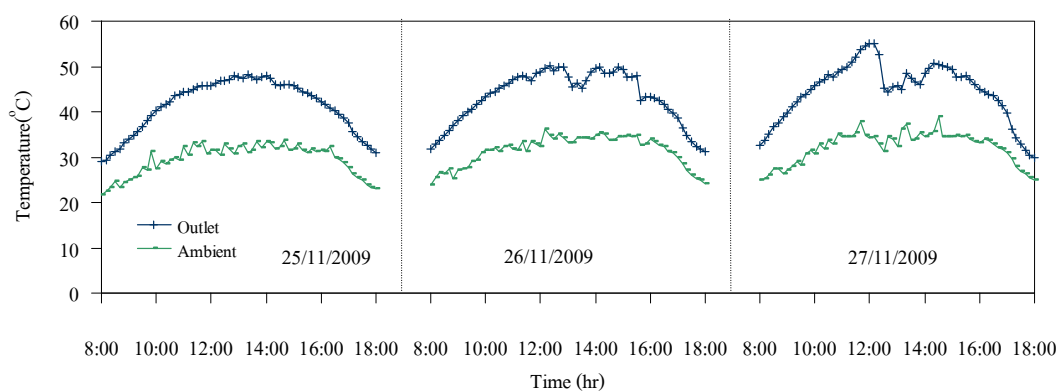
รูปที่ 3.80 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



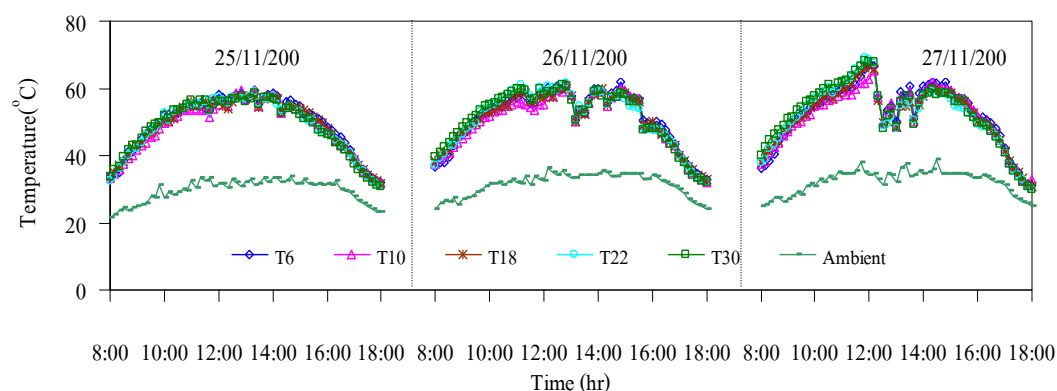
รูปที่ 3.81 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



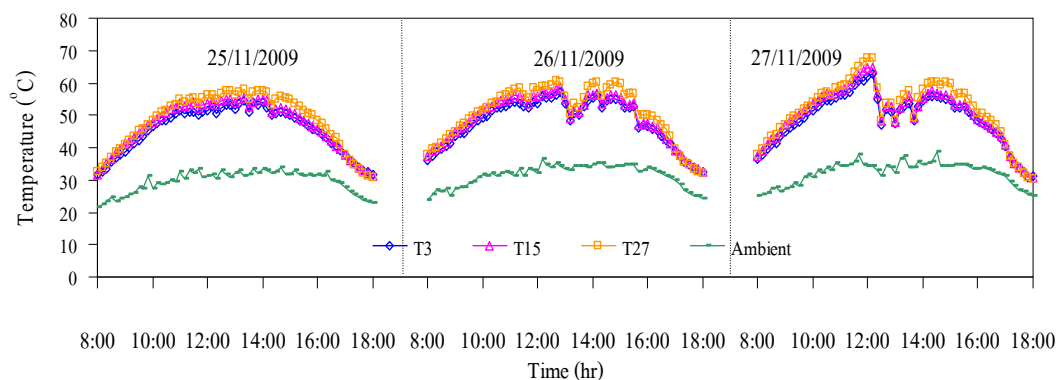
รูปที่ 3.82 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



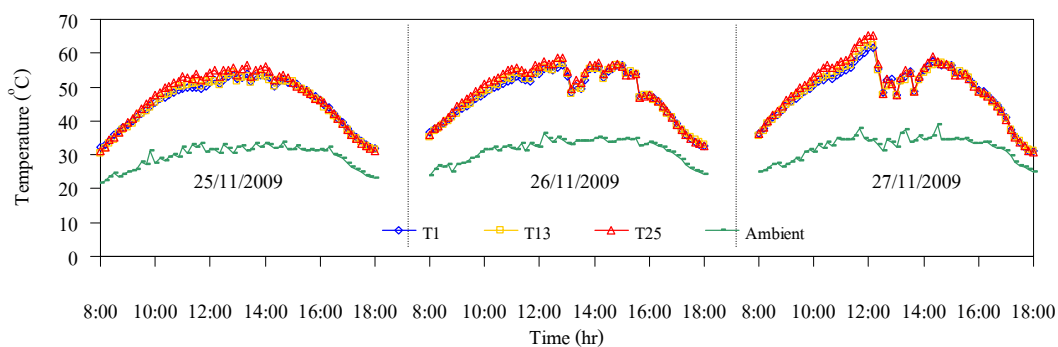
รูปที่ 3.83 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



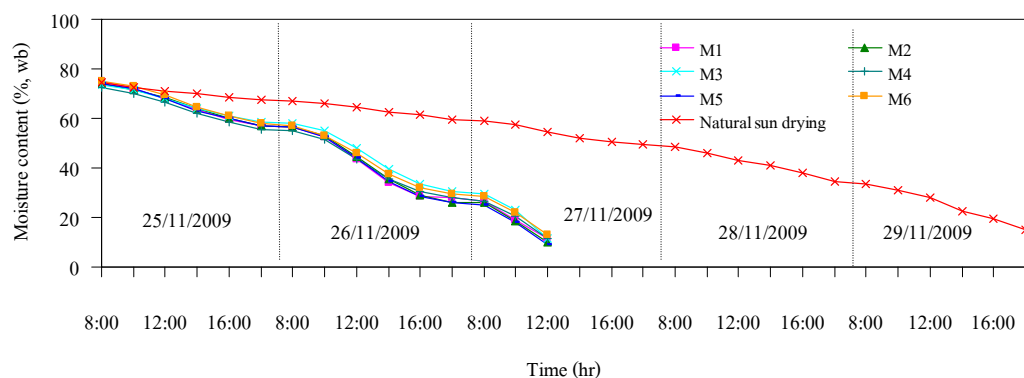
รูปที่ 3.84 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.85 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.86 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.87 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของพริก ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 25 – 27 พฤศจิกายน 2552

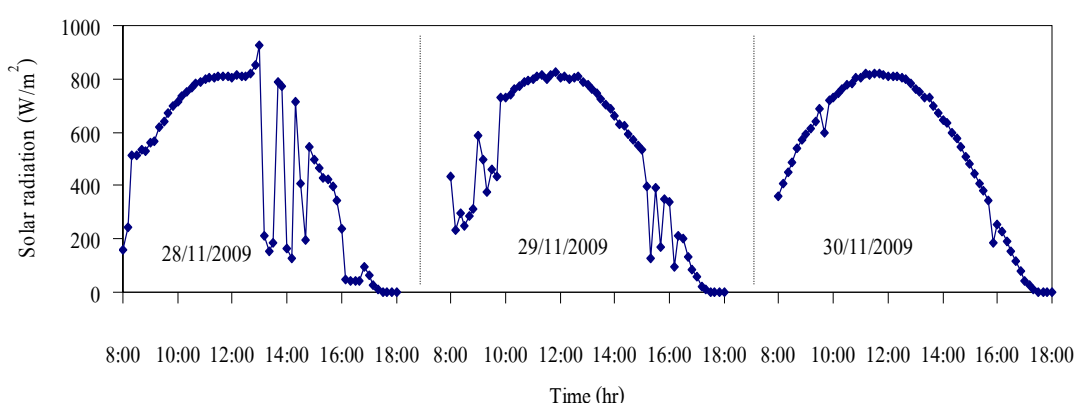
3) ผลการทดลองอบแห้งพริกครั้งที่ 3 (28 – 30 พฤศจิกายน 2552)

การทดลองครั้งที่สามใช้พริกจำนวน 500 กิโลกรัม มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 74 % (wb) ในช่วงที่ทำการทดลองอบแห้งพริกนั้นสภาพท้องฟ้าในวันแรกมีลักษณะแจ่มใสตลอดช่วงเช้า และมีเมฆบ้างในตอนบ่ายของวัน ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดประมาณ 920 W/m^2 ส่วนสภาพท้องฟ้าในวันที่ 2 และ 3 สภาพท้องฟ้าแจ่มใสตลอดทั้ง 2 วัน โดยที่ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดของวันที่ 2 และ 3 จะมีค่า 825 W/m^2 และ 820 W/m^2 ตามลำดับ การแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 3.88

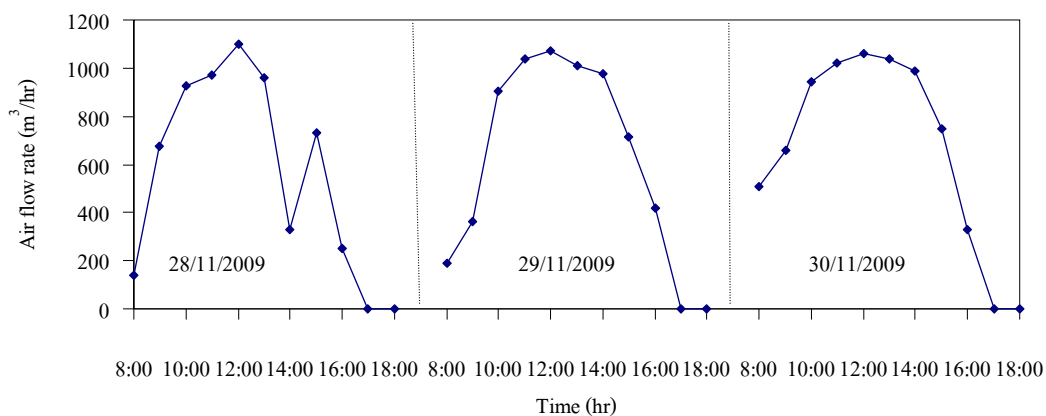
ในด้านของอัตราการไหลของอากาศ (รูปที่ 3.89) มีการแปรค่าอยู่ในช่วง $200\text{--}1100 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งเพียงพอต่อการระบายความชื้นออกจากระบบอบแห้ง สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.90) จะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่าอากาศแวดล้อมตลอดทั้ง 3 วัน

ในด้านของอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.91-3.94) จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบอบแห้ง มีค่าสูงกว่าอากาศแวดล้อม $7\text{--}21 \text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้งที่อยู่ในระดับเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน

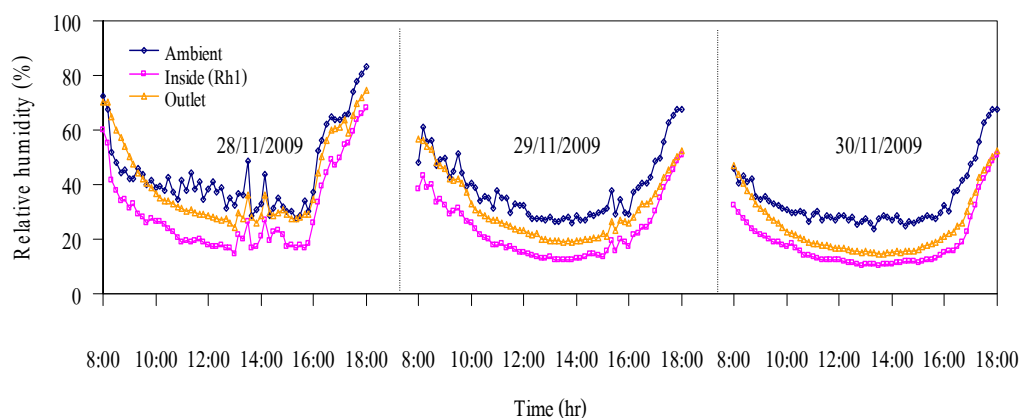
สำหรับด้านความชื้นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพริกมีการเกลี่ยให้บางสม่ำเสมอทำให้สามารถระเหยความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ได้เร็ว อัตราการลดลงของความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 3.95) ใช้เวลาในการทดลองเพียง 3 วันทำให้พริกแห้งมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 9 % (wb) ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติที่ใช้เวลา 6 วัน หลังการอบแห้งเสร็จจึงนำเหลือพริกแห้งประมาณ 115 กิโลกรัม



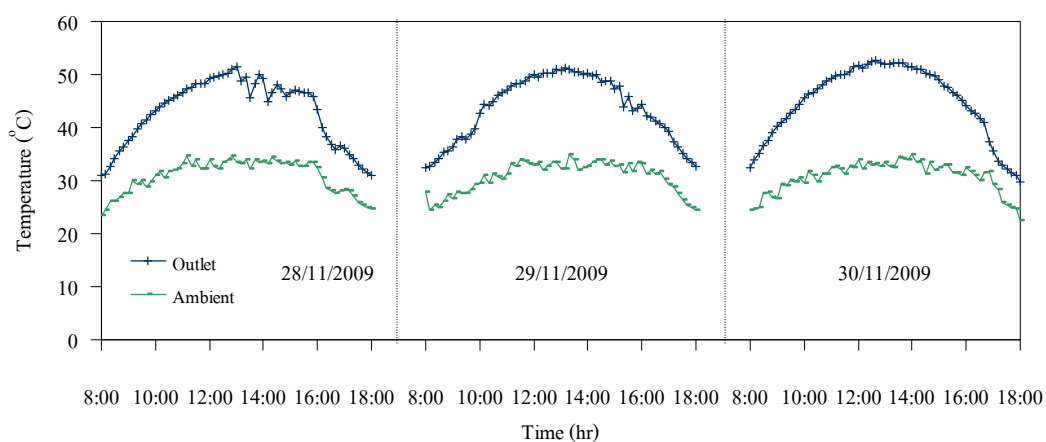
รูปที่ 3.88 กราฟการแปรค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



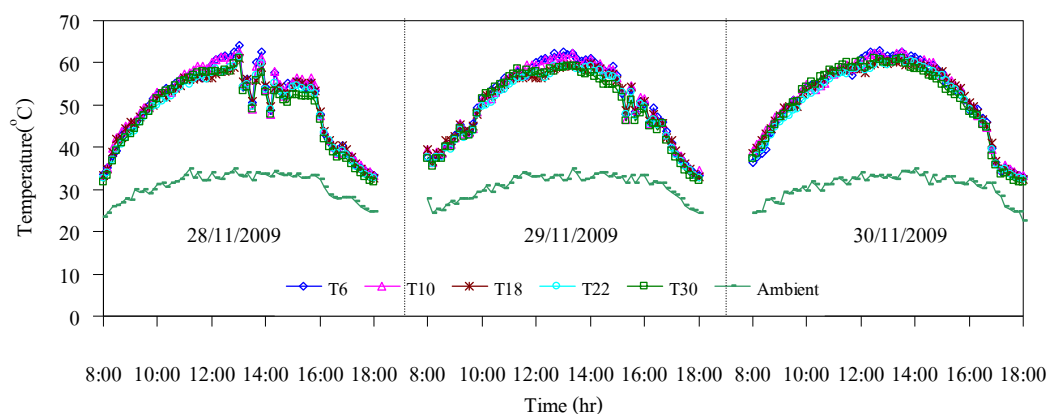
รูปที่ 3.89 กราฟแสดงอัตราการไหลของอากาศระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



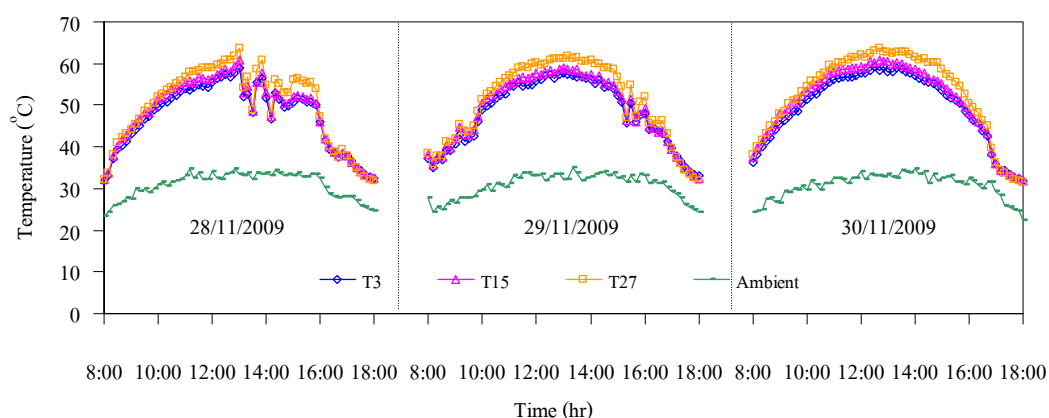
รูปที่ 3.90 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในระบบบอบแห้ง
กับอากาศแวดล้อม ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



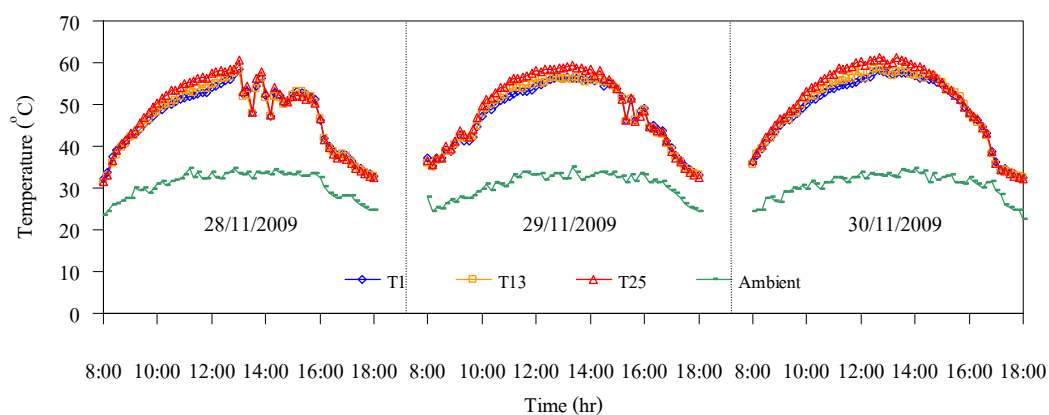
รูปที่ 3.91 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



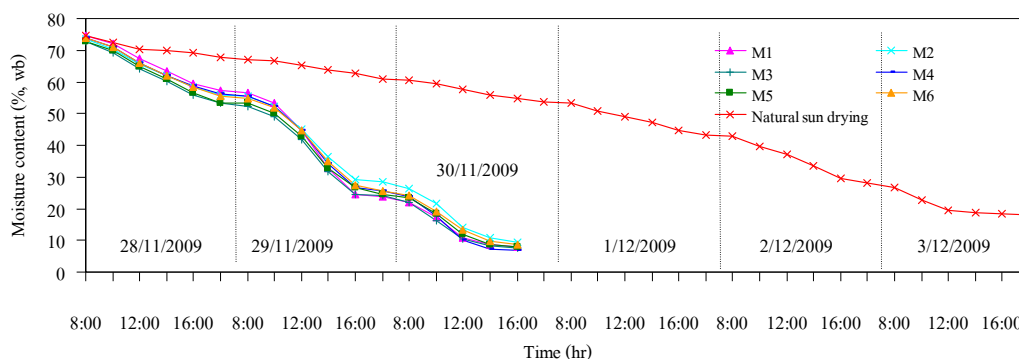
รูปที่ 3.92 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือชั้นวางของระบบ
ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.93 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.94 กราฟแสดงการแปรค่าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งบนตรงส่วนโค้งของระบบบอบแห้ง
ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552



รูปที่ 3.95 กราฟแสดงการแปรค่าความชื้นของฟริก ณ ตำแหน่งต่างๆ ของระบบอบแห้ง ระหว่างวันที่ 28 – 30 พฤศจิกายน 2552

หลังจากทำการทดลอง ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างฟริกไปตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์แห้ง โดยนำตัวอย่างฟริกที่มีความชื้น 10 % (wb) มาทำการวัดค่าแอกติวิตี (Water Activity, a_w) ด้วยเครื่อง Thermoconstanter, TH200 Novasina ผลการวัดค่าแอกติวิตีของฟริกที่อบด้วยระบบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีค่าเท่ากับ 0.47 ซึ่งแสดงว่ารา แบคทีเรียและจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อบแห้งไว้ได้นาน เนื่องจากการวัดสีของฟริกไม่สามารถวัดด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus ได้ ผู้ดำเนินโครงการจึงใช้วิธีการสังเกตด้วยสายตาโดยนำฟริกที่ตากแดดตามธรรมชาติและฟริกที่ตากในระบบอบแห้งมาถ่ายภาพเปรียบเทียบ พบว่าฟริกที่ตากแดดตามธรรมชาติมีสีแดงคล้ำกว่าฟริกที่อบแห้งในระบบอบแห้ง (รูปที่ 3.96) ฟริกที่ตากในระบบอบแห้งมีสีแดงสด ซึ่งแสดงว่าเป็นฟริกแห้งคุณภาพดี ทั้งนี้เนื่องจากจากแผ่นโพลีคาร์บอนเนตมีสารป้องกันรังสี UV อยู่ ทำให้ฟริกที่ตากในระบบอบแห้งไม่ได้รับรังสี UV ฟริกจึงสีไม่คล้ำ นอกจากนี้ในการอบแห้งฟริกควรคัดแยกฟริกที่มีสีเขียวออกจากฟริกแดงก่อนทำการอบแห้ง เนื่องจากฟริกสีเขียวเมื่อทำการอบแห้งแล้วสีจะซีดและออกขาวคล้ำ เมื่อผสมอยู่กับฟริกแห้งสีแดงจะทำให้ขายได้ราคาต่ำลง



ตากในระบบอบแห้ง

ตากตามธรรมชาติ

รูปที่ 3.96 การเปรียบเทียบสีพริกที่ตากในระบบอบแห้งกับตากตามธรรมชาติ

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้ง

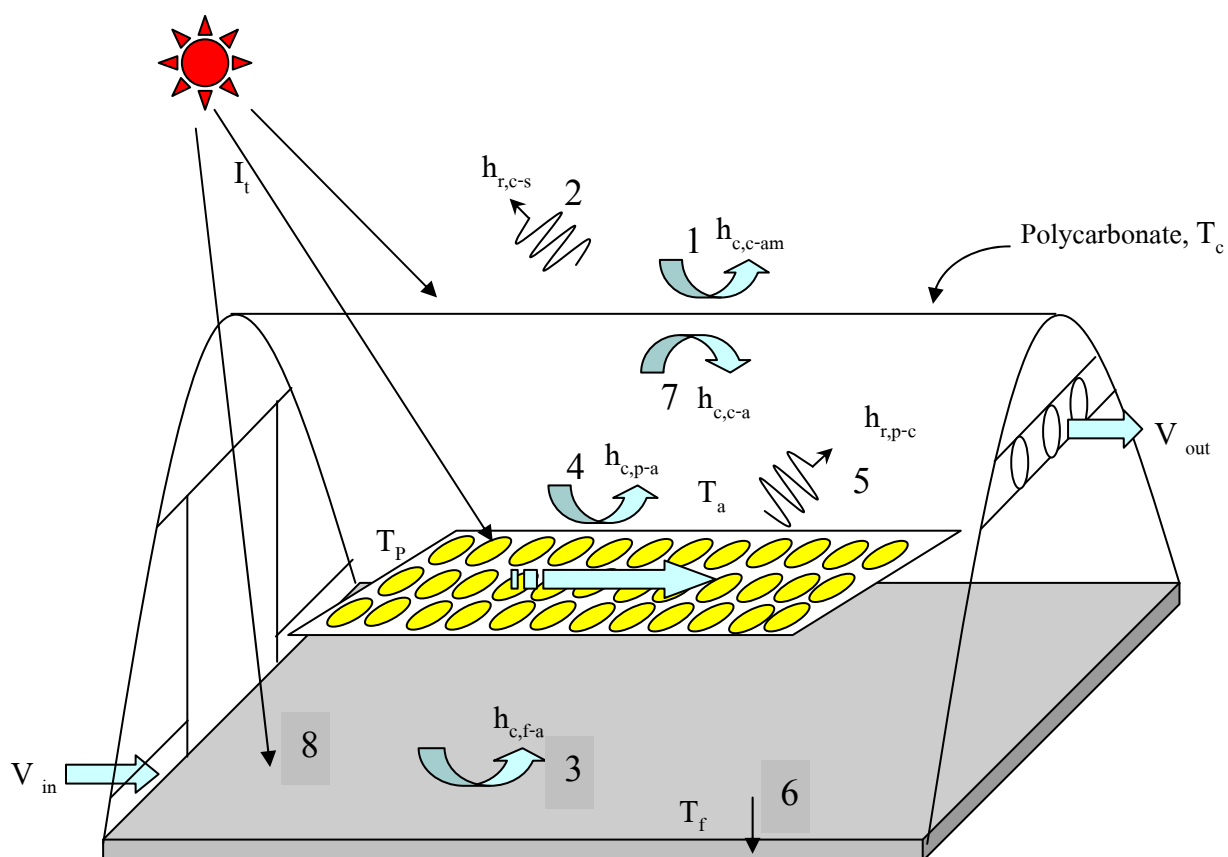
เนื่องจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์ต้องใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในรูปของความร้อนเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง ดังนั้นสมรรถนะของระบบอบแห้งดังกล่าวจึงขึ้นกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะทางอุตุนิยมวิทยา ในการทำงานสมรรถนะของระบบอบแห้งในสภาวะต่างๆ โดยการทดลองในสถานที่ต่างๆจะสิ้นเปลืองมากและบางครั้งไม่สามารถเปรียบเทียบผลในสภาวะแวดล้อมที่เหมือนกันได้ จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งดังกล่าว ในกรณีของการอบแห้งมะเขือเทศแช่แข็งกล้วยแผ่นและพริกดังรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองของ ส่วนอบแห้ง จะมีการตั้งข้อสมมติฐานดังนี้

- 1) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของอากาศ แผ่นฉนวนโปรงแสงและพื้นระบบอบแห้งด้านล่างเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น
- 2) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายความร้อนตามแนวยาวของระบบอบแห้งพิจารณาการกระจายความร้อนตามแนวขวางของระบบอบแห้งเท่านั้น

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับองค์ประกอบต่างๆของระบบอบแห้งแสดงได้ตามแผนภูมิในรูปที่ 4.1 โดยสมการสมดุลทางความร้อนขององค์ประกอบต่างๆเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบกรีนเฮาส์

- 1) การพาความร้อนจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังอากาศแวดล้อม
- 2) การแผ่รังสีจากแผ่นฉนวนโปร่งแสงไปยังท้องฟ้า
- 3) การพาความร้อนจากพื้นไปยังอากาศภายในโรงอบ
- 4) การพาความร้อนจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศภายในระบบบอบแห้ง
- 5) การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังฉนวนโปร่งแสง
- 6) การนำความร้อนจากพื้นไปยังแวดล้อม
- 7) การพาความร้อนจากฉนวนโปร่งแสงไปยังอากาศภายในระบบบอบแห้ง
- 8) การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้น

1) สมการสมดุลพลังงานของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

เอนทาลปีของแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

= ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศภายในระบบอบแห้ง

+ ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังท้องฟ้า

+ ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนโดยลมระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม

+ 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, $[J/kg \cdot ^\circ C]$
	$h_{c,c-a}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศอบแห้ง, $[W/m^2 \cdot K]$
	$h_{r,c-s}$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังท้องฟ้า, $[W/m^2 \cdot K]$
	$h_{r,p-c}$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจากผลิตภัณฑ์ไปยังแผ่นโพลีคาร์บอเนต, $[W/m^2 \cdot K]$
	h_w	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างโพลีคาร์บอเนตกับอากาศแวดล้อม โดยลม, $[W/m^2 \cdot K]$
	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) สมการสมดุลพลังงานของอากาศภายในระบบอบแห้ง

เอนทาลปีของอากาศที่เปลี่ยนไปในช่วงเวลา Δt

- = ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศ
- + ความร้อนที่ถูกถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างพื้นกับอากาศ
- + ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์
- + ผลต่างของค่าเอนทาลปีเนื่องจากอากาศไหลเข้าและออกจากระบบอบแห้ง
- + การสูญเสียความร้อนของอากาศของระบบอบแห้งไปยังอากาศแวดล้อม
- + รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยอากาศและผลิตภัณฑ์

เนื่องจากอากาศมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำ จึงไม่คิดการสะสมความร้อนของอากาศ ดังนั้นจึงเขียนสมการสมดุลพลังงานของอากาศได้ดังนี้

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

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

เมื่อ	A_c	คือ พื้นที่ของแผ่น โพลีคาร์บอเนต, [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, [db]
	t	คือ เวลา, [s]
	T_a	คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, [K]
	T_f	คือ อุณหภูมิของพื้น, [K]

T_{in}	คือ อุณหภูมิของอากาศเข้า, [K]
T_p	คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์, [K]
T_w	คือ อุณหภูมิของน้ำ, [K]
V_{in}	คือ ความเร็วลมไหลเข้าระบบอบแห้ง, [m/s]
V_{out}	คือ ความเร็วลมไหลออกจากระบบอบแห้ง, [m/s]
U_c	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [W/m ² -°C]
ρ_a	คือ ความหนาแน่นของอากาศแห้ง, [kg/m ³]
ρ_p	คือ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, [kg/m ³]
α_{Π}	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของพื้นคอนกรีต, [decimal]
α_p	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์, [decimal]
τ_c	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของโพลีคาร์บอเนต, [decimal]

3) สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์

สมการสมดุลพลังงานของผลิตภัณฑ์ สามารถเขียนได้เป็น

เอนทาลปีของผลิตภัณฑ์ที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา Δt

$$\begin{aligned}
 &= \text{ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{ความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์} \\
 &+ \text{รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยผลิตภัณฑ์}
 \end{aligned}$$

แทนค่าแต่ละเทอมจะได้สมการดังนี้

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

เมื่อ	A_c	คือ พื้นที่ของแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [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 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศรอบข้าง, [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 อุณหภูมิอากาศภายในระบบอบแห้ง, [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

$$\begin{aligned}
 &\text{เอนทาลปีของพื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลา } \Delta t \\
 &= \text{การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างอากาศกับพื้นคอนกรีต} \\
 &+ \text{การสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนจากพื้นคอนกรีตไปยังพื้นดิน}
 \end{aligned}$$

เขียนสมการได้เป็น

$$m_p C_{pn} \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{c,a-p} (T_a - T_p) + A_p U_p (T_g - T_p) \quad (4.4)$$

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

5) สมการสมดุลมวลของอากาศ

เมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลงจะทำให้ความชื้นของอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\rho_a V \frac{dH}{dt} = A_{in} \rho_a H_{in} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out} v_{out} + D_p A_p \rho_p \frac{dM_p}{dt} \quad (4.5)$$

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, db]
	t	คือ เวลา, $[s]$
	V	คือ ปริมาตรของระบบอบแห้ง, $[m^3]$
	V_{in}	คือ ความเร็วลมขาเข้า, $[m/s]$
	V_{out}	คือ ความเร็วลมขาออก, $[m/s]$

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, $[\text{kg/m}^3]$

ρ_p คือ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์, $[\text{kg/m}^3]$

6) สมการอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบางของ มะเขือเทศแช่แข็งกล้วยแผ่นและพริกตามรายละเอียดในภาคผนวก 1 และได้ผลดังนี้

- อบมะเขือเทศแช่แข็ง

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n) \quad (4.6)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

k และ n เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$k = -0.276079 + 0.007230T + 0.001594rh - 0.000099Trh + 0.000041rh^2$$

$$(R^2 = 0.98) \quad (4.7)$$

$$n = 1.511073 - 0.042305T + 0.134277rh - 0.0020655Trh + 0.000533T^2 - 0.001355rh^2$$

$$(R^2 = 0.91) \quad (4.8)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, $[^{\circ}\text{C}]$

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

- อบกล้วยแผ่น

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt) \quad (4.9)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

a และ k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$a = 0.885641 + 0.006444T + 0.005491rh - 0.000049Trh - 0.000072T^2 - 0.000040rh^2 \quad (R^2 = 0.97) \quad (4.10)$$

$$k = -0.644605 + 0.019539T + 0.007549rh - 0.000225Trh - 0.000049T^2 + 0.000098rh^2 \quad (R^2 = 0.99) \quad (4.11)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, [$^{\circ}C$]

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

- 3)อบพริก

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = 1 + at + bt^2 \quad (4.12)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

a และ b เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$a = -0.094592 + 0.002004T + 0.0011351rh - 0.000027Trh - 0.000035T^2 + 0.000038rh^2$$

$$(R^2 = 0.99) \quad (4.13)$$

$$b = 0.007382 - 0.000298T + 0.000038rh + 0.000004T^2 - 0.000002rh^2$$

$$(R^2 = 0.98) \quad (4.14)$$

เมื่อ	T	คือ อุณหภูมิ, [$^{\circ}C$]
	rh	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

7) สมการความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุลของมะเขือเทศแช่
อิม กัลวีย์แผ่น และพริก (ภาคผนวก ข) ซึ่งได้ผลดังนี้

- มะเขือเทศแช่อิม

$$M_e = \left[-\frac{\exp(-33.4344 + 0.7442T)}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{1.2391}} \quad (4.15)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความชื้นสมดุลของกัลวีย์, [%, db]
	a_w	คือ water activity [$a_w = \frac{Rh}{100}$]
	T	คือ อุณหภูมิอากาศ, [$^{\circ}C$]

- กัลวีย์แผ่น

$$M_e = \frac{(22.84227) \cdot (17.42911)a_w}{1 + (16.42911)a_w(1 - a_w)} \quad (4.16)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความชื้นสมดุลของกัลวีย์, [%, db]
	a_w	คือ water activity [$a_w = \frac{Rh}{100}$]

- พริก

$$M_e = -65.2206 - 0.06922T + 0.022734T^2 - 29.4079\psi + 68.31193\psi^2 - 63.4257V + 56.42796V^2 \quad (4.17)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของกล้วย, [%, db]
 a_w คือ water activity [$a_w = \frac{Rh}{100}$]
 T คือ อุณหภูมิอากาศ, [°C]

4.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

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

$$h_{r,p-s} = \epsilon_p \sigma (T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c) \quad (4.18)$$

โดยที่อุณหภูมิท้องฟ้าสามารถหาได้จาก (Duffie and Beckman, 1991)

$$T_s = 0.552 T_a^{1.5} \quad (4.19)$$

2) สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังอากาศแวดล้อมเนื่องจากลม (h_w) ใช้แบบจำลองของ Duffie and Beckman (1991) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$h_{c,c-am} = h_w = 5.7 + 3.8 V_w \quad (4.20)$$

เมื่อ V_w คือ ความเร็วลม, [m/s]

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศในห้องอบกับพื้นและระหว่างอากาศในห้องอบกับแผ่นโพลีคาร์บอเนตจะสามารถหาได้จากสมการที่ 4.21 โดยถือว่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองมีค่าเท่ากัน

$$h_{c,f-a} = h_{c,c-a} = h_{c,p-a} = h_c = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (4.21)$$

เมื่อ	h_c	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, [W/m ² -K]
	Nu	คือ ค่า Nusselt number
	k	คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของอากาศ, [W/m-K]
	D_h	คือ ค่า hydraulic diameter, [m] ซึ่งหาได้จาก

$$D_h = \frac{4WD}{2(W+D)} \quad (4.22)$$

เมื่อ	W	คือ ความกว้างของห้องอบ, [m]
	D	คือ ระยะเฉลี่ยระหว่างพื้นกับแผ่นโพลีคาร์บอเนต, [m]

โดย Nu จะหาได้จากสมการของ Kays and Crawford (1980) ดังสมการ

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad (4.23)$$

เมื่อ	Re	คือ ค่า Reynolds number ซึ่งหาได้จากสมการ
-------	------	---

$$Re = \frac{D_h V_p}{\nu} \quad (4.24)$$

เมื่อ	V	คือ อัตราเร็วของอากาศภายในห้องอบ, [m/s]
	ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ, [kg/m ³]
	ν	คือ viscosity ของอากาศ, [m ² /s]

3) สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต

สำหรับสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (U_c) จะหาได้จากสมการ

$$U_c = \frac{k_c}{L_c} \quad (4.25)$$

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

4.3 การหาผลเฉลย (solution) ของสมการแบบจำลอง

สมการที่ (4.1)-(4.4) เป็นระบบสมการอนุพันธ์ที่ไม่สามารถหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ดังนั้นในการหาผลเฉลยของระบบสมการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข ในงานวิจัยนี้จะหาผลเฉลยของระบบสมการดังกล่าวโดยใช้วิธีผลต่างสลับเนื่อง (finite difference method)

โดยการแปลงสมการของแบบจำลองให้เป็นสมการผลต่างสลับเนื่อง (finite difference method) ดังนี้

$$m_c C_{pc} \frac{(T_{c,t+\Delta t} - T_{c,t})}{\Delta t} = A_c h_{c,c-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{s,t+\Delta t}) + A_c h_{r,c-s} (T_{s,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) \\ + A_c h_w (T_{am,t+\Delta t} - T_{c,t+\Delta t}) + A_p h_{r,p-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) \\ + A_c \alpha_c I_{t,t+\Delta t} \quad (4.26)$$

$$m_c C_{pc} \frac{(T_{a,t+\Delta t} - T_{a,t})}{\Delta t} = A_p h_{c,p-a} (T_{p,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) + A_f h_{c,f-a} (T_{f,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \\ + A_p D_p C_{pv} \rho_p (T_{p,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \left[\frac{M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t}}{\Delta t} \right] \\ + (\rho_a V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_a V_{in} C_{pa} T_{in}) + U_c A_c (T_{am,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t}) \\ + [(1 - F_p)(1 - \alpha_{fl}) + (1 - \alpha_{fl}) F_p] A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \quad (4.27)$$

$$m_c (C_{pp} + C_{pl} M_p) \frac{(T_{p,t+\Delta t} - T_{p,t})}{\Delta t} = A_p h_{c,p-a} (T_{a,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) + A_p h_{r,p-c} (T_{c,t+\Delta t} - T_{p,t+\Delta t}) \\ + A_p D_p \rho_p [L_p + C_{pv} (T_{p,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t})] \frac{M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t}}{\Delta t} \\ + F_p \alpha_p A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \quad (4.28)$$

$$m_{fl} C_{pfl} \frac{(T_{fl,t+\Delta t} - T_{fl,t})}{\Delta t} = A_{fl} h_{c,a-fl} (T_{a,t+\Delta t} - T_{fl,t+\Delta t}) + A_{fl} h_{c,fl-g} (T_{g,t+\Delta t} - T_{fl,t+\Delta t}) \quad (4.29)$$

$$\rho_a V \frac{(H_{t+\Delta t} - H_t)}{\Delta t} = A_{in} \rho_a H_{in,t+\Delta t} v_{in} - A_{out} \rho_a H_{out,t+\Delta t} v_{out,t+\Delta t} + \\ D_p A_p \rho_p \frac{(M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t})}{\Delta t} \quad (4.30)$$

$$M_{t+\Delta t} = M_{e,t+\Delta t} + (M_o - M_{e,t+\Delta t}) A_{t+\Delta t} e^{-B_{t+\Delta t}(t+\Delta t)} \quad (4.31)$$

จากสมการที่ 4.26 – 4.31 เขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m_c C_{pc}}{\Delta t} + A_c h_{c,c-a} + A_c h_{r,c-s} + A_c h_w - A_p h_{r,p-c} \right] T_{c,t+\Delta t} - A_c h_{c,c-a} T_{a,t+\Delta t} + A_p h_{r,p-c} T_{p,t+\Delta t} \\ & = \frac{m_c C_{pc} T_{c,t}}{\Delta t} + A_c h_{r,c-s} T_{s,t+\Delta t} + A_c h_w T_{am,t+\Delta t} + A_c \alpha_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m_c C_{pc}}{\Delta t} + A_p h_{c,p-a} + A_{fl} h_{c,fl-a} + A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t+\Delta t}}{\Delta t} - A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t}}{\Delta t} + U_c A_c \right] T_{a,t+\Delta t} \\ & - [A_p h_{c,p-a} + A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t+\Delta t}}{\Delta t} - A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{M_{p,t}}{\Delta t}] T_{p,t+\Delta t} - A_{fl} h_{c,fl-a} T_{fl,t+\Delta t} \\ & = \frac{m_c C_{pc} T_{a,t}}{\Delta t} + (\rho_a V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_a V_{in} C_{pa} T_{in}) + U_c A_c T_{am,t+\Delta t} \\ & + [(1-F_p)(1-\alpha_f) + (1-\alpha_f)F_p] A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{m_c (C_{pp} + C_{pl} M_p)}{\Delta t} + A_p h_{c,p-a} + A_p h_{r,p-c} - [A_p D_p \rho_p [L_p + C_{pv} (T_{p,t+\Delta t} - T_{a,t+\Delta t})]] \frac{M_{p,t+\Delta t} - M_{p,t}}{\Delta t} \right] \\ & - A_p h_{c,p-a} T_{a,t+\Delta t} - A_p h_{r,p-c} T_{c,t+\Delta t} = F_p \alpha_p A_c \tau_c I_{t,t+\Delta t} \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\left[\frac{m_{fl} C_{pfl}}{\Delta t} + A_{fl} h_{c,a-fl} + A_{fl} h_{c,fl-g} \right] T_{fl,t+\Delta t} - A_{fl} h_{c,a-fl} T_{a,t+\Delta t} - A_{fl} h_{c,fl-g} T_{g,t+\Delta t} = \frac{m_{fl} C_{pfl} T_{f,t}}{\Delta t} \quad (4.35)$$

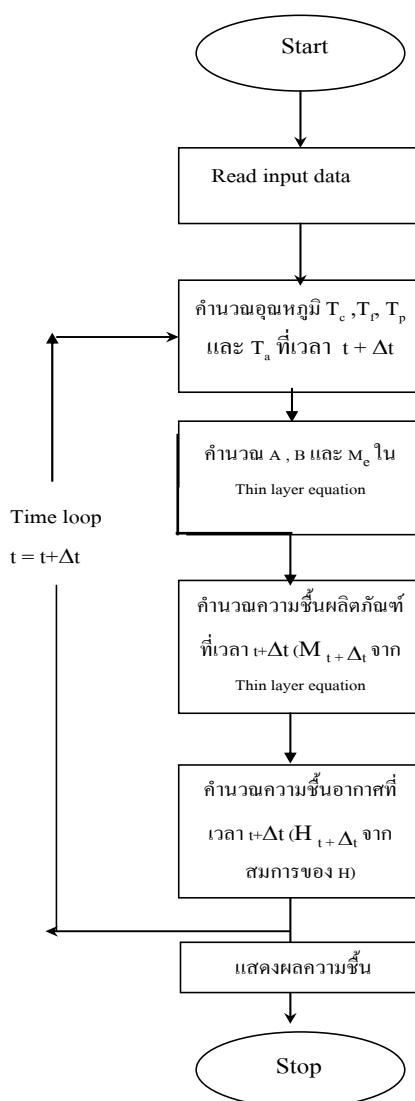
$$\frac{\rho_a V H_{t+\Delta t}}{\Delta t} - \frac{D_p A_p \rho_p M_{p,t+\Delta t}}{\Delta t} = A_{in} \rho_a H_{in,t+\Delta t} V_{in} - A_{out} \rho_a H_{out} V_{out,t+\Delta t} + \frac{D_p A_p \rho_p M_{p,t}}{\Delta t} \quad (4.36)$$

$$M_{t+\Delta t} = M_{e,t} + (M_o - M_{e,t}) A_t e^{-B_t(\Delta t)} \quad (4.37)$$

ในลำดับแรกจะทำการคำนวณอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต(T_c) อากาศ(T_a) ผลิตภัณฑ์(T_p) และพื้น(T_{fl}) ที่เวลา $t + \Delta t$ โดยใช้สมการที่ (4.32) – (4.35) ตามลำดับ ลำดับต่อมาจะคำนวณค่าอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เวลา $t + \Delta t$ ซึ่งได้จากขั้นตอนแรก และนำมาทำการคำนวณพารามิเตอร์ของสมการอบแห้งชั้นบาง (A , B และ M_o) จากนั้นจะนำ

ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแทนค่าในสมการรอบข้างชั้นบาง (4.37) เพื่อคำนวณหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลา $t + \Delta t$ ($M_{t+\Delta t}$) และใช้ค่าดังกล่าวไปคำนวณความชื้นของอากาศที่เวลา $t + \Delta t$ ($H_{t+\Delta t}$) จากสมการ(4.36)ลำดับสุดท้ายจะกลับขึ้นไปคำนวณอุณหภูมิของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (T_c) อากาศ (T_a) ผลิตภัณฑ์ (T_p) และพื้น (T_n) ที่เวลา $t + \Delta t$ และดำเนินการซ้ำกระบวนการเดิมจนได้ความชื้นของผลิตภัณฑ์สุดท้ายตามต้องการ

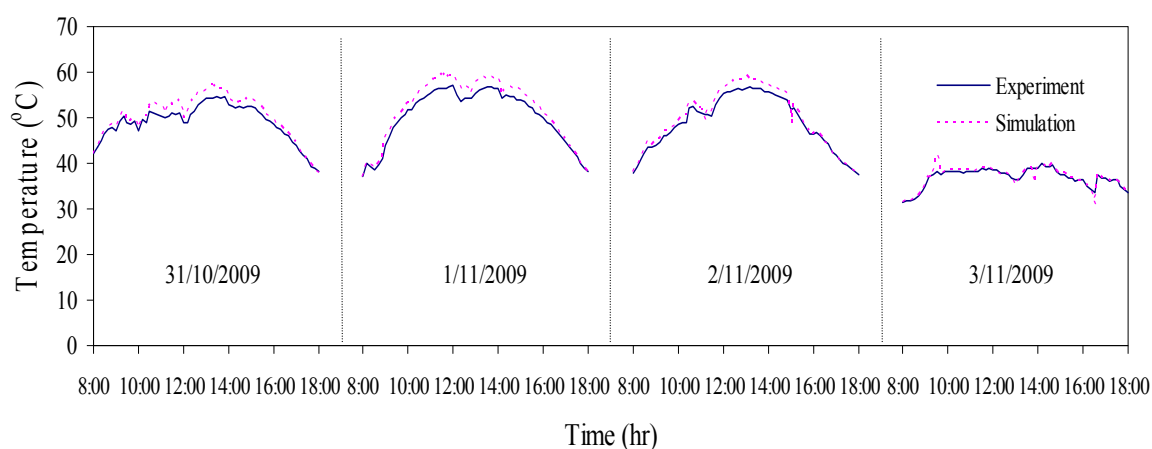
เนื่องจากการคำนวณจะต้องทำซ้ำกระบวนการเดิมทุกช่วงเวลา Δt ดังนั้นผู้วิจัยจึงเขียนโปรแกรมเป็นภาษา Fortran เพื่อทำการคำนวณ โดยมีขั้นตอนตามแผนภูมิในรูปที่ 4.2



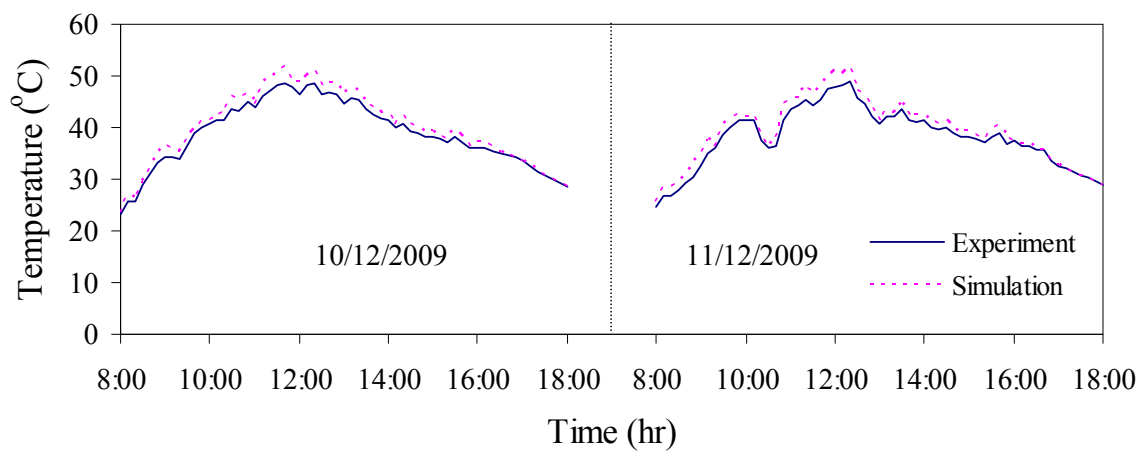
รูปที่ 4.2 แผนภูมิสำหรับคำนวณอุณหภูมิ ความชื้น และตัวแปรของระบบอบแห้ง

4.4 การทดสอบแบบจำลอง

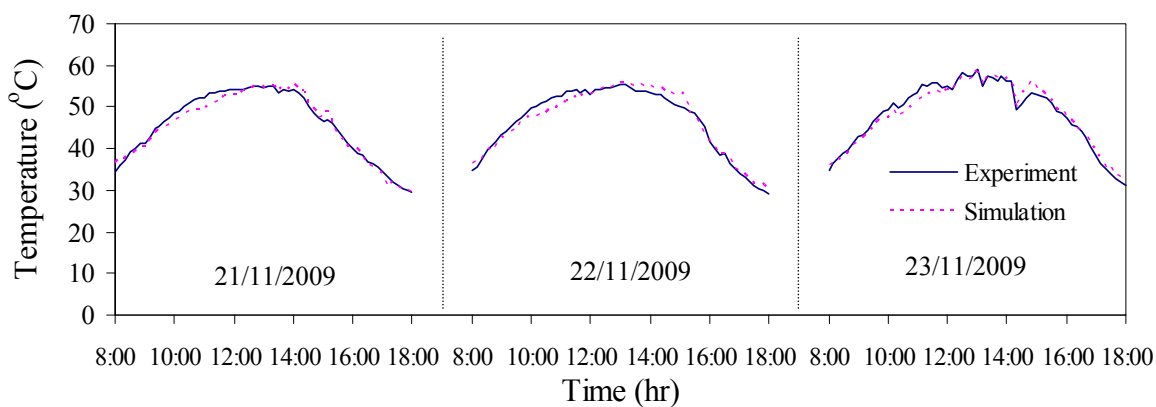
ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ผู้วิจัยจะทำการจำลองแบบการทำงานของระบบอบแห้ง แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สำหรับค่าตัวแปรต่างๆในแบบจำลอง กรณีตัวแปรทางเรขาคณิต เช่นขนาดขององค์ประกอบของส่วนอบแห้งจะใช้ขนาดที่เป็นจริง สำหรับสมบัติทางความร้อน เช่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่างๆ จะคำนวณตามสูตรที่กล่าวไปแล้ว โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในสูตรจากเอกสารอ้างอิงต่างๆของ Duffie and Beckman (1991) และข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมจะใช้ค่าที่ได้จากการวัดจริงที่ทำการทดลอง โดยการ simulation จะทำทุกๆ 10 นาทีเท่ากับช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ผลการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในส่วนอบ แห้งไว้ในรูปแบบที่ 4.3-4.5 และผลการเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นของผลิตภัณฑ์แสดงไว้ในรูปแบบที่ 4.6-4.8 นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้หาความแตกต่างของผลที่ได้จากแบบจำลองและจากการวัด ในรูปของ root mean square differences (RMSD)



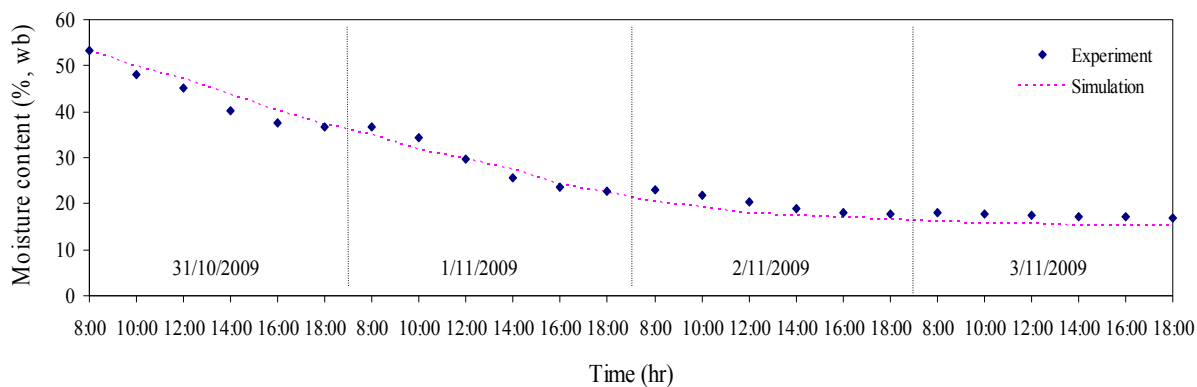
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง
และจากผลการทดลองอบมะเขือเทศเชื่อมระหว่างวันที่
31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552



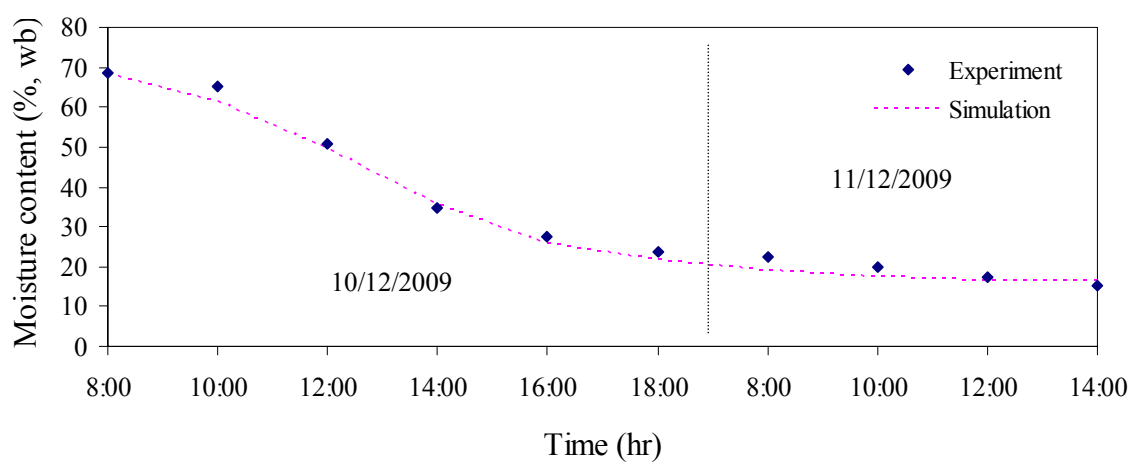
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง
และจากผลการทดลองอบกล้วยแผ่นระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม พ.ศ. 2552



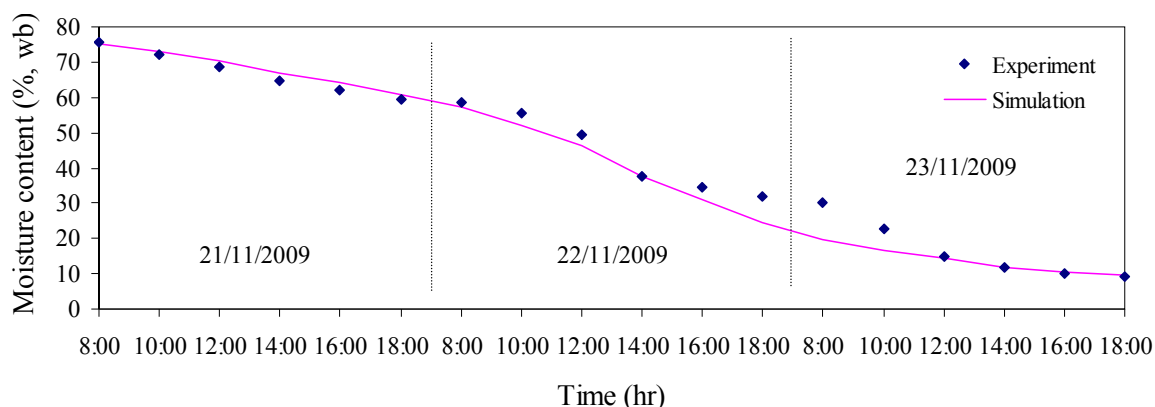
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการแปรค่าอุณหภูมิอากาศบริเวณอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง
และจากผลการทดลองอบพริกระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของมะเขือเทศเชื่อมที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดระหว่างวันที่ 31 ตุลาคม – 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของกล้วยแผ่นที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ระหว่างวันที่ 10 – 11 ธันวาคม พ.ศ. 2552



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการคำนวณความชื้นของพริกที่อบแห้ง โดยอาศัยแบบจำลอง
เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดระหว่างวันที่ 21 – 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2552

จากผลการจำลองการทำงานของส่วนอบแห้งพบว่ากรณีที่ห้องฟ้าแจ่มใส อุณหภูมิอากาศที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัด แต่ในกรณีที่รังสีดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเมฆ อุณหภูมิจากการ simulation จะมีค่าต่ำกว่าผลการวัด แต่ยังคงมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันทั้งนี้เพราะค่าตัวแปรบางตัว เช่น ความร้อนจำเพาะที่นำมาใช้อาจมีความคลาดเคลื่อน เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้การวัดและการคำนวณพบว่า ค่า RMSD ของมะเขือเทศเชอร์รี่ กล้วยแผ่นและพริกมีค่าเท่ากับ 2.9% 3.2% และ 2.7% ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างน้อย

สำหรับผลการทำนายค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ ในการจำลองการทำงานของระบบอบแห้งพบว่า กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของความชื้นของมะเขือเทศเชอร์รี่และกล้วยแผ่นมีลักษณะใกล้เคียงกัน สำหรับพริกนั้นในช่วงวันแรกกราฟที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของความชื้น มีลักษณะใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงระหว่างวันที่ 2 และ 3 จากกราฟพบว่ามีความชื้นของพริกจากแบบจำลองจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง และแบบจำลองการอบแห้งขึ้นบางรวมถึงแบบจำลองความชื้นสมดุลที่ยังมีความคลาดเคลื่อน และมีค่า RMSD ของมะเขือเทศเชอร์รี่ กล้วยแผ่นและพริกมีค่าเท่ากับ 6.8% 5.1% และ 7.8% ตามลำดับ

จากผลการทดลองนี้แบบจำลองสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าสมรรถนะของระบบอบแห้งในสภาวะของการอบแห้งต่างๆได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้ง ซึ่งจะเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบอบแห้งให้ดีขึ้น หรือใช้ในงานด้าน optimization ต่อไปได้

บทที่ 5

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนิน การทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งแบบกรีนเฮาส์ ซึ่งติดตั้งที่ วิสาหกิจชุมชน ตำบลคอนตูม อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ที่โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ บริษัท อุตสาหกรรมการเกษตรเขาค้อ จำกัด อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ และที่ องค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ระบบอบแห้งดังกล่าวมีความ กว้าง 8.0 เมตร ยาว 20.0 เมตร และสูง 3.5 เมตร ตั้งอยู่บนพื้นคอนกรีตตามแนวยาวในทิศเหนือและ ทิศใต้ พื้นที่ทำหน้าตัดเป็นรูปพาราโบลาปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตซึ่งช่วยทำให้เกิดภาวะเรือน กระจก (greenhouse effect) และมีเครื่องเผาไหม้แก๊ส (LPG burner) ขนาดประมาณ 100 kW สำหรับใช้ในขณะที่ไม่เพียงพหรือในช่วงฝนตก ระบบอบแห้งดังกล่าวสามารถอบแห้ง ผลผลิตมันสำปะหลังได้ประมาณ 1,000 กิโลกรัม ในการระบายความชื้นของผลผลิตมันสำปะหลัง จะใช้พัดลมดูด อากาศ ขนาด 14 วัตต์ จำนวน 9 ตัว ดูดอากาศภายในเครื่องอบแห้งออกสู่สิ่งแวดล้อม พัดลมดังกล่าว ใช้กำลังไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 50 วัตต์ จำนวน 3 แผง ซึ่งติดตั้งบนเสาสูงข้างเครื่อง อบแห้ง

ในการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งดังกล่าว ผู้วิจัยได้ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล สำหรับวัดอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในระบบอบแห้ง และติดตั้งอุปกรณ์วัดความชื้นรังสีอาทิตย์ จากนั้นได้ทำการทดลองอบแห้งมะเขือเทศแช่เย็นจำนวน 1,000 กิโลกรัม จำนวน 3 ครั้ง พบว่า อุณหภูมิอากาศในระบบอบแห้งแปรค่า 40 °C-58 °C ในช่วง 8:00 – 18:00 น. และสามารถอบแห้ง มะเขือเทศแช่เย็นได้ โดยใช้เวลา 4 วัน ซึ่งเร็วกว่าการตากแดดตามธรรมชาติที่ใช้เวลา 6-7 วัน สำหรับที่บริษัทอุตสาหกรรมการเกษตรเขาค้อ จำกัด ได้ทำการทดลองอบแห้งกล้วยแผ่น 3 ครั้งๆ ละ 200 กิโลกรัม โดยใช้เวลาอบแห้งครั้งละ 2 วัน ซึ่งเร็วกว่าการตากแดดตามธรรมชาติที่ใช้เวลา 4 วัน กรณีของกลุ่มเกษตรกรองค์การบริหารส่วนตำบลหัวเรือ ผู้ดำเนินโครงการได้ทดลองอบแห้ง พริกจำนวน 3 ครั้งๆ ละ 500 กิโลกรัม โดยแต่ละครั้งจะใช้เวลา 3 วัน ซึ่งเร็วกว่าการตากแดดตาม ธรรมชาติที่ใช้เวลา 6 วัน จากการทดลองอบแห้งผลผลิตมันสำปะหลังในระบบอบแห้งทั้ง 3 แห่ง พบว่า สามารถแก้ปัญหาการรบกวนของแมลง และการเปียกฝน โดยผลผลิตมันสำปะหลังที่ได้มีคุณภาพดี เมื่อ เทียบกับผลผลิตมันสำปะหลังคุณภาพดีที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้งโดยการเขียนสมการสมดุลพลังงานและสมการสมดุลมวลของส่วนต่างๆ อากาศและผลิตภัณฑ์ในระบบอบแห้ง จากนั้นได้แก้สมการโดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) และทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิและความชื้นกับผลที่ได้จากการวัด พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน แบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ทำนายสมรรถนะของระบบอบแห้งในสภาพแวดล้อมต่างๆ และนำไปใช้ปรับปรุงสมรรถนะของระบบอบแห้งให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

บรรณานุกรม

- Bakker –Arkema, F.W. and Hall, C.W. Drying Cereal Grains. AVT, Westport, Connecticut. 1974.
- Bauer, K., Development and optimization of a low-temperature drying schedule for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden in a solar-assisted timber dryer, Doctorate Thesis, Hohenheim University. 2003.
- Bux, M., Arnold, M., Serano, P., Mühlbauer, W. Solar assisted: Greenhouse type dryer. u: FAO-SREN First Workshop on Decentralized Rural Energy Resources: Solar Wind Geothermal Energy, Freising, 1996.
- Condori, M., Saravia, L., The performance of forced convection greenhouse driers, Renewable Energy 13, 453-469, 1998.
- Condori, M., Echazu, R., Saravia, L. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier, Renewable Energy 22, 447–460, 2001.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of thermal Processes, John Wiley and sons, New York.
- Hossain, A., Forced convection solar drying of chilli, A thesis submitted as a part of Farm Power and Machinery at Bangladesh Agricultural University. 2003.
- Iglesias H.A., Chirife, J. In: Handbook of Food isotherms, Academic Press, New York, (1982)
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M., Thongsathitya, A. Development of a method generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment, Solar Energy 78, 739-751, 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., Bala, B.K. Development, Design and Performance of a PV-Ventilated Greenhouse Dryer, International Energy Journal 8, 249-258, 2007.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Boonrod, Y., Haewsungcharern, M., Bala, B.K., Nagle, M., Muller, J. Solar drying of peeled longan using a side loading type solar tunnel dryer: Experimental and simulated performance, Drying Technology 27, 595–605, 2009.

- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Bala, B.K., Nagle, M., Muller, J. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, *Solar Energy* 83, 1550-1565, 2009.
- Kurklu, A., Bilgin, S., Ozkan, B., A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse, *Renewable Energy* 28, 683-697, 2003.
- Koyuncu, T. An investigation on the performance improvement of greenhouse type agricultural dryers, *Renewable Energy* 31:1055–1071, 2006.
- Kamaruddin, A., Drying of vanilla pods using greenhouse effect solar dryer, *Drying Technology* 15, 685-698, 1997.
- Muller, J., G. Risinger. J. Kisgeci, E. Kotta, M. Tesic and W. Mühlbauer. Development of a greenhouse type solar dryer for medicinal plants and herbs. *Journal of Solar and Wind Techonology*. 6(5): 523-530. 1989.
- Prestemon, D.R. Solar Lumber Drying Forestry Extension Notes F-347. Iowa State University (Ames), 1983.
- Salihoglu, N.K., Pinarli, V., Salihoglu, G., Solar drying in sludge management in Turkey, *Renewable Energy* 32, 1661-1675, 2007.
- Sethi, V.P., Sadhna, A., Improvement in greenhouse solar drying using inclined north wall reflection, *Solar Energy* 83, 1472 – 1484, 2009.
- Sodha, M.S., Solar Crop Drying. CRC Press, Boca Raton, Florida. 1987.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การทดลองเพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบาง

ภาคผนวก ก

การทดลองเพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบาง

การทดลองหาสมการอบแห้งชั้นบางเป็นการทดลองอบแห้งผลผลิตที่วางเป็นชั้นเดียวในเครื่องอบจนกว่าความชื้นของผลผลิตจะไม่เปลี่ยนแปลงโดยตั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งภายในเครื่องอบแห้งไว้ที่ค่าหนึ่งๆ เพื่อหาอัตราการลดลงของความชื้นของผลผลิตที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้นๆ สมการอบแห้งชั้นบางที่ได้จะนำไปใช้ในการทำนายความชื้นของผลผลิตในเครื่องอบแห้งที่เวลาใดๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น

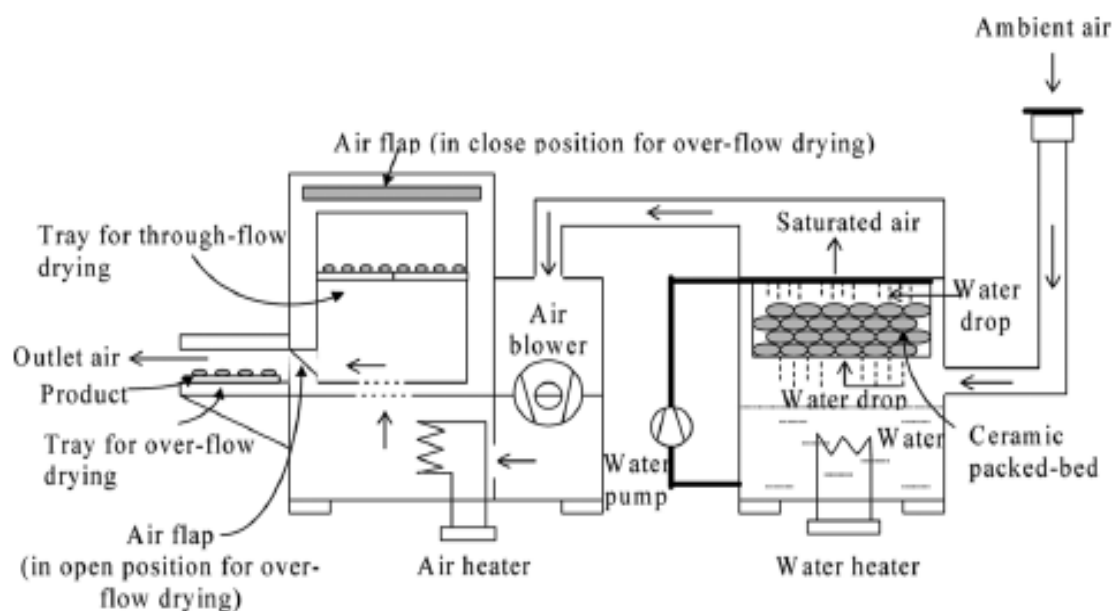
เพื่อให้ได้ผลการทำนายความชื้นของผลผลิตที่แม่นยำผู้วิจัยจึงเลือกที่จะทำการทดลองที่ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งในช่วงเดียวกันกับผลการทดลองที่ได้จริงจากการทดสอบสมรรถนะของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์ 10% 20% และ 30% โดยเป่าอากาศร้อนไหลขนานกับแผ่นชั้นบางของผลผลิต (Over-flow and under-flow drying) ที่อัตราเร็วเท่ากับอัตราเร็วอากาศสูงสุดในเครื่องอบแห้งคือประมาณ 1 m/s

ก. วิธีการทดลองหาสมการอบแห้งชั้นบาง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศจากภายนอกให้ผ่านถึงน้ำบรรจุเซรามิก (Ceramic packed – bed) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ อากาศที่ผ่านถึงดังกล่าวจะอิ่มตัว หลังจากนั้นจะทำให้ร้อนขึ้นโดยขดลวดต้านทานไฟฟ้า อากาศที่ได้จะมีค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิตามต้องการ ผู้วิจัยจะใช้อุปกรณ์ดังกล่าวหา drying curve ของผลิตภัณฑ์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) ปรับอัตราเร็วอากาศในช่องอบแห้งให้ได้ 1 m/s
- 2) ปรับอุณหภูมิของน้ำในอุปกรณ์ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
- 3) ปรับอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากชุดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์
- 4) วางตัวอย่างที่รู้น้ำหนักแล้วลงบนตะแกรงในช่องอบแล้วเริ่มจับเวลาอบแห้ง
- 5) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะไม่เปลี่ยนแปลง
- 6) หาน้ำหนักแห้งของตัวอย่างโดยนำตัวอย่างที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการคำนวณความชื้นของตัวอย่างที่เวลาใดๆ

7) หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของตัวอย่างเทียบกับเวลาที่ใช้อบแห้ง



รูปที่ A1.1 เครื่องอบแห้งที่ทำงานร่วมกับเครื่องควบคุมความชื้น

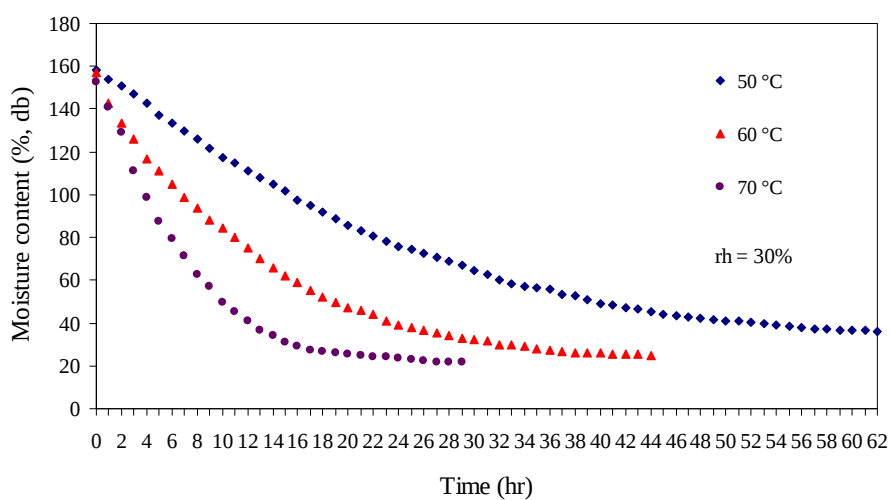
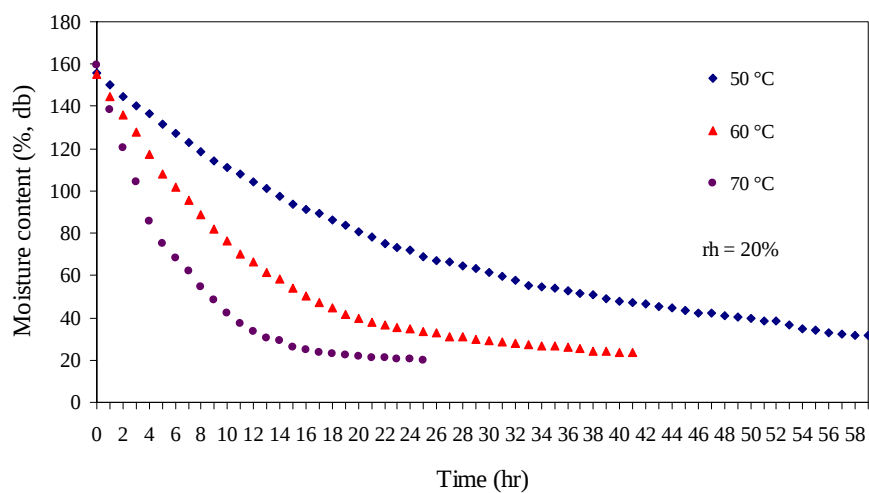
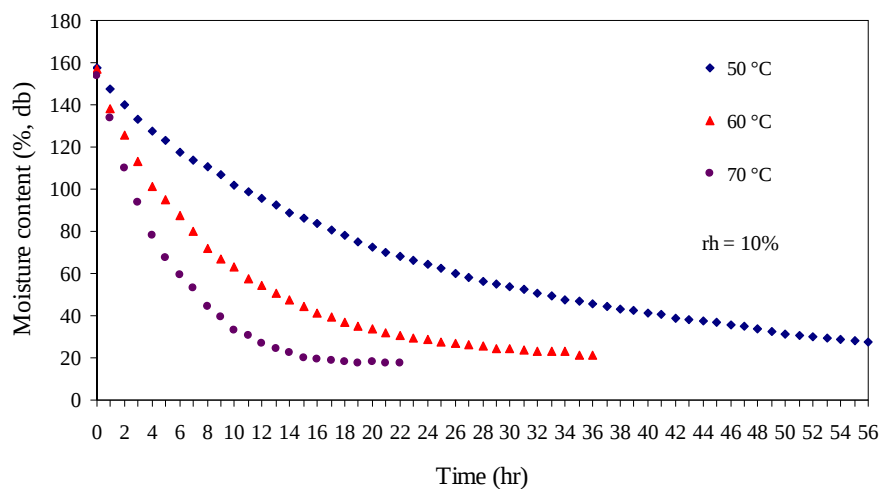
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการอบแห้งแบบชั้นบางที่ 3 อุณหภูมิ และ 3 ความชื้น คือ ที่อุณหภูมิ 50°C , 60°C และ 70°C โดยที่ความชื้น 10%, 20% และ 30% โดยลักษณะของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ A1.2



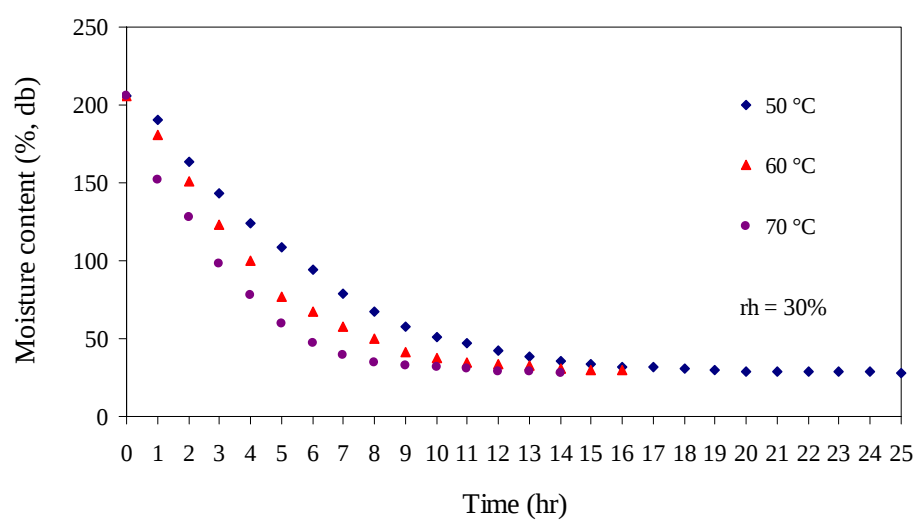
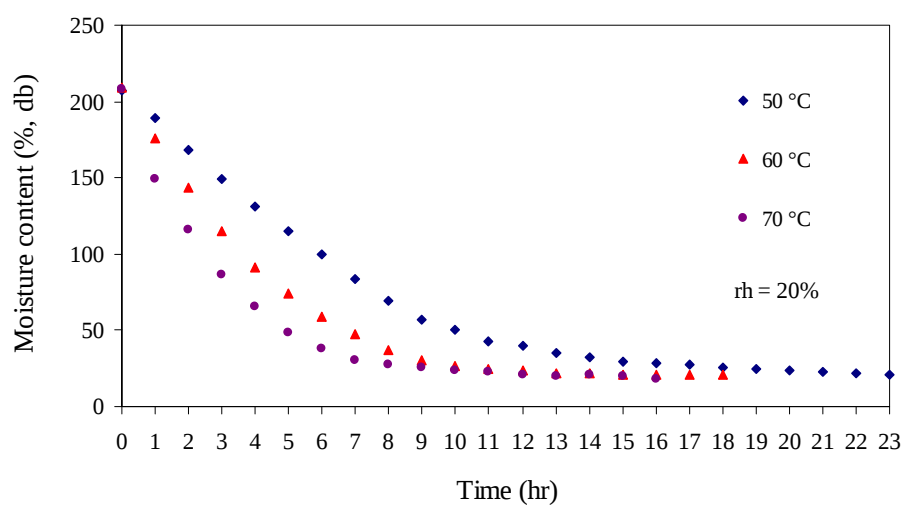
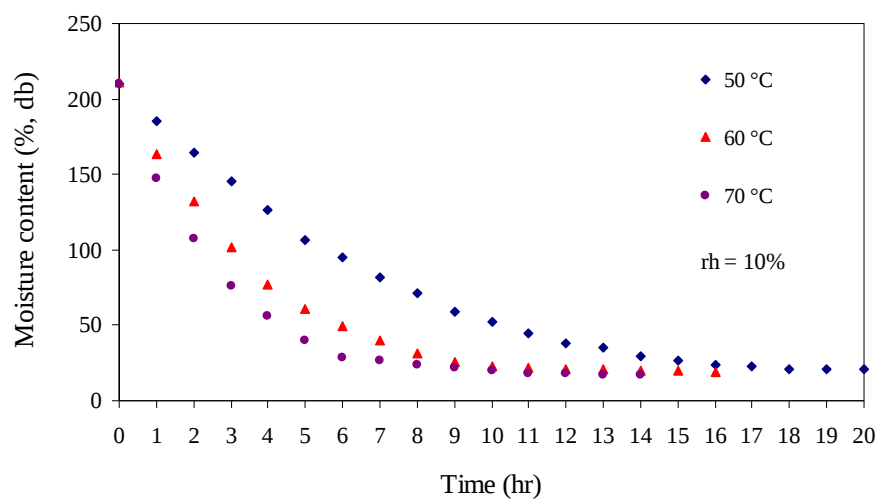
รูปที่ A1.2 เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory dryer) ที่จะใช้ในการทดลองเพื่อหาสมการการอบแห้งชั้นบาง

ข) ผลการทดลองหาสมการอบแห้งชั้นบาง

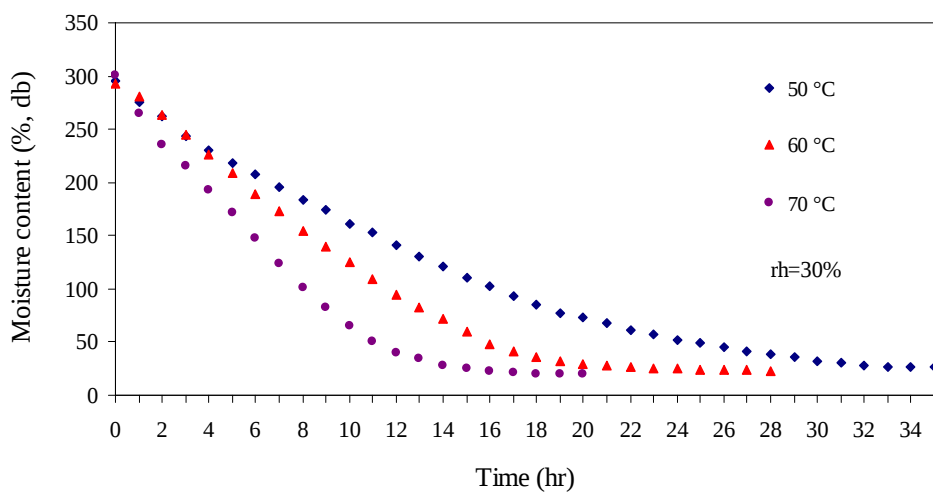
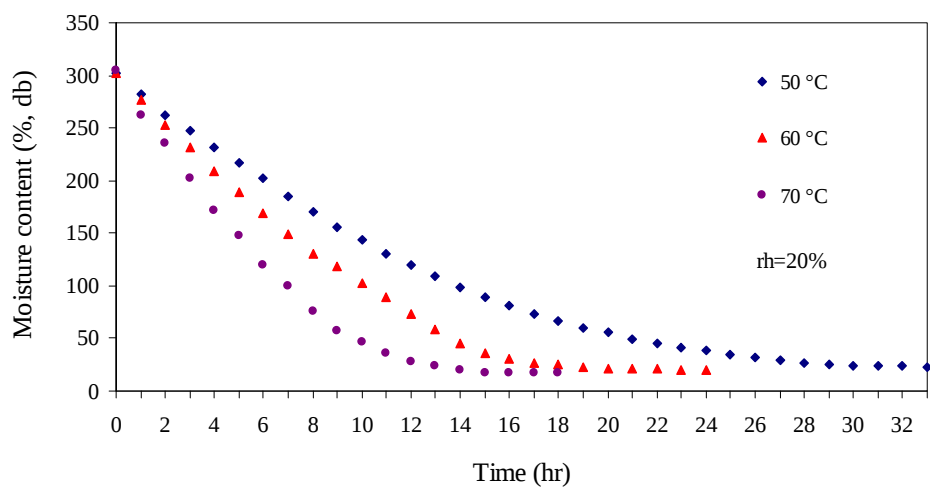
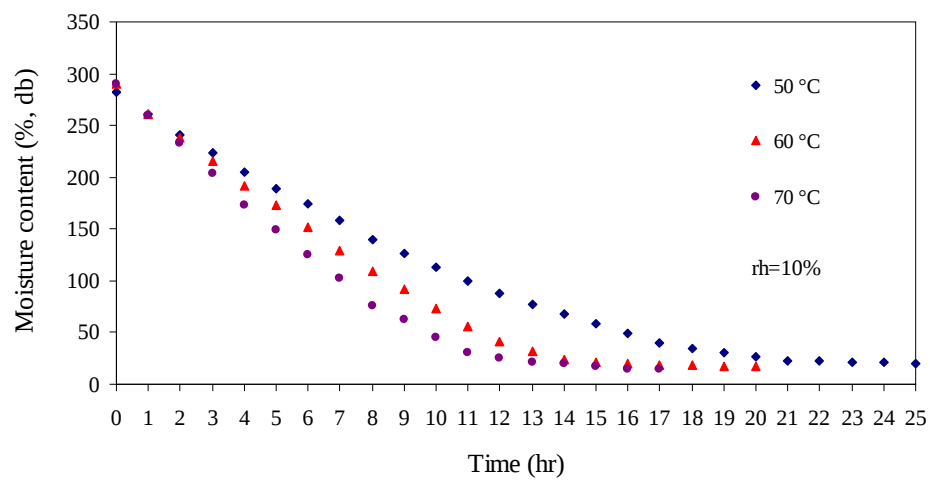
ผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดสอบคือ มะเขือเทศแช่อิ่ม กุ้งแห้งแผ่น และพริก โดยจะนำผลิตภัณฑ์วางบนถาดที่เตรียมไว้และทำการปรับอุณหภูมิและความชื้นตามที่กำหนด ผลการทดลองแสดงไว้ในกราฟรูปที่ A1.3 – A1.5



รูปที่ A1.3 การลดลงของความชื้นของมะเปือเทศแช่ในน้ำที่ความชื้น 10%, 20%, 30% และอุณหภูมิ 50°C , 60°C และ 70°C



รูปที่ A1.4 การลดลงของความชื้นของกล้วยแผ่นที่ความชื้น 10%, 20%, 30% และอุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C



รูปที่ A1.5 การลดลงของความชื้นของพริกที่ความชื้น 10%, 20%, 30% และอุณหภูมิ
50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C

ค) การหาสมการการอบแห้งชั้นบาง

เนื่องจากมีนักวิจัยต่างๆ ได้เสนอแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางไว้หลายแบบจำลอง ซึ่งนิยมใช้กันทั่วไป (ตารางที่ A1.1) แบบจำลองดังกล่าวจะมีค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยจะนำผลการทดลองไปฟิต(ห้)กับแบบจำลองดังกล่าวเมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 อย่าง ผลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ A1.2, A1.3 และ A1.4

ตารางที่ A1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

ลำดับที่	สมการแบบจำลอง	ชื่อแบบจำลองและอ้างอิง
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton (Mujumdar, 1987)
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (Diamante and Munro, 1993)
3	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (Zhang and Litchfield, 1991)
4	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic (Yagcioglu et al., 1999)
5	$MR = 1 + a t + b t^2$	Wang and Singh (Wang and Singh, 1978)
6	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$	Two-term (Henderson, 1978)
7	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-pt)$	Modified Henderson and Pabis (Karathanos, 1999)

ตารางที่ A1.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของ
มะเขือเทศเชอร์รี่

Models	T (°C)	rh (%)	k	a	b	c	n	g	p	R ²	RMSE (%)
Newton	50	10	0.05516							0.9972	8.98
	60	10	0.12135							0.9994	2.28
	70	10	0.20390							0.9981	5.02
	50	20	0.04853							0.9964	4.08
	60	20	0.09591							0.9976	4.54
	70	20	0.18317							0.9984	4.34
	50	30	0.04822							0.9907	6.58
	60	30	0.08732							0.9975	4.36
	70	30	0.14846							0.9955	6.95
Page	50	10	0.05443				1.00431			0.9972	3.84
	60	10	0.13017				0.97013			0.9995	1.97
	70	10	0.16954				1.10103			0.9992	3.15
	50	20	0.03351				1.11604			0.9985	2.64
	60	20	0.06858				1.13148			0.9997	1.42
	70	20	0.15753				1.07793			0.9991	3.19
	50	30	0.02097				1.25956			0.9989	2.25
	60	30	0.07222				1.07095			0.9982	3.66
	70	30	0.09630				1.20461			0.9996	1.81
Henderson and Pabis	50	10	0.05410	0.98104						0.9974	8.61
	60	10	0.11910	0.98152						0.9996	1.89
	70	10	0.20934	1.02830						0.9984	4.50
	50	20	0.05012	1.03235						0.9970	3.71
	60	20	0.09982	1.04243						0.9985	3.64
	70	20	0.18675	1.02050						0.9986	4.06
	50	30	0.05192	1.07986						0.9940	12.88
	60	30	0.08784	1.00615						0.9975	4.34
	70	30	0.15706	1.06239						0.9972	5.46
Logarithmic	50	10	0.05410	1.02179		-0.0694				0.9993	4.39
	60	10	196.335	0.78930		0.2107				0.4871	59.07
	70	10	148.924	0.80680		0.1932				0.5727	66.04
	50	20	0.00040	-41.7166		42.498				0.9566	187.4
	60	20	492.345	0.76580		0.2342				0.4142	59.65
	70	20	0.17391	1.03100		-0.0225				0.9993	2.80
	50	30	0.05934	0.12413		-0.2825				0.4535	43.18
	60	30	137.037	0.76300		0.2370				0.4094	56.43
	70	30	333.273	0.79190		0.2081				0.4875	63.88
Wang and Singh	50	10		-0.0402	0.00042					0.9873	19.0
	60	10		-0.0773	0.00146					0.9684	16.84
	70	10		-0.1284	0.00396					0.9817	15.34
	50	20		-0.0359	0.00034					0.9956	4.47
	60	20		-0.0648	0.00104					0.9887	9.78
	70	20		-0.1143	0.00314					0.9978	16.0
	50	30		-0.0350	0.00031					0.9992	1.84
	60	30		-0.0591	0.00087					0.9877	9.64
	70	30		-0.0966	0.00226					0.9878	11.4
Two term	50	10	0.05410	0.25838	0.72266			0.05410		0.9974	8.61
	60	10	20.9824	0.02968	0.97032			0.11775		0.9997	1.61
	70	10	0.23902	2.39015	-1.38785			0.33446		0.9993	3.10
	50	20	0.05012	0.31426	0.71807			0.05011		0.9970	3.71
	60	20	0.09982	0.52119	0.52121			0.09982		0.9985	3.64
	70	20	36.5123	-0.04276	1.04276			0.19066		0.9988	3.74
	50	30	0.04356	0.42349	0.27771			0.03887		0.9639	12.88
	60	30	0.08784	0.25082	0.75533			0.08784		0.9975	4.34
	70	30	0.13087	0.48506	0.48495			0.15400		0.9930	8.62
Modified Henderson and Pabis	50	10	0.11021	-0.24199	0.60049	0.60050		0.05988	0.05962	0.9980	7.61
	60	10	74.6416	0.02968	0.34257	0.62775		0.11777	0.11774	0.9997	1.62
	70	10	0.20767	0.79712	0.11157	0.11231		0.20756	0.21014	0.9984	4.53
	50	20	0.04747	0.00133	0.51610	0.51612		0.05011	0.05013	0.9969	3.71
	60	20	0.09982	0.34746	0.34746	0.34746		0.09982	0.09982	0.9985	3.64
	70	20	214.248	-0.04280	0.52140	0.52140		0.19070	0.19070	0.9988	3.74
	50	30	0.04036	0.27777	0.27767	0.27767		0.03558	0.04448	0.9597	13.61
	60	30	0.08783	0.21948	0.39333	0.39333		0.08784	0.08784	0.9975	4.34
	70	30	0.15700	0.21195	0.21151	0.63832		0.15698	0.15697	0.9972	5.46

ตารางที่ A1.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของกล้วยแผ่น

Models	T (°C)	rh (%)	k	a	b	c	n	g	p	R ²	RMSE (%)
Newton	50	10	0.16998							0.9928	9.24
	60	10	0.30156							0.9978	6.10
	70	10	0.40307							0.9993	3.78
	50	20	0.16304							0.9910	11.1
	60	20	0.25984							0.9951	9.07
	70	20	0.35705							0.9993	5.80
	50	30	0.17871							0.9930	9.18
	60	30	0.24008							0.9944	9.65
	70	30	0.32588							0.9930	5.87
Page	50	10	0.13698				32.8033			0.0453	77.1
	60	10	0.27951				34.9608			0.7172	64.4
	70	10	0.37284				1.06789			0.9997	2.57
	50	20	0.10142				30.9339			0.2272	79.0
	60	20	0.17893				1.23746			0.9997	2.20
	70	20	0.34257				1.03259			0.9994	5.52
	50	30	0.09306				29.6867			0.4583	69.0
	60	30	0.15657				1.26391			0.9997	2.14
	70	30	0.35209				32.1789			0.7635	59.5
Henderson and Pabis	50	10	0.17883	1.05626						0.9944	8.10
	60	10	0.30828	1.02437						0.9981	5.68
	70	10	0.40650	1.00925						0.9993	3.67
	50	20	0.17475	1.07912						0.9936	9.17
	60	20	0.27131	1.04944						0.9962	7.96
	70	20	0.35786	1.00241						0.9993	5.78
	50	30	0.19088	1.07553						0.9954	7.40
	60	30	0.25384	1.06357						0.9962	7.99
	70	30	0.32859	1.00901						0.9980	5.82
Logarithmic	50	10	0.14271	1.11394		-0.0897				0.9989	3.60
	60	10	255.707	0.82970		0.1703				0.6640	69.1
	70	10	0.39546	1.01460		-0.0086				0.9993	3.20
	50	20	0.14979	1.11357		-0.0583				0.9965	6.83
	60	20	0.24553	1.06997		-0.0346				0.9979	5.87
	70	20	0.35373	1.00441		-0.0035				0.9994	16.5
	50	30	0.17241	1.09447		-0.0356				0.9972	34.3
	60	30	0.23804	1.07560		-0.0217				0.9977	6.83
	70	30	0.31915	1.01409		-0.0090				0.9982	5.42
Wang and Singh	50	10		-0.11951	0.00357					0.9982	4.65
	60	10		-0.18333	0.00795					0.9789	18.9
	70	10		-0.22124	0.00113					0.9546	30.1
	50	20		-0.11263	0.00313					0.9956	7.61
	60	20		-0.16194	0.00621					0.9855	15.4
	70	20		-0.19472	0.00879					0.9480	33.47
	50	30		-0.11461	0.00314					0.9988	12.02
	60	30		-0.14388	0.00485					0.9746	18.1
	70	30		-0.16976	0.00658					0.9361	16.55
Two term	50	10	0.30556	-8.92817	9.91498			0.28839		0.9991	715.4
	60	10	638.314	1.11510	-0.11510			18.1282		0.3539	66.4
	70	10	0.40650	0.47716	0.53208			0.40649		0.9993	3.67
	50	20	0.17473	0.62987	0.44921			0.17475		0.9936	125.03
	60	20	0.27131	0.52475	0.52469			0.27132		0.9962	7.96
	70	20	0.35787	0.50131	0.50109			0.35785		0.9993	7.74
	50	30	0.19088	0.25651	0.81912			0.19088		0.9954	7.74
	60	30	0.25386	0.58989	0.47368			0.25381		0.9962	8.00
	70	30	119.022	6.76910	-5.76910			31.1439		0.5029	478.2
Modified Henderson and Pabis	50	10	0.17883	0.12929	0.46348	0.46348		0.17882	0.17882	0.9945	8.10
	60	10	78.3749	-0.08178	0.33975	0.54089		0.32427	0.32428	0.9988	4.57
	70	10	0.40650	0.39068	0.33539	0.32719		0.40649	0.40650	0.9993	8.81
	50	20	0.17474	0.36442	0.34332	0.36467		0.17475	0.17474	0.9936	72.72
	60	20	0.27131	0.35282	0.33939	0.35035		0.27136	0.27126	0.9962	7.96
	70	20	0.35783	0.46524	0.33846	0.45629		0.35787	0.35799	0.9993	5.78
	50	30	0.07495	-0.31105	0.34122	0.68249		0.15069	0.15001	0.9978	40.76
	60	30	0.24947	0.10252	0.34098	0.33720		0.25434	0.25421	0.9962	9.99
	70	30	0.32859	0.86610	0.33861	0.07146		0.32858	0.32858	0.9998	16.55

ตารางที่ A1.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของพริก

Models	T (°C)	rh (%)	k	a	b	c	n	g	p	R ²	RMSE (%)
Newton	50	10	0.11350							0.9826	14.28
	60	10	0.15013							0.9774	18.09
	70	10	0.20390							0.9809	16.99
	50	20	0.09418							0.9891	11.49
	60	20	0.13163							0.9823	15.95
	70	20	0.18982							0.9866	14.90
	50	30	0.08094							0.9878	10.94
	60	30	0.11032							0.9757	18.25
	70	30	0.16042							0.9827	50.90
Page	50	10	0.04515				1.39133			0.9971	8.47
	60	10	0.05405				1.48793			0.9959	7.65
	70	10	0.07224				1.46218			0.9979	5.60
	50	20	0.04407				1.29729			0.9986	4.13
	60	20	0.05292				1.40814			0.9968	6.73
	70	20	0.09648				1.36010			0.9976	6.23
	50	30	0.03752				1.28562			0.9970	5.36
	60	30	0.02915				1.55818			0.9985	4.45
	70	30	0.07036				1.40418			0.9962	7.44
Henderson and Pabis	50	10	0.12257	1.08581						0.9865	12.55
	60	10	0.16244	1.09176						0.9818	16.27
	70	10	0.18995	1.08999						0.9853	14.94
	50	20	0.10075	1.07449						0.9920	9.86
	60	20	0.14208	1.08808						0.9862	14.10
	70	20	0.20138	1.06843						0.9989	13.50
	50	30	0.08599	1.06513						0.9901	9.81
	60	30	0.12297	1.12931						0.9835	15.09
	70	30	0.17108	1.07411						0.9972	14.61
Logarithmic	50	10	0.07818	1.25164		-0.2234				0.9978	5.03
	60	10	0.10584	1.24875		-0.2099				0.9943	9.11
	70	10	0.12961	1.22733		-0.1836				0.9955	8.28
	50	20	0.10983	0.15854		0.2625				0.5082	67.31
	60	20	0.09963	1.19998		-0.1606				0.9958	7.39
	70	20	0.15174	1.15072		-0.1195				0.9963	7.75
	50	30	0.05729	1.20169		-0.1917				0.9989	3.28
	60	30	0.08573	1.24729		-0.1700				0.9939	9.14
	70	30	0.12163	1.18262		-0.1527				0.9948	8.75
Wang and Singh	50	10		-0.0812	0.00163					0.9996	1.90
	60	10		-0.1070	0.00282					0.9980	5.32
	70	10		-0.1262	0.00395					0.9986	4.53
	50	20		-0.0675	0.00114					0.9995	2.22
	60	20		-0.0936	0.00217					0.9993	3.19
	70	20		-0.1332	0.00438					0.9994	3.05
	50	30		-0.0585	0.00086					0.9996	2.09
	60	30		-0.0790	0.00154					0.9971	6.33
	70	30		-0.1141	0.00323					0.9987	4.33
Two term	50	10	0.04109	-3.23467	4.26036			0.05356		0.9982	4.56
	60	10	0.16243	0.54569	0.54612			0.16245		0.9817	16.26
	70	10	0.07145	-3.69301	4.73466			0.08837		0.9962	7.63
	50	20	0.10131	0.53549	0.53557			0.09958		0.9919	9.87
	60	20	0.24450	13.5573	-12.5883			0.26181		0.9962	7.39
	70	20	0.36730	-10.3907	11.3653			0.34020		0.9973	6.59
	50	30	0.08600	0.37988	0.68527			0.08599		0.9901	9.81
	60	30	0.12295	0.34159	0.78766			0.12296		0.9835	15.09
	70	30	0.06898	0.06889	5.07204			0.08245		0.9956	8.06
Modified Henderson and Pabis	50	10	0.33061	-0.84695	0.91042	0.91043		0.16393	0.16323	0.9957	7.13
	60	10	0.16245	0.17596	0.41678	0.49899		0.16243	0.16244	0.9818	16.26
	70	10	0.16026	-3.99027	-9.74833	14.7256		0.25416	0.21603	0.9990	3.73
	50	20	0.10051	0.35668	0.35683	0.35678		0.09979	0.10080	0.9919	9.87
	60	20	0.14206	0.34845	0.41106	0.32855		0.14209	0.14207	0.9862	106.73
	70	20	0.20139	-0.06884	0.49978	0.49978		0.20137	0.20138	0.9889	13.50
	50	30	0.08597	0.20711	0.42900	0.42900		0.08600	0.08600	0.9902	9.81
	60	30	0.12298	0.08646	0.52142	0.52142		0.12296	0.12296	0.9835	15.09
	70	30	0.17100	0.05581	0.50915	0.50915		0.50915	0.17108	0.9855	14.62

ผู้วิจัยจะคัดเลือกแบบจำลองซึ่งมีค่าตามแตกต่างระหว่างผลการทดลองกับผลจากการคำนวณในรูปของ RMSD น้อยที่สุด ซึ่งได้ผลดังนี้

1) อบมะเจือเทศเซอัม

แบบจำลองตามสมการของ Page(1993) สามารถฟิตผลการทดลองของมะเจือเทศเซอัมได้ดีที่สุด โดยสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

k และ n เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$k = -0.276079 + 0.007230T + 0.001594rh - 0.000099Trh + 0.000041rh^2$$

$$(R^2 = 0.98)$$

$$n = 1.511073 - 0.042305T + 0.134277rh - 0.0020655Trh + 0.000533T^2 - 0.001355rh^2$$

$$(R^2 = 0.91)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, [$^{\circ}C$]

rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

2) อบกล้วยแผ่น

แบบจำลอง Henderson and Pabis(1991) สามารถฟิตผลการทดลองของกล้วยแผ่นให้ผลที่ดีที่สุดและเขียนได้ดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \exp(-kt)$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

a และ k เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$a = 0.885641 + 0.006444T + 0.005491rh - 0.000049Trh - 0.000072T^2 - 0.000040rh^2$$

$$(R^2 = 0.97)$$

$$k = -0.644605 + 0.019539T + 0.007549rh - 0.000225Trh - 0.000049T^2 + 0.000098rh^2$$

$$(R^2 = 0.99)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, [$^{\circ}C$]
 rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

3) ออบพริก

แบบจำลอง Wang and Singh(1978) สามารถพยากรณ์การทดลองของพริกให้ผลที่ดีที่สุดและเขียนได้ดังนี้

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = 1 + at + bt^2$$

เมื่อ M_e คือ ความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์, [decimal, db]

a และ b เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$a = -0.094592 + 0.002004T + 0.0011351rh - 0.000027Trh - 0.000035T^2 + 0.000038rh^2$$

$$(R^2 = 0.99)$$

$$k = 0.007382 - 0.000298T + 0.000038rh + 0.000004T^2 - 0.000002rh^2$$

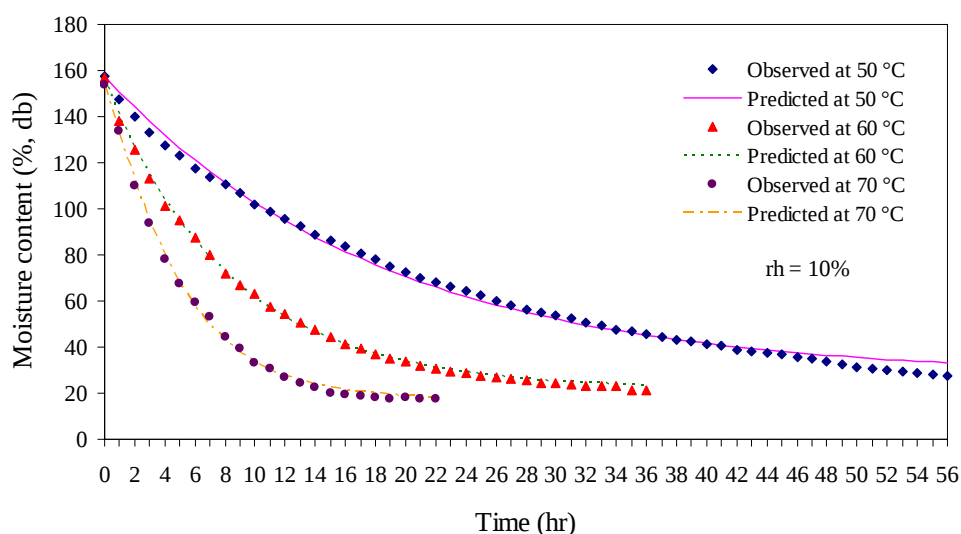
$$(R^2 = 0.98)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ, [$^{\circ}C$]
 rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ [%]

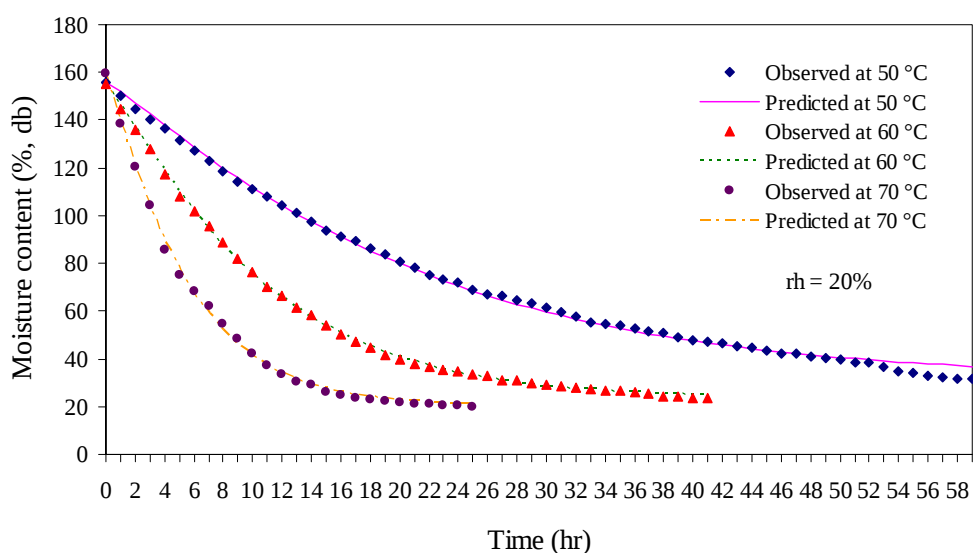
จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณจากแบบจำลองที่ดีที่สุด
ผลที่ได้แสดงดังรูป A1.6 – A1.14

จากรูปจะเห็นว่าผลการทดลองกับผลการคำนวณมีความสอดคล้องกัน

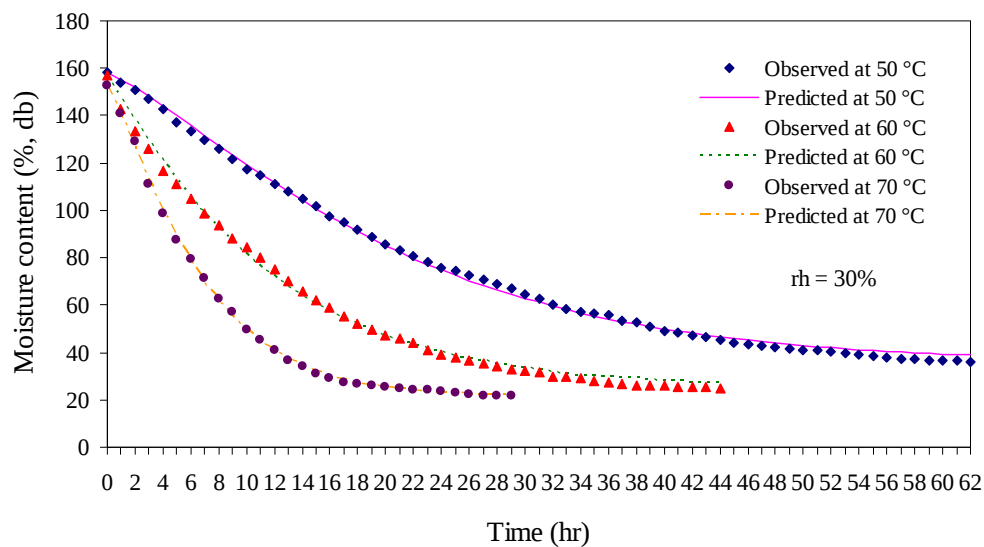
- การอบแห้งแบบชั้นบางของมะเขือเทศแช่อิ่ม



รูปที่ A1.6 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Page model ที่อุณหภูมิ
50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 10%

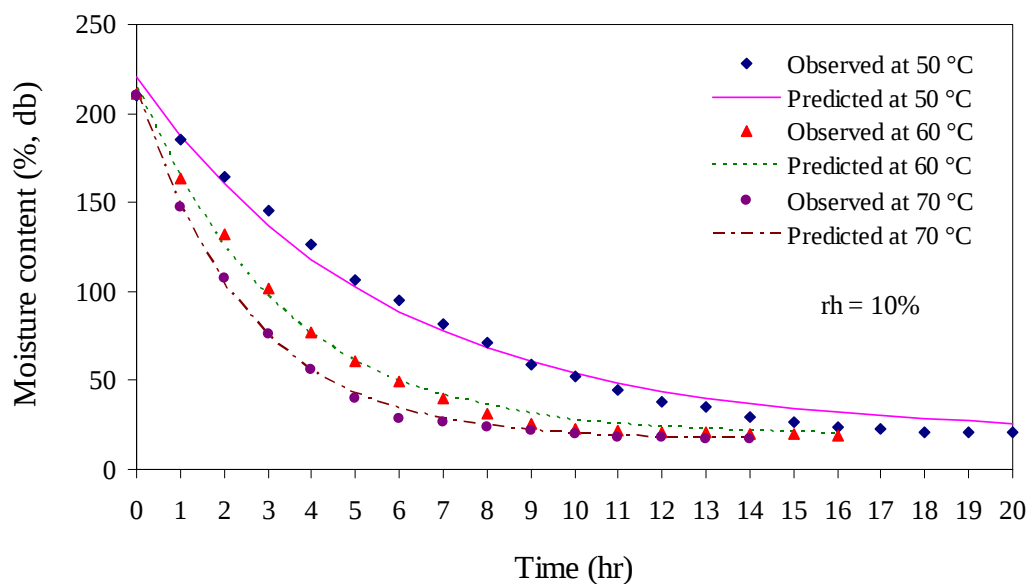


รูปที่ A1.7 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Page model ที่อุณหภูมิ
50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 20%

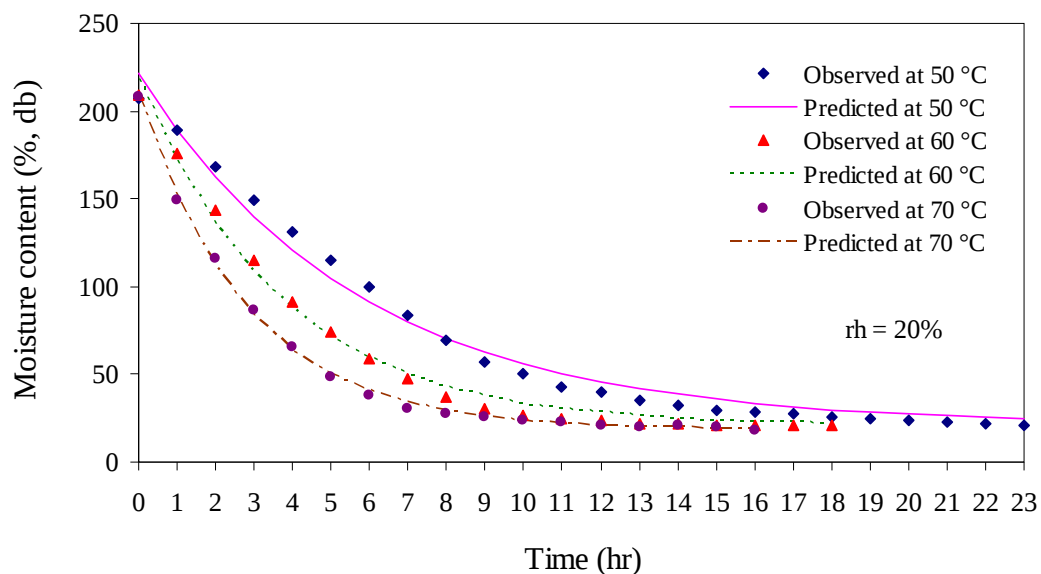


รูปที่ A1.8 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Page model ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 30%

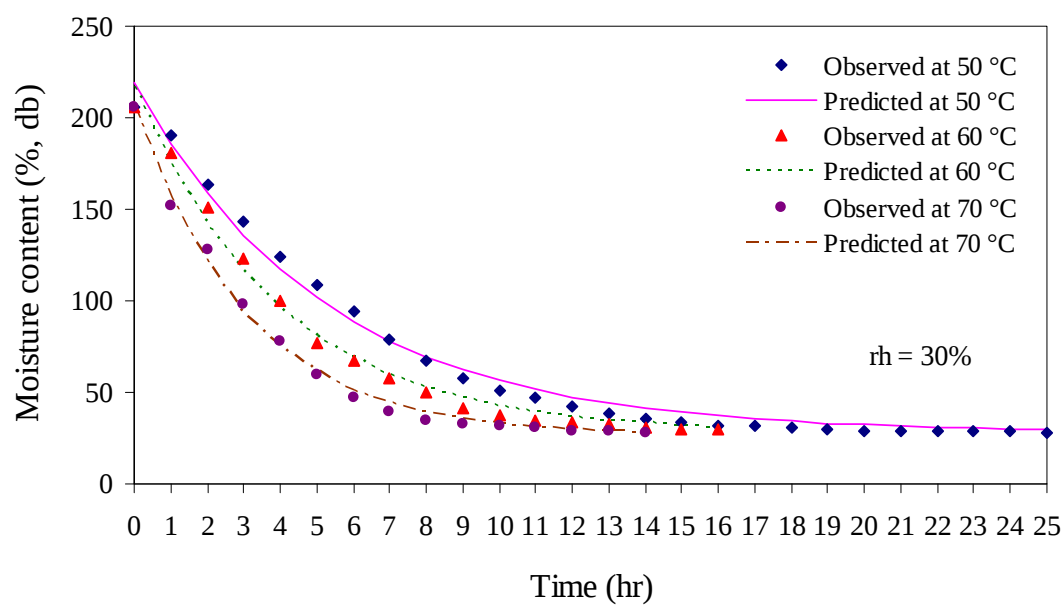
- การอบแห้งแบบชั้นบางของกล้วยแผ่น



รูปที่ A1.9 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Henderson and Pabis model ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 10%

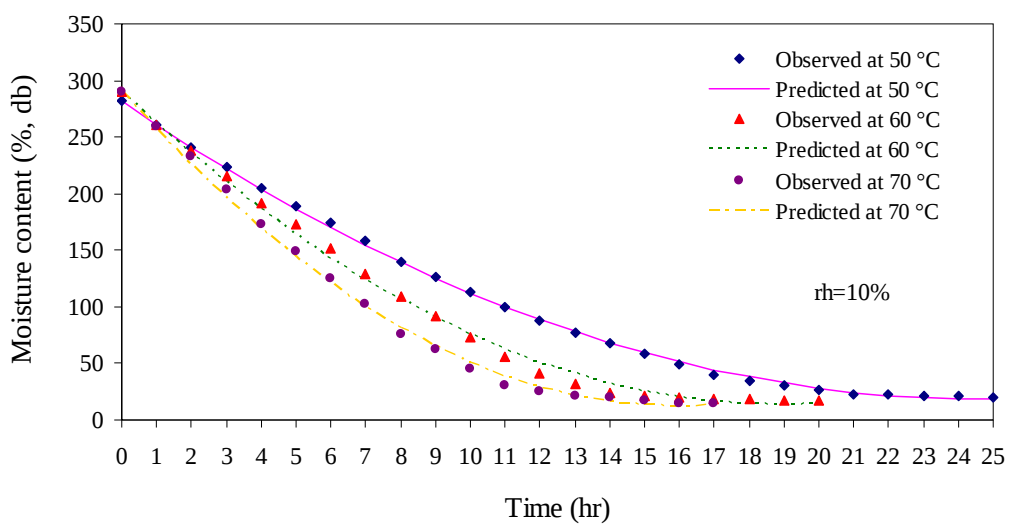


รูปที่ A1.10 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Henderson and Pabis model ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 20%

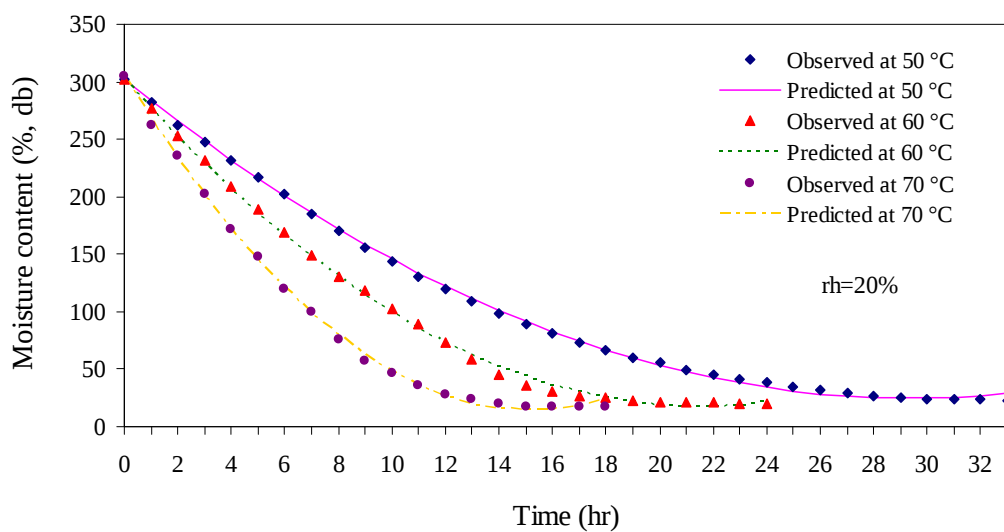


รูปที่ A1.11 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Henderson and Pabis model ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 30%

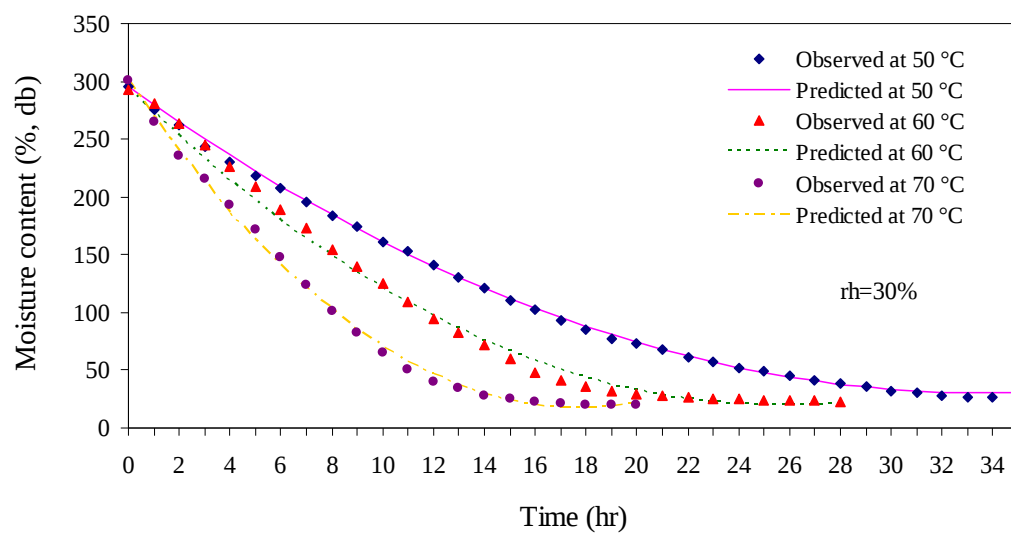
- การอบแห้งแบบชั้นบางของพริก



รูปที่ A1.12 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Wang and Singh ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 10%



รูปที่ A1.13 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Wang and Singh ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 20%



รูปที่ A1.14 ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับแบบจำลองของ Wang and Singh ที่อุณหภูมิ 50⁰ C, 60⁰ C และ 70⁰ C ที่ความชื้น 30%

ภาคผนวก ข

ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

ภาคผนวก ข

ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)

ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจำเป็นต้องทราบความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการอบแห้งและเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แห้ง โดยทั่วไปความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์หนึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมของผลิตภัณฑ์นั้น ซึ่งผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะสามารถถ่ายเทความชื้นให้กับอากาศแวดล้อม จนความชื้นลดลงถึงค่าหนึ่งก็จะหยุดถ่ายเท ความชื้นดังกล่าวเรียกว่าความชื้นสมดุล กราฟแสดงความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งจะเรียกว่าซอฟต์แวร์ไอโซเทอม (sorption isotherm) ของผลิตภัณฑ์นั้น

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการหาซอฟต์แวร์ไอโซเทอมของ มะเขือเทศแช่อิ่ม กว๊ายแผ่นและพริก โดยใช้วิธีเกรวิเมตริก (gravimetric) อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย ตู้อบไฟฟ้าจำนวน 3 ตู้ สำหรับควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างภายในตู้ โดยในตู้ที่หนึ่งจะตั้งค่าอุณหภูมิที่ 40°C ตู้ที่สองจะตั้งค่าอุณหภูมิที่ 50°C และตู้ที่สามจะตั้งค่าอุณหภูมิที่ 60°C ภายในตู้จะมีทั้งหมด 3 ชั้น ซึ่งจะนำกล่องตัวอย่างมาวางบนชั้นนั้นๆ ภายในกล่องบรรจุตัวอย่างแต่ละกล่องจะใส่สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ ดังตารางที่ A2.1 สำหรับกล่องใส่ตัวอย่างและรูปภาพตู้อบไฟฟ้าจะแสดงไว้ในรูปที่ A2.1 และ A2.2



รูปที่ A2.1 ลักษณะของกล่องใส่ตัวอย่าง



รูปที่ A2.2 ลักษณะของตู้อบไฟฟ้า

ตารางที่ A2.1 แสดงสารละลายเกลืออิมิตัวชนิดต่างๆ

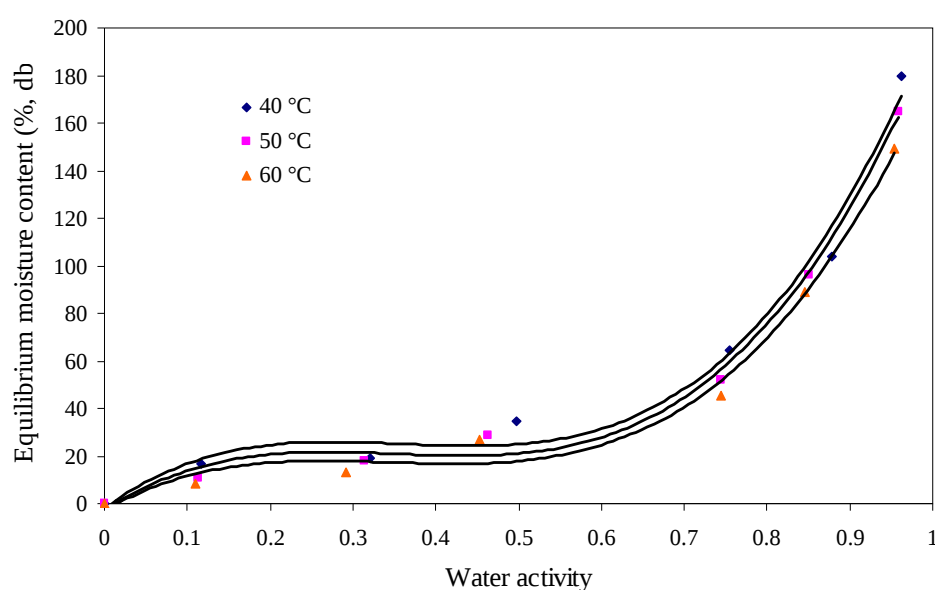
สารละลายเกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	40 ⁰ C	50 ⁰ C	60 ⁰ C
$LiCl \cdot H_2O$	11.6	11.4	10.95
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	32.1	31.4	29.26
$Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$	49.8	46.3	43.0
$NaCl$	75.4	74.5	74.5
KNO_3	87.9	85.0	82
K_2SO_4	96.2	95.8	95.30

ก. วิธีดำเนินการทดลอง

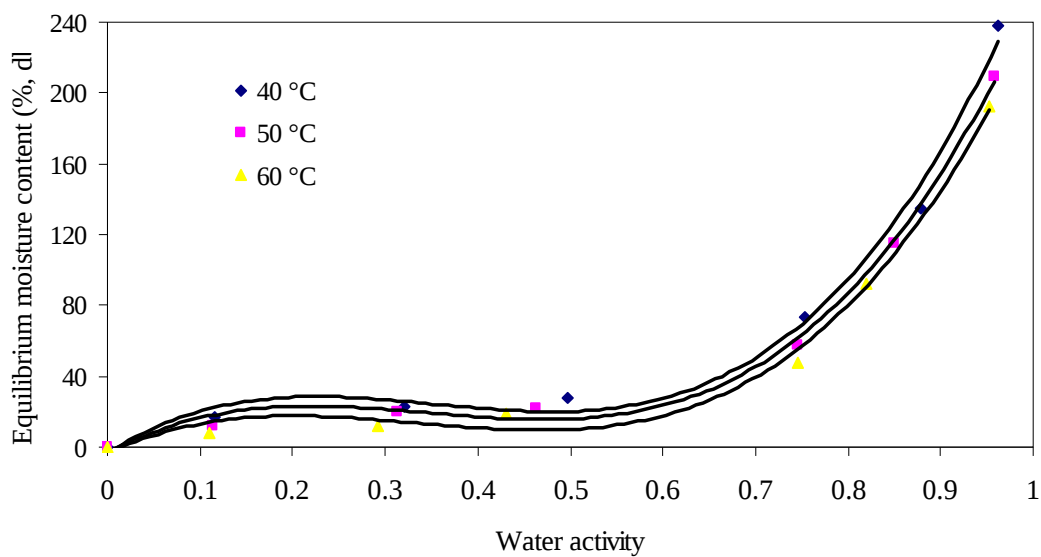
- 1) นำผลิตภัณฑ์ใส่ในกล่องวางลงบนตระแกรงของกล่องที่บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ จำนวนอย่างละ 100 กรัม และปิดฝากล่อง จากนั้นนำกล่องที่บรรจุตัวอย่างใส่เข้าตู้อบไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิ 40 °C, 50 °C และ 60 °C ตามลำดับ
- 2) นำตัวอย่างออกมาชั่งทุก 6 ชั่วโมง จนกระทั่งเห็นว่าน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าตัวอย่างเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว
- 3) นำตัวอย่างที่เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว ไปทำการอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการหามวลแห้ง และนำค่าที่ได้ไปหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่อไป

ข. ผลการทดลองหาค่าซอฟชั่นไอโซเทอม

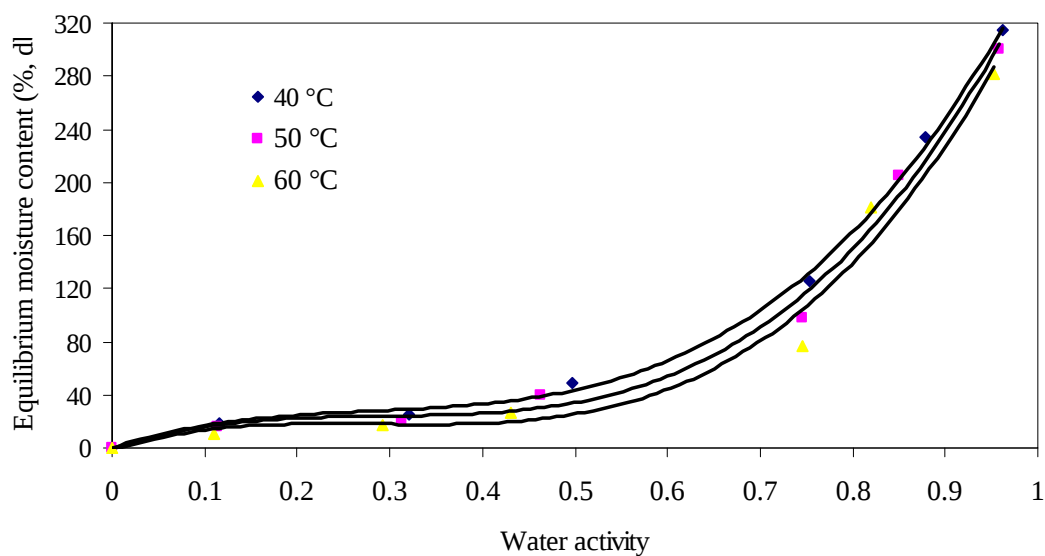
จากการทดลองหาค่าซอฟชั่นไอโซเทอมของมะเขือเทศแช่อิ่ม กล้วยแผ่นและพริก ที่อุณหภูมิ 40⁰ C, 50⁰ C และ 60⁰ C จะแสดงดังรูปที่ A2.3 - A2.5 ดังนี้



รูปที่ A2.3 ซอฟชั่นไอโซเทอมของมะเขือเทศแช่อิ่ม ที่อุณหภูมิ 40⁰ C, 50⁰ C และ 60⁰ C



รูปที่ A2.4 ซอฟชั่นไอโซเทอมของก๊วยแผ่น ที่อุณหภูมิ 40⁰ C, 50⁰ C และ 60⁰ C



รูปที่ A2.5 ซอฟชั่นไอโซเทอมของพริก ที่อุณหภูมิ 40⁰ C, 50⁰ C และ 60⁰ C

จากผลการทดลองพบว่าซอฟชั่นไอโซเทอมของมะเจือเทศแช่เย็น ก๊วยแผ่นและพริกจะมีลักษณะโดยทั่วไป คือความชื้นสมดุลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่าหนึ่ง ความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิต่ำหรือซอฟชั่นไอโซเทอมจะเรียงลำดับ โดยเส้นที่อุณหภูมิสูงจะอยู่ด้านล่างสุดดังแสดงในรูปที่ A2.3-A2.5

ค. การหาแบบจำลองความชื้นสมดุล

เนื่องจากแบบจำลองสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร มีผู้เสนอใช้ผลของแบบจำลองซึ่งนิยมใช้กันทั่วไป (ตารางที่ A2.2) ผู้วิจัยนำผลการทดลองมาพิตกับแบบจำลองเหล่านั้น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองและคัดเลือกแบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมาใช้งานวิจัยนี้ ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ A2.3 – A2.5

ตารางที่ A2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

	Model	Mathematical expression
1	Day and Nelson Equation	$a_w = 1 - \exp(-b_0 T^{b_1} M_e^{b_2 T^{b_3}})$
2	Modified Halsey Equation	$a_w = \exp\left[-\frac{\exp(b_0 + b_1 T)}{M_e^{b_2}}\right]$
3	Modified Chung-Pfost Equation	$a_w = \exp\left[\frac{-b_0}{T + b_1} \exp(-b_2 M_e)\right]$
4	Modified Oswin Equation	$a_w = \frac{1}{1 + \left[\frac{b_0 + b_1 T}{M_e}\right]^{b_2}}$
5	Kaleemullah Equation	$a_w = b_0 - b_1 \exp(-b_2 T M_e^{b_3})$

ตารางที่ A2.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุลของมะเขือเทศเขียว

Model	Temperature °C	Coefficients				RMSE	R ²
		b0	b1	b2	b3		
Day and Nelson	40, 50, 60	0.000002	2.186478	4.490688	-0.349288	2.0030	0.9865
Modified Halsey	40, 50, 60	4.73279	-0.019619	1.232414	-	1.2275	0.9895
Modified Chung-Pfost	40, 50, 60	85.90239	-0.85919	0.03922	-	1.7121	0.9807
Modified Oswin	40, 50, 60	51.50883	-0.41666	1.74215	-	1.1086	0.9914
Kaleemullah	40, 50, 60	-23.3554	-23.4259	-0.0001	0.5590	13.6573	0.9099

ตารางที่ A2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุลของกล้วยแผ่น

Model	Temperature °C	Coefficients				RMSE	R ²
		b0	b1	b2	b3		
Day and Nelson	40, 50, 60	0.000004	2.165693	4.051713	-0.356467	7.9710	0.9756
Modified Halsey	40, 50, 60	4.920033	-0.026580	1.193633	-	6.5154	0.9905
Modified Chung-Pfost	40, 50, 60	161.2209	22.0161	0.0343	-	13.9049	0.9634
Kaleemullah	40, 50, 60	-48.3285	-48.3937	-0.000029	0.4872	25.6573	0.8932

ตารางที่ A2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองความชื้นสมดุลของพริก

Model	Temperature °C	Coefficients				RMSE	R ²
		b0	b1	b2	b3		
Day and Nelson	40, 50, 60	0.000021	1.793486	2.916236	-0.309985	10.6720	0.9823
Modified Halsey	40, 50, 60	4.345950	-0.019693	1.012278	-	7.2104	0.9920
Modified Chung-Pfost	40, 50, 60	174.6075	40.8851	0.0186	-	15.0994	0.9643
Modified Oswin	40, 50, 60	85.15772	-0.81599	1.37214	-	8.3390	0.9892
Kaleemullah	40, 50, 60	-18.6772	-18.7853	0.0000458	0.5289	21.0783	0.9143

ง. สมการความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์

นำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณหาสมการจากผลการทดลองเพื่อหาความชื้นสมดุลของมะเขือเทศเชอร์รี่ กว๊วยแผ่น และพริก ซึ่งได้ผลดังนี้

- มะเขือเทศเชอร์รี่

$$M_e = \frac{[51.50883 - 0.41666T]}{\left[\frac{1}{a_w} - 1 \right]^{\frac{1}{1.74215}}} \quad (4.15)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความชื้นสมดุลของกว๊วย, [%, db]
	a_w	คือ water activity [$a_w = \frac{Rh}{100}$]
	T	คือ อุณหภูมิอากาศ, [°C]

- กว๊วยแผ่น

$$M_e = \left[\frac{-\exp(4.920033 - 0.026580T)}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{1.193633}} \quad (4.16)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความชื้นสมดุลของกว๊วย, [%, db]
	a_w	คือ water activity [$a_w = \frac{Rh}{100}$]
	T	คือ อุณหภูมิอากาศ, [°C]

- พริก

$$M_e = \left[\frac{-\exp(4.345950 - 0.019693T)}{\ln a_w} \right]^{\frac{1}{1.012278}} \quad (4.17)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความชื้นสมดุลของกว๊วย, [%, db]
	a_w	คือ water activity [$a_w = \frac{Rh}{100}$]
	T	คือ อุณหภูมิอากาศ, [°C]

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายสรวุฒิ แนนเนียร
ที่อยู่	3 ซ.ฝรั่งเศส ถ.ฝรั่งเศส ต.ท่าหิน อ.เมือง จ.ลพบุรี 15000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2545	จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนวินิตศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี
พ.ศ.2549	จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี
พ.ศ.2550	ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม