



วิทยานิพนธ์

ของ

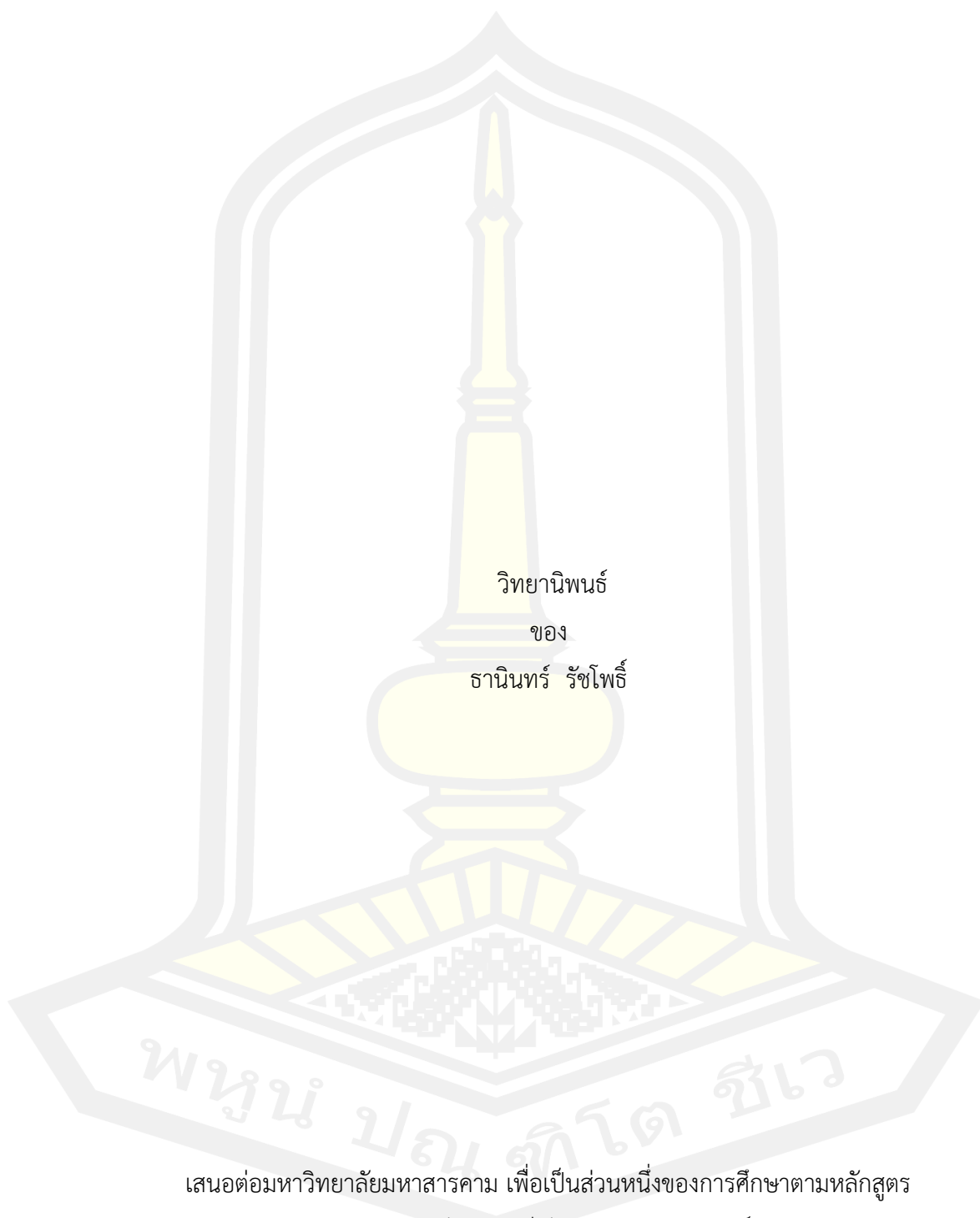
ธานิษฐ์ รัชโพธิ์

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มิถุนายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

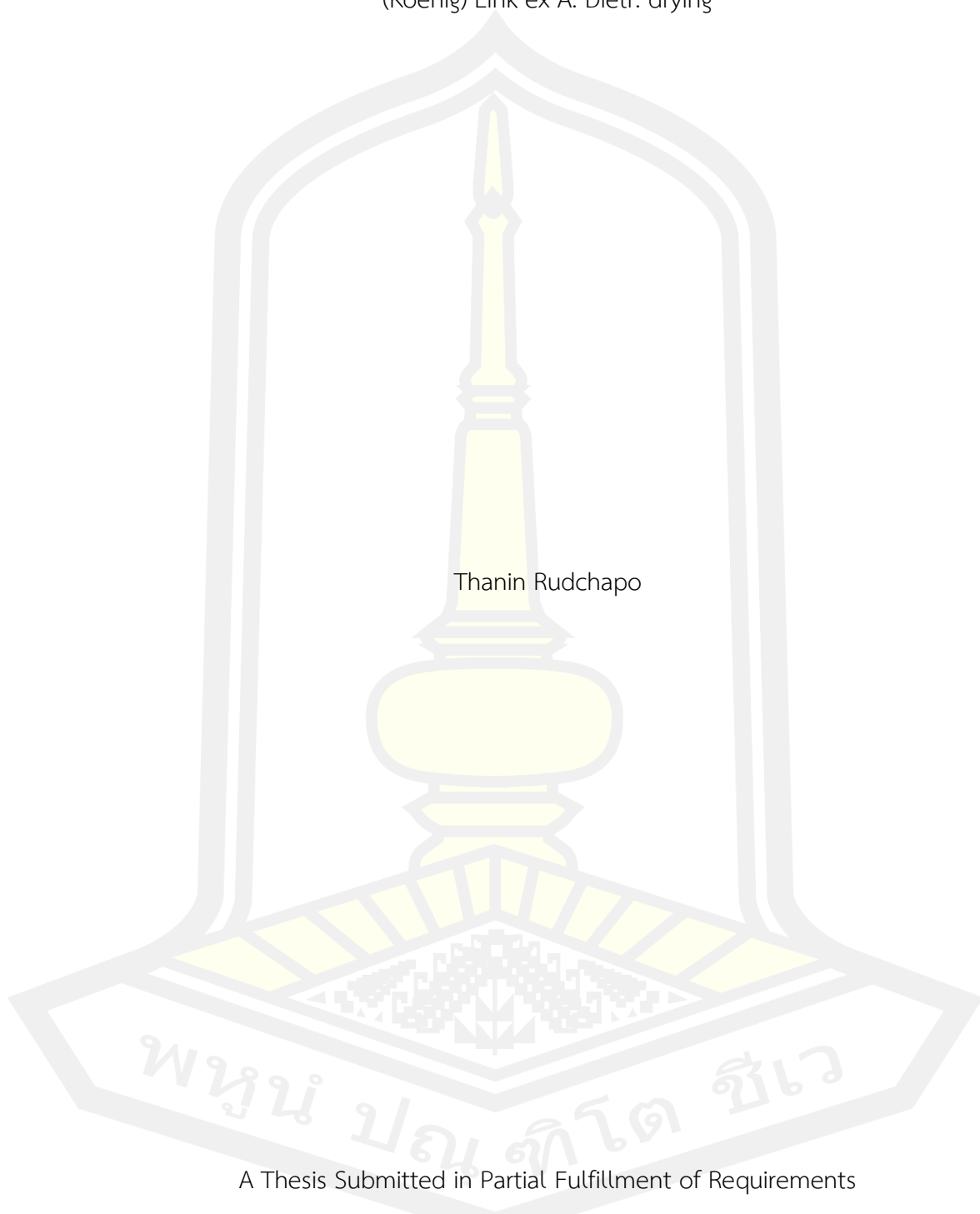
มิถุนายน 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of solar dryer combined with infrared radiation for *Zingiber montanum*

(Koenig) Link ex A. Dietr. drying

Thanin Rudchapo



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Physics)

June 2022

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายธานินทร์ รัชโพธิ์ แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. ณรงค์ สีหาจ่อง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. พัฒนพล มีนา)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. อรรวรรณ ฤทธิเดช)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. เจษฎา จูริมาศ)

.....กรรมการ

(ดร. กฤษณพงศ์ ลิ้มตระกูล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(ศ. ดร. ไพโรจน์ ประมวล)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล		
ผู้วิจัย	ธานินทร์ รัชโพธิ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. พัฒนพล มีนา		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

บทคัดย่อ

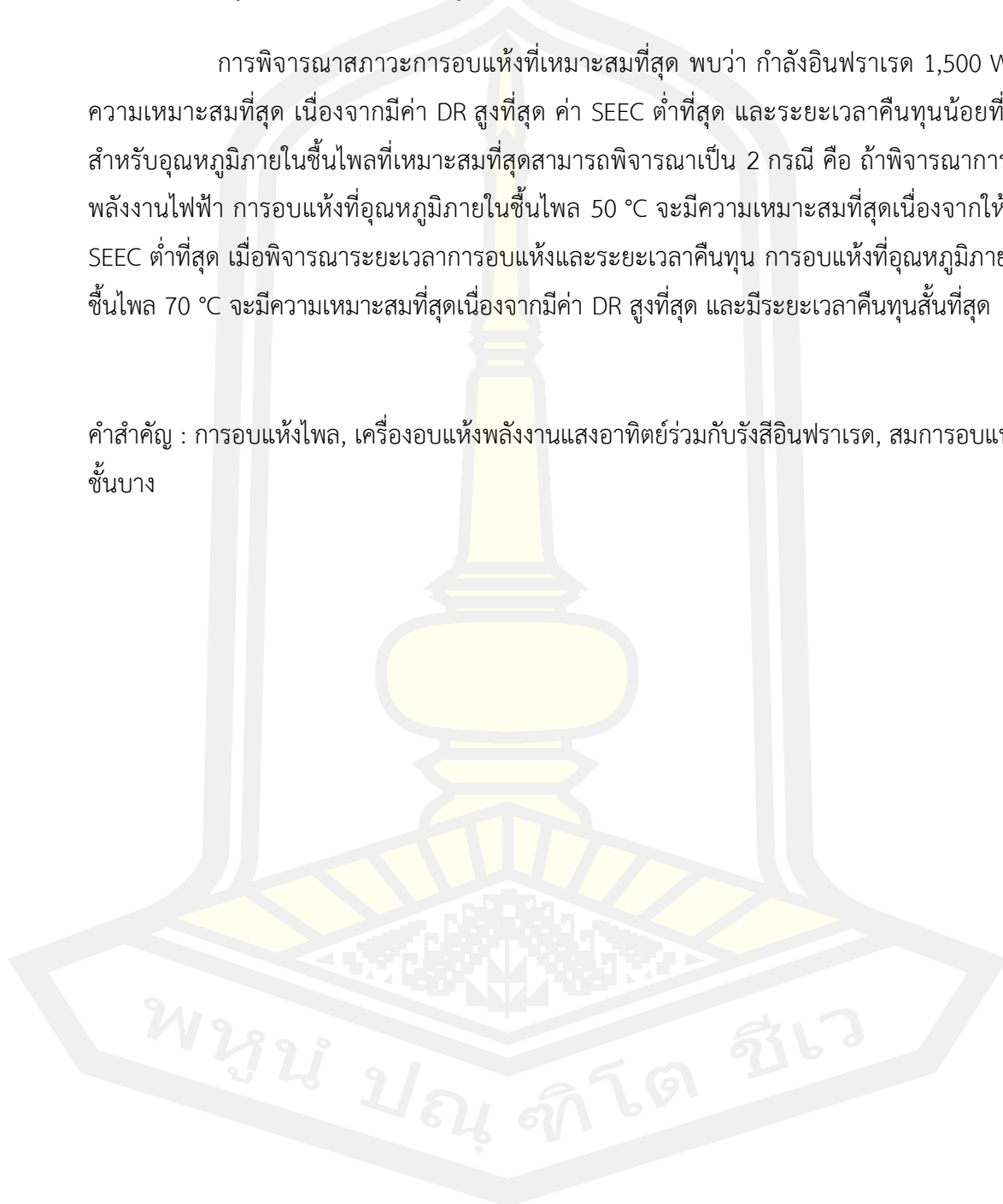
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล ศึกษาประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง จลนพลศาสตร์การอบแห้ง วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และคุณภาพของไพลหลังการอบแห้ง เครื่องอบแห้งประกอบด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ระบบกักเก็บความร้อนแฝงแบบเปลี่ยนสถานะและท่อโดยใช้พาราฟินเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน ห้องอบแห้ง แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในชั้นไพล และระบบนำความร้อนทิ้งกลับคืนมาใช้ใหม่ (สัดส่วนร้อยละ 70) ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการติดตั้งครีบบระบายความร้อนเยี่ยงทำมุม 30 องศาทิศทางการไหลของอากาศอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นของไพลประมาณร้อยละ 395 (d.b) อบแห้งครั้งละ 100 กรัมในแต่ละสภาวะการอบแห้ง และใช้กำลังอินฟราเรด (IP) ขนาด 500 1,000 1,500 W ซึ่งการทำงานของอินฟราเรดถูกควบคุมโดยใช้อุณหภูมิภายในชั้นไพล (ITP) ที่ 50 60 70 °C ความเร็วของอากาศอบแห้ง 0.05 m/s อบแห้งจนไพลมีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 13 (d.b)

การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง พบว่า อัตราการอบแห้ง (DR) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0047-0.0123 kg_{water}/h ซึ่งแปรผันตรงกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรด ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.58-14.15 kW-h/kg_{water} ซึ่งมีค่าแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิอบแห้งและแปรผกผันกับกำลังอินฟราเรด ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η_{coll}) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 53.36-83.69 % ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้งและสภาพแวดล้อม สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง พบว่า สมการ Verma et. al. เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) สูงที่สุดและค่าไคสแควร์ (χ^2) ต่ำที่สุด จากการพัฒนาสมการอบแห้ง พบว่า สมการที่พัฒนาสามารถทำนายระยะเวลาในการอบแห้งได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ Verma et. al. ในการศึกษาคุณภาพด้านสีของไพลอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่สภาวะแตกต่างกัน มีผลทำให้ค่าสีของไพลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยค่าความสว่าง

(L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของโพลสต ในการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน พบว่า อยู่ในช่วง 3.12-6.90 ปี และแนวโน้มของระยะเวลาคืนทุน สันลงเมื่ออุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดสูงขึ้น

การพิจารณาภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด พบว่า กำลังอินฟราเรด 1,500 W มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า DR สูงที่สุด ค่า SEEC ต่ำที่สุด และระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุด สำหรับอุณหภูมิภายในชั้นโพลที่เหมาะสมที่สุดสามารถพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ ถ้าพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้า การอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพล 50 °C จะมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ค่า SEEC ต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาระยะเวลาการอบแห้งและระยะเวลาคืนทุน การอบแห้งที่อุณหภูมิภายใน ชั้นโพล 70 °C จะมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่า DR สูงที่สุด และมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด

คำสำคัญ : การอบแห้งโพล, เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด, สมการอบแห้ง
ชั้นบาง



TITLE	Development of solar dryer combined with infrared radiation for <i>Zingiber montanum</i> (Koenig) Link ex A. Dietr. drying		
AUTHOR	Thanin Rudchapo		
ADVISORS	Associate Professor Pattanapol Meena , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Physics
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2022

ABSTRACT

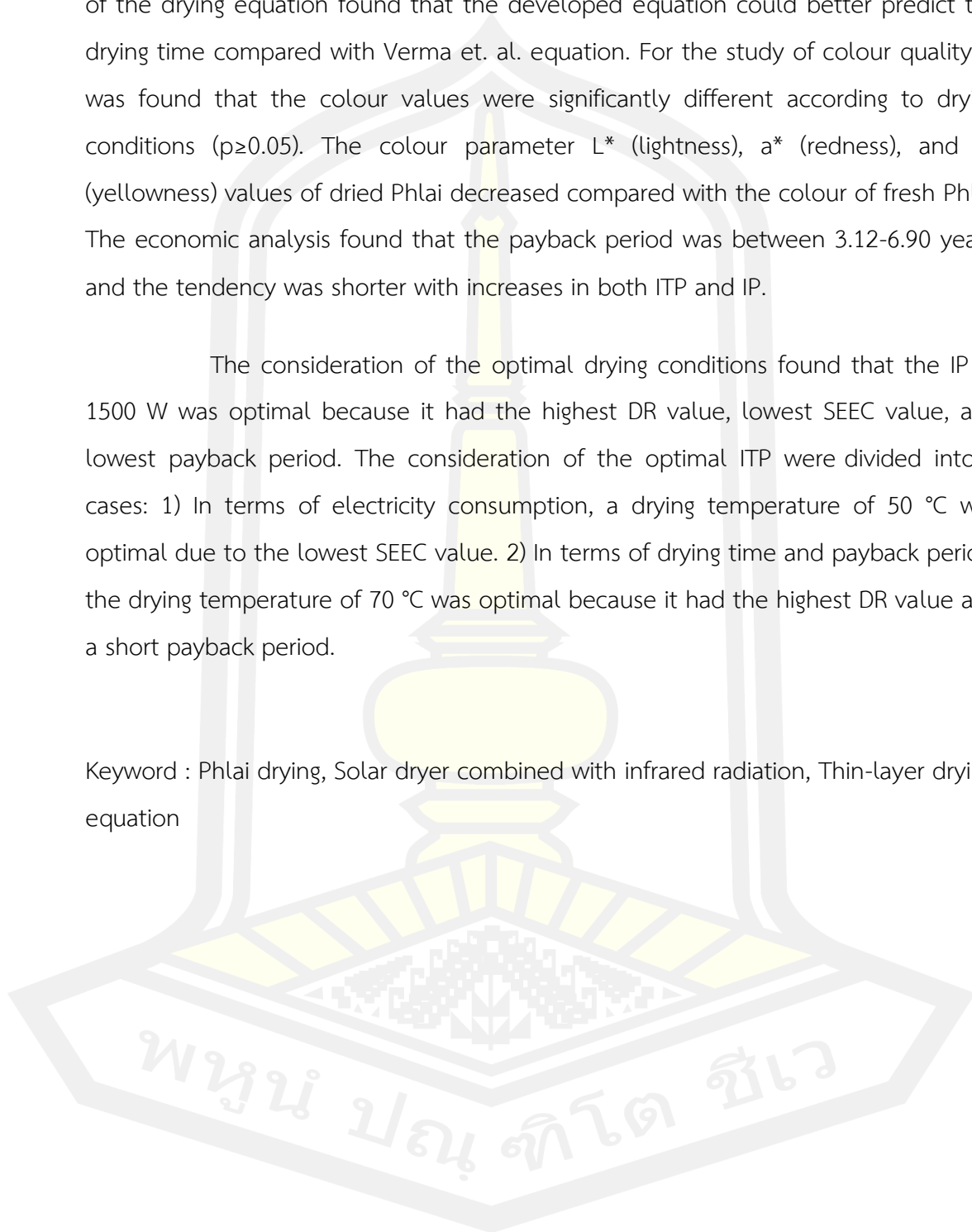
The objectives of this research were to the development of a solar dryer combined with infrared radiation for Phlai drying. The dryer efficiency, drying kinetics, economic analysis, and quality of dried Phlai were studied. This dryer consists of a solar collector, a shell and tube latent heat storage system by paraffin wax used as heat storage material, a drying chamber, an infrared radiation source, a temperature-controlled system (inside Phlai slices), and the waste heat recovery system (fraction 70%). Inside the solar collector, the fins were fixed at an inclination angle of 30° to the direction of the drying airflow. The initial moisture content of the Phlai was approximately 395% (d.b). The sample was used for 100 g in each drying condition and infrared power (IP) of 500, 1000, and 1,500 W. The operation of the infrared source was controlled by using the internal temperature of Phlai slices (ITP) at 50, 60, and 70 °C, and 0.05 m/s drying air velocity. The Phlai was dried until the final moisture content was approximately 13% (d.b).

In the study on the efficiency of the dryer, it was found that the drying rate (DR) was between 0.0047-0.0123 kg_{water}/h, which direct variation versus IP and ITP. The specific electrical energy consumption (SEEC) was between 1.58-14.15 kW-h/kg_{water}, which was direct variation versus ITP and inverse variation versus IP. The solar collector efficiency (η_{coll}) was between 53.36-83.69%, which depends on the drying conditions and environment. In the study of drying kinetics, it was found that the Verma et. al. equation was the best-predicted equation, which gave the highest

coefficient of determination (R^2) and the lowest chi-squared (χ^2). The development of the drying equation found that the developed equation could better predict the drying time compared with Verma et. al. equation. For the study of colour quality, it was found that the colour values were significantly different according to drying conditions ($p \geq 0.05$). The colour parameter L^* (lightness), a^* (redness), and b^* (yellowness) values of dried Phlai decreased compared with the colour of fresh Phlai. The economic analysis found that the payback period was between 3.12-6.90 years, and the tendency was shorter with increases in both ITP and IP.

The consideration of the optimal drying conditions found that the IP of 1500 W was optimal because it had the highest DR value, lowest SEEC value, and lowest payback period. The consideration of the optimal ITP were divided into 2 cases: 1) In terms of electricity consumption, a drying temperature of 50 °C was optimal due to the lowest SEEC value. 2) In terms of drying time and payback period, the drying temperature of 70 °C was optimal because it had the highest DR value and a short payback period.

Keyword : Phlai drying, Solar dryer combined with infrared radiation, Thin-layer drying equation



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้ด้วยความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. พัฒนพล มีนา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อรรพรรณ ฤทธิเดช รองศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา จูริมาศ อาจารย์ ดร. กฤษณพงศ์ ลิ้มตระกูล กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. ณรงค์ สีหาจ่อง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการ เขียนรายงานและรูปเล่มวิทยานิพนธ์ แก่ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ ด้าน วิชาการ และการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความ ช่วยเหลือในด้านเครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ และทุนสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ มหาสารคามที่ช่วยในการวิเคราะห์คุณภาพด้านสี ของโพลหลังการอบแห้ง

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ มหาสารคาม ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านเครื่องบันทึกอุณหภูมิ เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม ที่ได้ให้ความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาเอก ปริญญาโท และปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งในเรื่องวิชาการ งานวิจัย และ เรื่องส่วนตัว

สุดท้ายผลอันจะเป็นประโยชน์ความดีความงามทั้งปวง ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบแด่คุณพ่อและคุณแม่ที่เคารพยิ่งและหากมีข้อบกพร่องด้วยประการใดๆ ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้ด้วยความ ขอขอบคุณยิ่ง

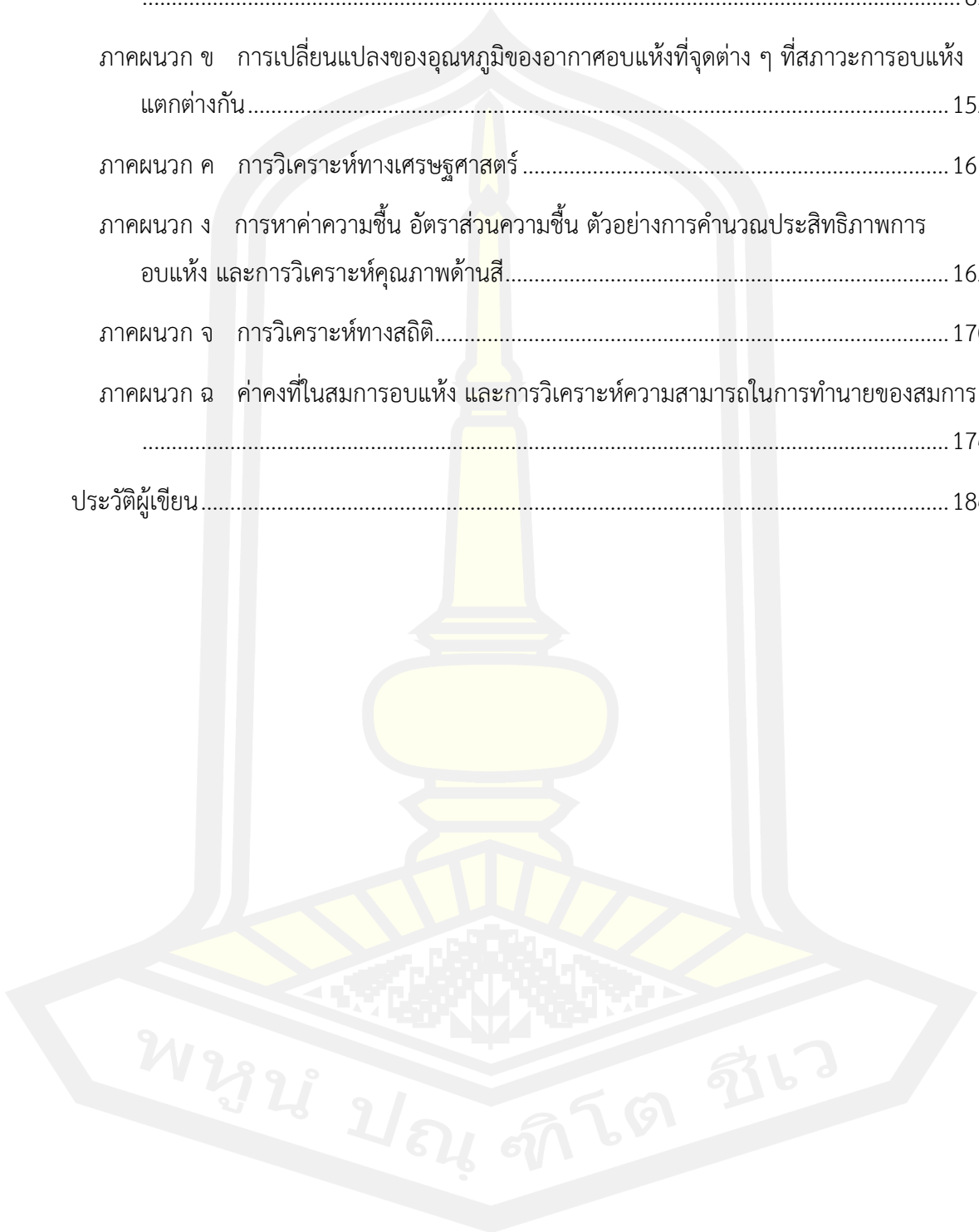
ธานินทร์ รัชโพธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพประกอบ.....	ณ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2	5
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	5
2.1 การอบแห้ง [11]	5
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง [12]	7
2.3 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [13].....	8
2.4 สมการอบแห้ง.....	16
2.5 การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด [35]	22
2.6 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน [37]	24
2.7 ไพล [38].....	26

2.8 ทบทวนวรรณกรรม	28
บทที่ 3	31
วิธีดำเนินงานวิจัย	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	31
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด	32
3.3 การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด	46
3.4 การศึกษาประสิทธิภาพ	48
3.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด	48
3.6 คุณภาพด้านสีของไพล	49
3.7 วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	49
3.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	50
บทที่ 4	51
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง	51
4.1 การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง	51
4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด	57
4.3 คุณภาพด้านสี	68
4.4 วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	71
บทที่ 5	73
สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	82

ภาคผนวก ก เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้า	83
ภาคผนวก ข การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน	155
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	161
ภาคผนวก ง การหาค่าความชื้น อัตราส่วนความชื้น ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้ง และการวิเคราะห์คุณภาพด้านสี	165
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ทางสถิติ	170
ภาคผนวก ฉ ค่าคงที่ในสมการอบแห้ง และการวิเคราะห์ความสามารถในการทำนายของสมการ	174
ประวัติผู้เขียน	184



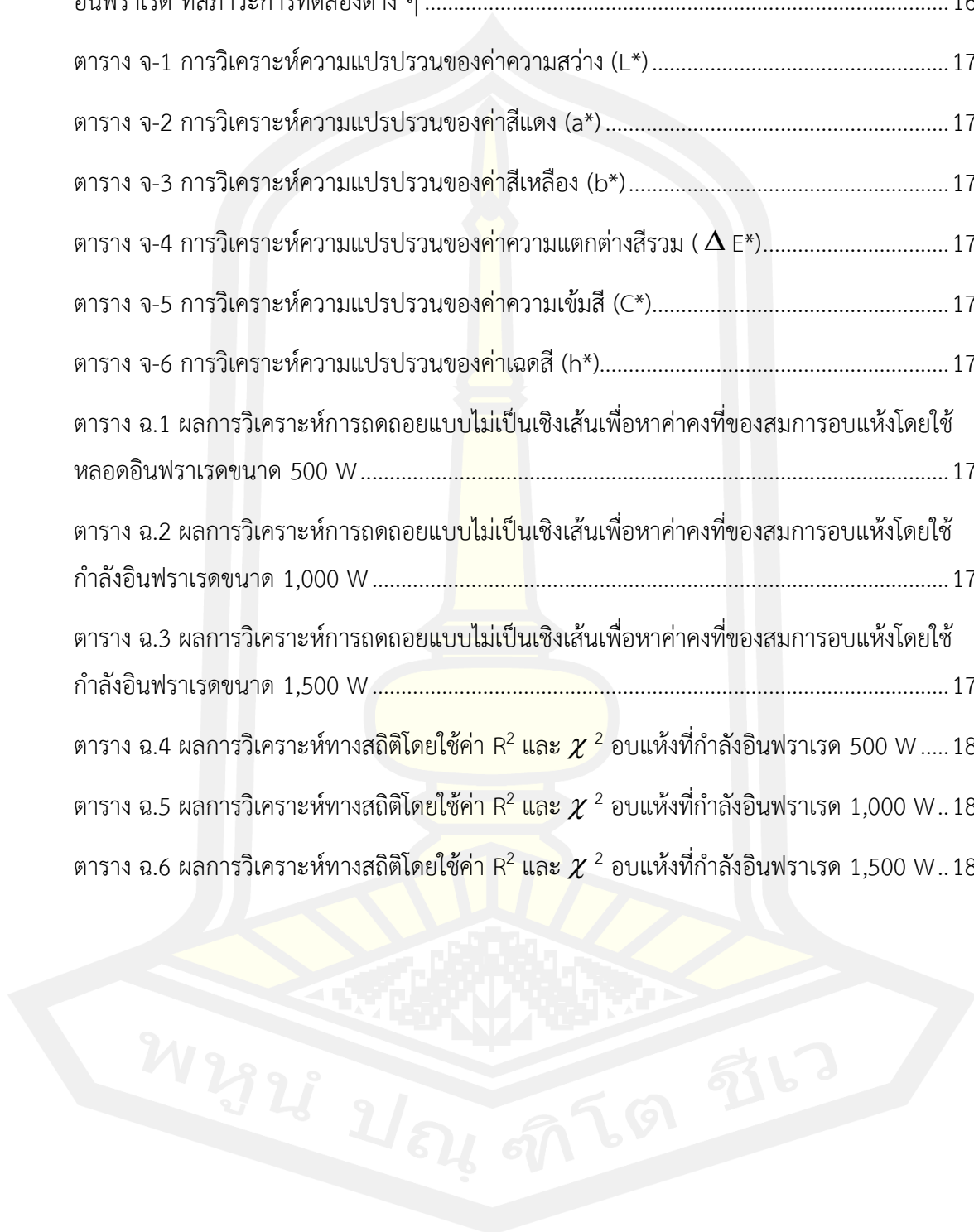
สารบัญตาราง

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับแหล่งพลังงานความร้อนอื่น ๆ [13]..	9
ตาราง 4.1 ระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งไพล.....	54
ตาราง 4.2 สรุปค่าเฉลี่ยของ DR , η_{coll} และ SEEC	56
ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการ Verma et al.	60
ตาราง 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2	61
ตาราง 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าคงที่ของสมการ Verma et. al. กับอุณหภูมิอบแห้งเพื่อหาสัมประสิทธิ์ในสมการ Quadratic.....	64
ตาราง 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าคงที่ของสมการ Verma et. al. กับกำลังอินฟราเรด เพื่อหาสัมประสิทธิ์ในสมการ Quadratic.....	65
ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการที่ได้รับการพัฒนาจากงานวิจัยนี้.....	66
ตาราง 4.8 ผลการทำนายเวลาในการอบแห้งและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสมการที่ได้รับการพัฒนาเปรียบเทียบกับสมการ Verma et. al.	68
ตาราง 4.9 คุณภาพสีของไพลสด	69
ตาราง 4.10 คุณภาพสีของไพลหลังการอบแห้ง (L^* , a^* และ b^*).....	69
ตาราง 4.11 คุณภาพสีของไพลหลังการอบแห้ง (ΔE^* , C^* และ h^*).....	70
ตาราง 4.12 ระยะเวลาคืนทุนจากการคำนวณปริมาณและราคาขายไพลอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ.....	72
ตาราง ก-1 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1.....	84
ตาราง ก-2 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1	87
ตาราง ก-3 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1	90

[illegible]

ตาราง ก-17 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3	129
ตาราง ก-18 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3	132
ตาราง ก-19 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1	134
ตาราง ก- 20 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1	137
ตาราง ก-21 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1	139
ตาราง ก-22 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2	141
ตาราง ก- 23 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2	144
ตาราง ก-24 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2	146
ตาราง ก- 25 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3	148
ตาราง ก-26 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3	151
ตาราง ก-27 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่ กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3	153
ตาราง ค-1 งบประมาณสำหรับสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด	162
ตาราง ค-2 พลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งโพลีที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ	163
ตาราง ค-3 ระยะเวลาและค่าไฟฟ้าของการอบแห้งโพลีด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ รังสีอินฟราเรด ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ	163

ตาราง ค- 4 ระยะเวลาคืนทุนของการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ	164
ตาราง จ-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสว่าง (L^*)	171
ตาราง จ-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีแดง (a^*)	171
ตาราง จ-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีเหลือง (b^*)	172
ตาราง จ-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างสีรวม (ΔE^*)	172
ตาราง จ-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความชื้นสี (C^*)	173
ตาราง จ-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเอดสี (h^*)	173
ตาราง ฉ.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดยใช้หลอดอินฟราเรดขนาด 500 W	175
ตาราง ฉ.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,000 W	177
ตาราง ฉ.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,500 W	179
ตาราง ฉ.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2 อบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 500 W	181
ตาราง ฉ.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2 อบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W ..	182
ตาราง ฉ.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2 อบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W ..	183



สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ 2.1 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง [11].....	6
ภาพประกอบ 2.2 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงชนิดอุโมงค์หลังคาโค้ง [13].....	11
ภาพประกอบ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับแสงอาทิตย์ [15]	12
ภาพประกอบ 2.4 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบผสม [15].....	12
ภาพประกอบ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับความร้อนโดยใช้พัดลมดูดอากาศร้อนเพื่อลดความชื้น	13
ภาพประกอบ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานขับเคลื่อน [13]	13
ภาพประกอบ 2.7 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล [13].....	14
ภาพประกอบ 2.8 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมฮีตเตอร์ไฟฟ้า [13]	14
ภาพประกอบ 2.9 ความสัมพันธ์ของรายรับและต้นทุนทั้ง 3 ประเภท กับจำนวนหน่วย [37]	25
ภาพประกอบ 2.10 จุดคุ้มทุนและปริมาณที่จุดคุ้มทุน [37].....	25
ภาพประกอบ 2.11 ไพล [40].....	27
ภาพประกอบ 3.1 หุ้มฉนวนกันความร้อนตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์	36
ภาพประกอบ 3.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเอียงทำมุม 15 องศากับแนวราบ	37
ภาพประกอบ 3.3 การติดตั้งครีบบระบายความร้อน	37
ภาพประกอบ 3.4 รังสีอาทิตย์ทำด้วยสีดำด้าน	38
ภาพประกอบ 3.5 ห้องอบแห้ง	39
ภาพประกอบ 3.6 การติดตั้งโคม หลอดอินฟราเรด ภาดอบแห้งพร้อมขาของภาดอบแห้ง.....	40
ภาพประกอบ 3.7 ระบบกักเก็บความร้อน [8].....	42
ภาพประกอบ 3.8 ท่อบรรจุพาราฟิน และท่ออากาศร้อน	43
ภาพประกอบ 3.9 การเชื่อมต่อท่ออากาศร้อน.....	43
ภาพประกอบ 3.10 ตัวกักเก็บความร้อน	44

ภาพประกอบ 3.11 การประกอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด	44
ภาพประกอบ 3.12 ระบบนำความร้อนกลับคืนมาใช้ใหม่สัดส่วน 70%	45
ภาพประกอบ 3.13 การติดตั้งพัดลมไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V	45
ภาพประกอบ 3.14 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล	46
ภาพประกอบ 3.15 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้า และการชั่งมวลของไพล.....	47
ภาพประกอบ 3.16 ลักษณะการวัดอุณหภูมิภายในชั้นไพล.....	47
ภาพประกอบ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W.....	52
ภาพประกอบ 4.2 ความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 500 W อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพลแตกต่างกัน	58
ภาพประกอบ 4.3 ความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,000 W อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพลแตกต่างกัน	58
ภาพประกอบ 4.4 ความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,500 W อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพลแตกต่างกัน	59
ภาพประกอบ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Verma et. al. เปรียบเทียบกับการทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 500 W	63
ภาพประกอบ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Verma et. al. เปรียบเทียบกับการทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W	63
ภาพประกอบ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Verma et. al. เปรียบเทียบกับการทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W	64
ภาพประกอบ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 50 °C กำลังอินฟราเรด 500 W	156
ภาพประกอบ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 60 °C กำลังอินฟราเรด 500 W	156

ภาพประกอบ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 70 °C กำลังอินฟราเรด 500 W	157
ภาพประกอบ ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 50 °C กำลังอินฟราเรด 1,000 W	157
ภาพประกอบ ข-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 60 °C กำลังอินฟราเรด 1,000 W	158
ภาพประกอบ ข-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,000 W	158
ภาพประกอบ ข-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 50 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W	159
ภาพประกอบ ข-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 60 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W	159
ภาพประกอบ ข-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W	160
ภาพประกอบ ง-1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 g	166
ภาพประกอบ ง-2 ตู้อบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับหาความชื้น.....	167

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ไพล มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr. ชื่อพ้องคือ *Zingiber cassumunar* Roxb. อยู่ในวงศ์ ZINGIBERACEAE มีชื่อเรียกต่างกันในแต่ละท้องถิ่น เป็นพืชล้มลุกจำพวกเหง้าใต้ดิน สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน มีสรรพคุณแก้คลื่นไส้คลื่นตัว แก้ปวดเมื่อย แก้ไข้ใน เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีนอกจาก Curcumin ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Curcuminoids แล้ว ยังมี Cassumunarin A B และ C ซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่ม Complex Curcuminoids ซึ่งมีฤทธิ์ด้านการอักเสบได้ดีกว่า Curcumin

หลังการเก็บเกี่ยวเหง้าไพลสดมีความชื้นสูงประมาณ 395 % d.b [1] เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานอาจทำให้ค่าคงตัวของสารบางชนิดเสื่อมลง การลดปริมาณความชื้นในเหง้าไพล จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ที่มีผลต่อการเสื่อมเสียคุณภาพด้านสี และความคงตัวของสารสำคัญของไพล [2] การอบแห้งเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับลดความชื้นของไพล ทำให้ไพลมีความชื้นอยู่ในระดับที่การเน่าเสียซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ลดลง ด้วยกระบวนการนี้ยังสามารถลดมวล ค่าใช้จ่าย และลดบรรจุภัณฑ์ของอาหารลงได้

สำหรับการลดความชื้นที่ประหยัดพลังงานและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย คือ การตากแดด ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงาน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ แต่กระบวนการก็ใช้เวลาค่อนข้างนาน และผลิตภัณฑ์มีฝุ่นละอองปนเปื้อนทำให้มีผลต่อคุณภาพได้ สำหรับวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาเรื่องดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ก็คือการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 40-60 °C [3] เป็นช่วงอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรจำนวนมาก นอกจากนี้ที่ตั้งของประเทศไทยอยู่ในภูมิภาคเขตร้อนของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน 18.2 MJ/m²-day [4] ซึ่งค่อนข้างสูง แต่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้มีอุปสรรคในด้านของความไม่สม่ำเสมอของพลังงาน ชั่วโมงการทำงานจำกัดกว่าพลังงานชนิดอื่นๆ ดังนั้นการหาพลังงานเสริมจากแหล่งอื่นมาช่วยในการอบแห้งจึงเป็นทางออกที่ดี

แหล่งพลังงานที่น่าสนใจอีกแหล่งหนึ่งที่สามารถนำมาพร้อมกับพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้ง คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งจุดเด่นที่น่าสนใจของวิธีนี้ คือ พลังงานจากรังสี

อินฟราเรดทำให้ผิวภายนอกวัสดุไม่เหี่ยวยุบ ซึ่งจะช่วยให้มีอัตราการอบแห้งที่สูง หลอดรังสีอินฟราเรดให้ heat flux ที่ค่อนข้างสูง ทำให้สามารถออกแบบเครื่องอบแห้งที่มีขนาดกะทัดรัด อีกทั้งยังต้องการอากาศหมุนเวียนเพียงเล็กน้อยทำให้ไม่ต้องใช้พัดลมตัวใหญ่ หลอดรังสีอินฟราเรดสามารถนำไปใช้ควบคู่กับระบบอื่นได้ง่าย เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่น้อย การให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบอื่นๆ (Conventional) ค่อนข้างมาก เนื่องจากการให้ความร้อนโดยตรง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ดังนั้นความสูญเสียในรูปของอากาศปล่อยทิ้ง (Exhaust) จึงมีค่าต่ำกว่ามาก และใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนได้อย่างรวดเร็ว มีการรายงานการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยรังสีอินฟราเรด โดย Aktaş M. [5] ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (HPD) และเครื่องอบแห้งอินฟราเรด (IRD) และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากทั้งสองวิธี พบว่า ประสิทธิภาพการอบแห้งของ IRD สูงกว่า HPD และระบบ IRD ไม่เพียงแต่ทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลงถึง 69% แต่ยังลดการใช้พลังงานของระบบลง 43.2% และ Nuthong P. [6] ทำการอบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน พบว่า เมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังอินฟราเรดไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดง

จากการนำพลังงานแสงอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดมาทำงานร่วมกันสำหรับอบแห้งผลิตภัณฑ์จะทำให้ระบบอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและระยะเวลาอบแห้งลงได้ ซึ่ง Ziaforoughi A. [7] ได้ศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดแบบไม่ต่อเนื่องเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองที่คล้ายกันของเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดแบบไม่ต่อเนื่อง พบว่า มีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ 40% ถึง 69% ลดเวลาในการอบแห้ง 31% ถึง 52% แต่วิธีการนี้ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นอีกได้และแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำมาใช้ร่วมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด คือ การติดตั้งระบบสะสมพลังงานความร้อน และการนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ โดย Rabha DK. [8] ศึกษาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนร่วมกับหน่วยเก็บความร้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ซีเมนต์พาราฟิน พบว่า ทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและลดการใช้พลังงาน และ aktas M. [9] ทำการอบแห้งเมลอนด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด และมีการนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับคืนมาใช้โดยอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า การนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับคืนมาใช้สามารถเพิ่มพลังงานในการอบแห้ง 23–28% ของพลังงานที่ใช้อบแห้งทั้งหมด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยนำมาใช้ร่วมกับรังสีอินฟราเรดเพื่อแก้ปัญหาของการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้ง ซึ่งความแปลกใหม่ของงานวิจัยนี้คือ มีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยมีการนำความร้อนทิ้งจาก

การอบแห้งเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งอีกครั้งโดยไม่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และติดตั้งระบบสะสมพลังงานความร้อนแฝงจากแสงอาทิตย์ด้วยซีลิ่งพาราฟิน ทดสอบประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ คุณภาพของไพล ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และสร้างสมการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบ สร้าง และประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล
2. เพื่อศึกษาคุณภาพของไพล สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับการอบแห้งชั้นบาง การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด และศึกษาผลการวิจัยในด้านต่าง ๆ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งขอบเขตการการวิจัยออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 ขอบเขตด้านการออกแบบเครื่องอบแห้ง

- ออกแบบและพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งไพล
- พิจารณาการไหลของอากาศภายในห้องอบแห้งจะเป็นแบบไหลผ่านทั้งด้านบนและด้านล่างของถาดอบแห้ง
- ใช้หลอดรังสีอินฟราเรดเซรามิกส์แบบแผ่น ขนาด 500 1,000 และ 1,500 W โดยกำหนดให้หลอดอินฟราเรดห่างจากถาดผลิตภัณฑ์ 20 เซนติเมตร
- การทำงานของหลอดอินฟราเรดจะถูกควบคุมโดยใช้อุณหภูมิภายในชั้นไพลที่ 50 60 และ 70 °C
- สัดส่วนการนำความร้อนจากการอบแห้งกลับคืนมาใช้ใหม่ร้อยละ 70 [10]

1.3.2 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์ผลการวิจัย

- ประเมินประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง พิจารณาจากประสิทธิภาพตัวเก็บความร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ และอัตราการอบแห้ง
- การศึกษาคุณภาพของไพลหลังอบแห้งจะศึกษาคุณภาพด้านสีและค่าความชื้น
- การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ พิจารณาจากระยะเวลาคืนทุน
- นำผลที่ได้จากการอบแห้งไพล เพื่อสร้างสมการที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งไพล ผ่านรูปแบบของสมการอบแห้งต่างๆ โดยใช้รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบาง 13 สมการดังนี้
 - Semi
 - Henderson and pabis
 - Modified Henderson and Pabis
 - Logarithmic
 - Two term
 - Two term exponential
 - Page
 - Modified Page I
 - Modified Page II
 - Diffusion approximation
 - Wang and Singh
 - Midilli et al.
 - Verma et al.

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูง และประหยัดพลังงาน
2. ลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
3. ทราบสถานะการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

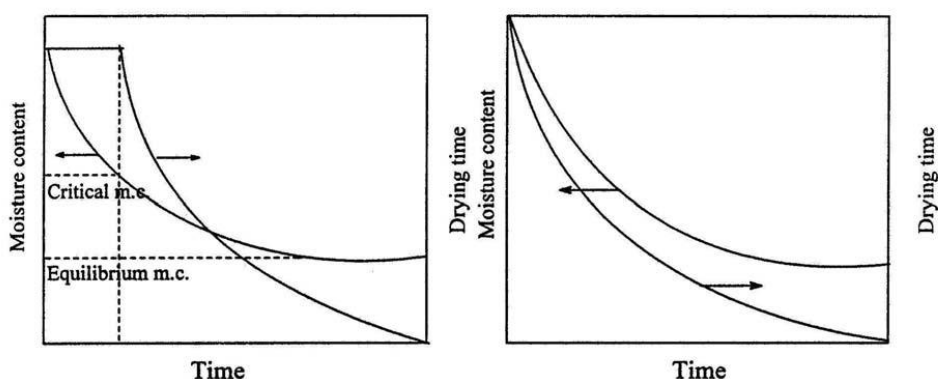
ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตร ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ สมการอบแห้ง การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด การวิเคราะห์ระยะเวลาดำเนินการ ข้อมูลเกี่ยวข้องกับไฟล และการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การอบแห้ง [11]

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น ซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ความร้อนที่ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ ส่วนมากแล้วได้รับมาจากความร้อนสัมผัสของอากาศ และการถ่ายเทความร้อนจะมีทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี แต่โดยทั่วไปแล้วจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเป็นหลัก ซึ่งในการอบแห้งโดยทั่วไปมักอาศัยอากาศร้อนในการอบแห้ง ความร้อนจะถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังวัสดุ และนำไปใช้ในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิววัสดุโดยการไหลแคพิลลารี ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น และความดันไอที่ความแตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับอากาศร้อน ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่จำนวนมาก การลดลงของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วย และเมื่อปริมาณน้ำที่ผิวของวัสดุลดลงมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวย่อมเปลี่ยนไป กล่าวคืออุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของไอน้ำในวัสดุลดลงส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นที่อยู่ระหว่างอัตราการอบแห้งคงที่และอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤต และอัตราการอบแห้งจะลดลงตลอดระยะเวลาการอบแห้ง จนกระทั่งความดันไอของเหลวในวัสดุมีค่าไม่แตกต่างกับความดันไอของอากาศแวดล้อมในการอบแห้ง ความชื้นที่จุดสุดท้ายนี้เรียกว่า ความชื้นสมดุล เป็นจุดที่ไม่มีการถ่ายเทความชื้นอีกต่อไป

อัตราการอบแห้งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ 1. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เป็นช่วงที่มีการถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวของวัสดุเป็นจำนวนมาก เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มอากาศนิ่งมีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น

เป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น 2. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เป็นช่วงที่การถ่ายเทความร้อนและมวล จะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวนอกของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นและมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนี้มีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลมากนัก



ภาพประกอบ 2.1 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง [11]

1. ความชื้นในอากาศหรือความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของความดันไอของไอน้ำในอากาศต่อความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์ (\%)} = \frac{\text{ความดันไอของไอน้ำในอากาศ}}{\text{ความดันไอของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน}}$$

2. ความชื้นในวัสดุ เป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ซึ่งสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w} \right) \times 100\% \quad (1)$$

2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d} \right) \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b)

w คือ มวลของวัสดุเปียก (kg)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

ความชื้นแบบมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุมีค่าเกือบจะคงที่ในระหว่างการอบแห้ง

จากสมการ (1) และ (2) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานเปียกและความชื้นมาตรฐานแห้งได้ดังนี้

$$M_w = \left(\frac{M_d}{1+M_d} \right) \quad (3)$$

และ

$$M_d = \left(\frac{M_w}{1-M_w} \right) \quad (4)$$

3. ความชื้นสมดุลของวัสดุ มีความสำคัญต่อการศึกษากลไกการอบแห้ง เพราะเมื่อทำการอบแห้งวัสดุโดยใช้อากาศที่สภาวะคงที่ (อุณหภูมิหรือความชื้นสัมพัทธ์คงที่) ความชื้นของวัสดุจะลดลงจนถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะนั้นความชื้นในวัสดุมีความดันไอเท่ากับอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศที่อยู่รอบ ๆ ด้วยเราเรียกความชื้นในขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำแห้ง [12]

การทำแห้งเป็นการเคลื่อนย้ายน้ำออกจากอาหาร ปัจจัยใด ๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนย้ายนี้จึงมีผลต่ออัตราการทำแห้ง ได้แก่

1. ธรรมชาติของอาหาร อาหารเนื้อโปร่งมีการเคลื่อนของน้ำภายในอาหารแบบผ่านช่องแคบซึ่งเร็วกว่าการแพร่ในอาหารเนื้อแน่น ดังนั้นอาหารเนื้อโปร่งจึงแห้งเร็วกว่าอาหารที่มีเนื้อแน่น

อาหารที่มีน้ำตาลสูงจะมีความเหนียวกีดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำจึงแห้งช้า ส่วนอาหารผ่านการลวกนวด คลึง ทำให้เซลล์แตกจึงแห้งเร็วได้เร็วกว่า

2. ขนาดและรูปร่าง มีผลต่อพื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก เช่น รูปร่างเหมือนกันขนาดเล็กจะมีพื้นที่ต่อน้ำหนักมากกว่าขนาดใหญ่จึงแห้งเร็วกว่า แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศที่เคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปได้ เช่น ถ้าชิ้นเล็กมากทับถมกัน การระเหยเกิดได้เฉพาะพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศ การระเหยจึงเกิดได้ช้าทั้ง ๆ ที่พื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักมาก

3. ตำแหน่งของอาหารเครื่องอบแห้ง น้ำในวัสดุที่สัมผัสกับลมร้อนได้ดีกว่าหรือสัมผัสกับลมร้อนที่มีความชื้นต่ำย่อมระเหยได้ดีกว่า

4. ปริมาณอาหารต่อถาด ถ้าปริมาณอาหารต่อถาดมากเกินไป อาหารส่วนล่างไม่ได้สัมผัสกับอากาศร้อน หรือได้รับความร้อนจากถาดแล้ว แต่ไอน้ำไม่สามารถแพร่กระจายผ่านชั้นอาหารตอนบนออกมาได้จึงแห้งช้า

5. ความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศร้อน อากาศร้อนที่มีไอน้ำอยู่มากแล้วจะรับไอน้ำได้น้อย

6. อุณหภูมิของอากาศร้อน ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับไอน้ำ จึงมีผลต่ออัตราการทำแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้นจึงมีผลต่อช่วงการทำแห้งลดลงด้วย

7. ความเร็วของลมร้อน ลมร้อนทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไปด้วย เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายได้ดีขึ้น นอกจากนั้นความเร็วลมทำให้เกิดกระแสปั่นป่วนในเตาอากาศจึงสัมผัสอากาศได้ดีขึ้น

2.3 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [13]

เนื่องจากประเทศไทยอยู่บริเวณศูนย์สูตร ซึ่งมีศักยภาพด้านการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง และสืบเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพืชผลทางการเกษตรมากมาย ส่วนหนึ่งก็จำหน่ายในรูปของสด และบางส่วนก็ทำการอบแห้งหรือตากแห้ง เพื่อเพิ่มมูลค่ายืดอายุการจัดเก็บ หรือความสะดวกต่อการขนส่ง การอบแห้งหรือตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่เกษตรกรหรือผู้ประกอบการเลือกใช้เนื่องจาก ต้นทุนต่ำ และง่าย ซึ่งปัจจุบันหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ได้ให้ความสำคัญกับการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น เนื่องจากกระแสการอนุรักษ์พลังงาน และลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

ปัจจุบันการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ยังมีปริมาณน้อย เนื่องจากขาดการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่เหมาะสม และความไม่แน่นอนของปริมาณแสงอาทิตย์ แต่

อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ก็ยังข้อดีกว่าการใช้แหล่งความร้อนจากเชื้อเพลิงอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับแหล่งพลังงานความร้อนอื่น ๆ [13]

รายการ	ความร้อนจากแสงอาทิตย์	เชื้อเพลิงน้ำมันเตา	ไฟฟ้า
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน	ไม่มี	ราคาถูก	ราคาแพง
เงินลงทุนเครื่องอบแห้ง	ราคาแพง	ราคาปานกลาง	ราคาต่ำ
ระยะเวลาในการคั่ว	ระยะเวลายาว แต่คุ้มค่า	ปานกลาง	ต่ำ
อายุการใช้งาน	ยาวนาน	ปานกลาง	ต่ำ
ค่าความร้อน/หน่วย	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความสะดวกในการใช้งาน	ง่าย และสะดวก	ปานกลาง	สะดวก
การประหยัดพลังงาน	ไม่มีค่าใช้จ่าย	ปานกลาง	ไม่ประหยัด
พื้นที่ในการติดตั้ง	ใช้พื้นที่ติดตั้งมาก	ปานกลาง	น้อย
ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม	ไม่มีผลกระทบ (สะอาด)	ปานกลาง	น้อย

กระบวนการอบแห้งหรือตากแห้งเป็นการระเหยน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ออกไปให้เหลือปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีค่าความชื้นสุดท้ายไม่เท่ากัน โดยอาศัยพลังงานความร้อนเพื่อทำให้น้ำระเหย หรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์มีความร้อนอยู่ในแสงอาทิตย์โดยปกติแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกจะประกอบด้วยรังสีต่างๆ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกจะเป็นช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นช่วงรังสีที่ฆ่าเชื้อโรคบางชนิดได้ ทำให้เกิดโรคมะเร็งได้และจะทำให้สีซีดจาง ช่วงที่สอง คือ แสงสว่าง ทำให้เราสามารถมองเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้และช่วงสุดท้าย คือ อินฟราเรดเป็นช่วงที่มีความสำคัญต่อการอบแห้งหรือตากแห้งเพราะช่วงนี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งมีปริมาณมากถึง 53% ของแสงแดด [14] พลังงานที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์และจะเคลื่อนที่มายังชั้นบรรยากาศนอกโลกมีปริมาณสูงมากแต่จะถูกบรรยากาศเหนือพื้นโลกดูดซับไว้บางส่วนจนเหลือประมาณ 800-1000 วัตต์ต่อตารางเมตร

1. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ มนุษย์รู้จักและเรียนรู้การตากแห้ง หรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์มาเป็นเวลานานแล้ว ไม่ว่าจะเป็นการตากผลผลิตทางการเกษตร การตากเสื้อผ้า การทำนาเกลือ เป็นต้น แต่ส่วนใหญ่เป็นการตากแห้งแบบโดยตรง ซึ่งประสบปัญหามากมายทั้งความ

ไม่แน่นอนของธรรมชาติ และบางครั้งยังอาจก่อให้เกิดความไม่สะอาดของผลผลิตหรือวัตถุดิบ เช่น ฝุ่น ละออง แมลงวัน เชื้อโรคต่างๆ ดังนั้น การพยายามหาเครื่องมือหรืออุปกรณ์เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าว ได้ถูกพัฒนาขึ้นในรูปของเครื่องอบแห้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มนุษย์พยายามคิดค้นและพัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งและลดความเสียหายในการตากแห้งโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก ปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งด้านรูปแบบ วิธีการ ทำให้สามารถแยกออกเป็นประเภทหลักได้ 3 ลักษณะ คือ

1.1 การอบแห้งแบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ เป็นระบบแบบไม่อาศัยระบบขับเคลื่อนอากาศ เช่น พัดลมมาช่วยในการหมุนเวียนกระแสอากาศร้อนที่ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ อาศัยการเคลื่อนที่แบบธรรมชาติ เครื่องอบแห้งด้วยระบบนี้ ยังแบ่งย่อยได้อีก 4 ชนิดคือ เครื่องอบแห้งโดยธรรมชาติ เครื่องอบแห้งที่รับแสงอาทิตย์โดยตรง และแบบใช้แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ และแบบผสม

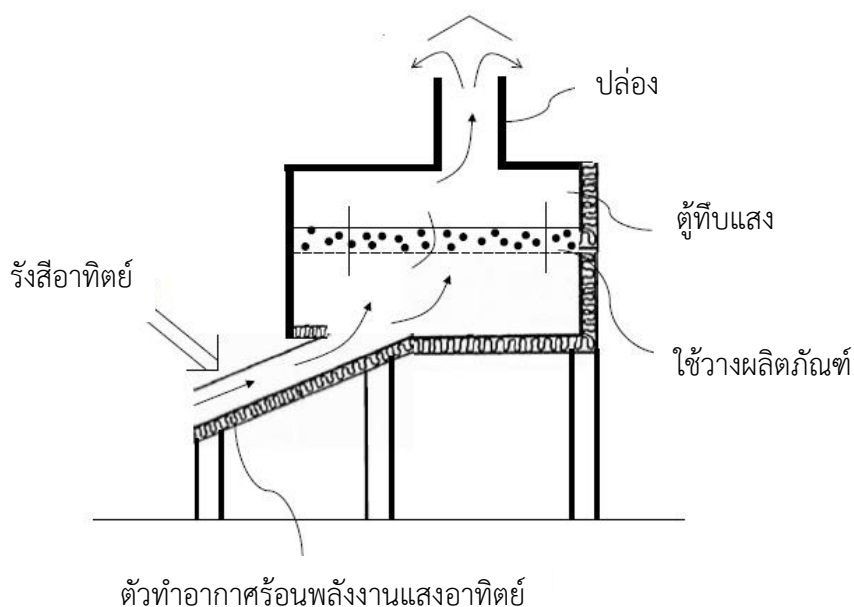
เครื่องอบแห้งแบบโดยตรง เป็นเครื่องอบแห้งที่วัตถุดิบรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง วัตถุดิบที่อบแห้งมักจะอยู่ในวัสดุโปร่งใส อากาศภายในเครื่องอบแห้งจะเคลื่อนตัวจากการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและจะพาความชื้นออกจากวัตถุดิบ และหมุนเวียนเพื่อถ่ายเทความชื้นภายในเครื่องอบแห้ง เครื่องอบแห้งแบบนี้อุณหภูมิภายในค่อนข้างสูงอาจสูงกว่า 60°C ทำให้เวลาในการอบแห้งจะสั้นลง วัตถุดิบที่อบแห้งสะอาดไม่มีสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะภายนอก รวมถึงแมลงวัน และแมลงพาหะต่างๆ โดยปัจจุบันเครื่องอบแห้งแบบนี้ได้รับการพัฒนาโดยใช้วัสดุโปร่งแสง เช่น วัสดุที่ใช้ทำหลังคาต้องโปร่งแสง ทนทานรังสียูวี แสงผ่านเข้าง่ายและสะท้อนออกยาก ทำให้เก็บสะสมความร้อนได้เป็นอย่างดีและมีน้ำหนักเบาเพื่อลดน้ำหนักโครงสร้าง ปัจจัยสำคัญในการพิจารณาปัจจัยหนึ่ง คือราคาของวัสดุที่เลือกใช้ กระจกถือได้ว่าเป็นวัสดุที่มีการเลือกใช้กันมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดี ราคาถูก แต่มีปัญหาเรื่องการแตกหักง่าย

เครื่องอบแห้งแบบโดยตรงที่มีใช้ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น แบบตู้อบแห้ง อุโมงค์หลังคาโค้ง หรืออาจเป็นหลังคาทรงจั่ว ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2



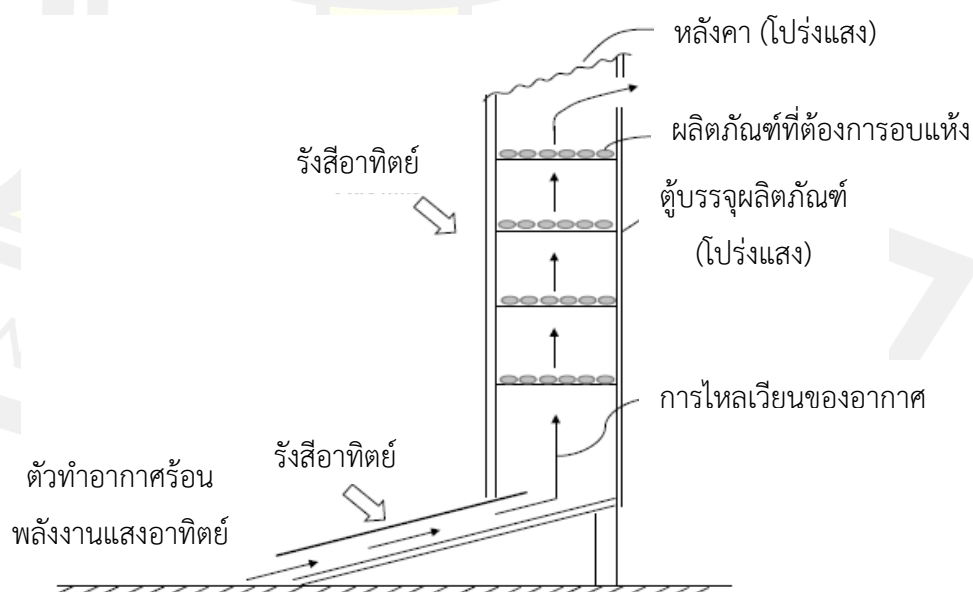
ภาพประกอบ 2.2 เครื่องอบแห้งแบบรับแสงอาทิตย์โดยตรงชนิดอุโมงค์หลังคาโค้ง [13]

แบบใช้แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ (Indirect Type) เครื่องอบแห้งแบบนี้ วัสดุอบแห้งไม่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง จะมีแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar Collector) ภายในจะมีวัสดุสำหรับดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ และถ่ายเทไปยังอากาศจนทำให้อากาศร้อนและเคลื่อนที่ไปยังห้องอบแห้ง ซึ่งภายในบรรจุวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง ผนังห้องสำหรับอบแห้งมักจะหุ้มฉนวนไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกภายนอก ภายในห้องอบแห้งอาจทำเป็นชั้น หลาย ๆ ชั้นเพื่อให้บรรจุผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งได้มากขึ้น ลักษณะทั่วไปของเครื่องอบแห้งแบบนี้สามารถแสดงในภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับแสงอาทิตย์ [15]

เครื่องอบแห้งแบบผสม (Mixed Mode Type) เครื่องอบแห้งแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับแบบใช้แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ ต่างกันตรงที่ห้องอบแห้งจะทำด้วยวัสดุโปร่งใสด้วย เพื่อให้ห้องอบแห้งสามารถรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ด้วยหรืออาจกล่าวได้ว่า เครื่องอบแห้งแบบนี้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งจากจากแผงรับแสงและจากห้องอบแห้งดังแสดงในภาพประกอบ 2.4

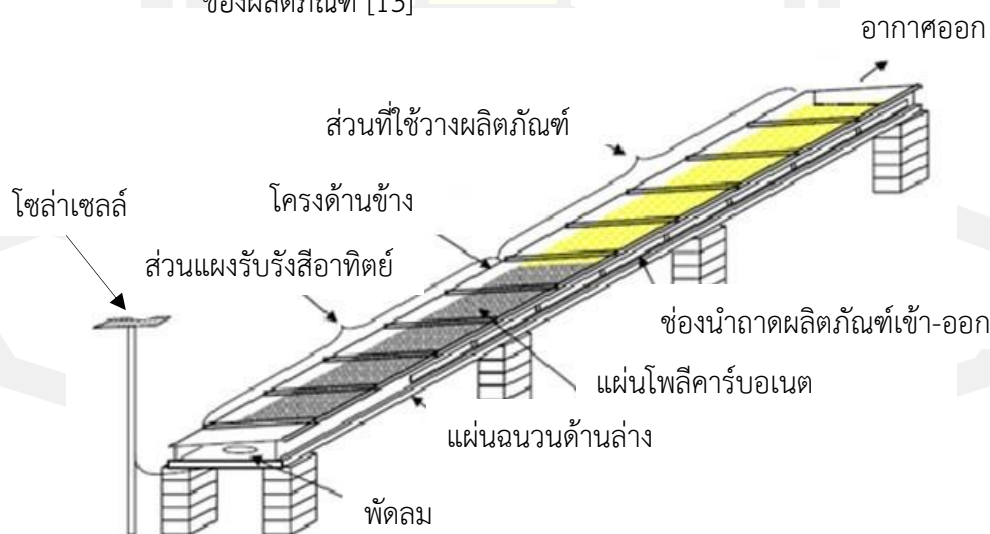


ภาพประกอบ 2.4 เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบผสม [15]

1.2 การอบแห้งแบบหมุนเวียนบังคับ เป็นระบบหรือเครื่องอบแห้งที่มีเครื่องช่วยให้อากาศเคลื่อนที่หมุนเวียนในทิศทางที่ต้องการ เช่น พัดลมโดยพัดลมจะทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอกให้เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ และมีการถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศให้อากาศเคลื่อนที่ผ่านวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้ง เพื่อลดความชื้นให้เหลือตามต้องการโดยรูปแบบของเครื่องอบแห้งจะมีลักษณะคล้ายกับแบบ Passive เพียงแต่เพิ่มระบบขับเคลื่อนกระแสอากาศเข้าไปในเครื่องอบแห้งซึ่งสามารถแสดงในภาพประกอบ 2.5 และ 2.6



ภาพประกอบ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบใช้แผงรับความร้อนโดยใช้พัดลมดูดอากาศร้อนเพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ [13]

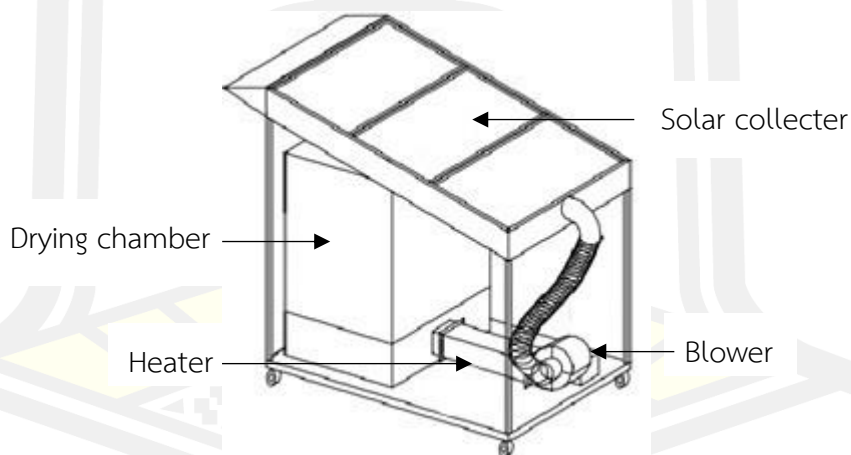


ภาพประกอบ 2.6 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานขับพัดลม [13]

1.3 การอบแห้งแบบความร้อนร่วม เป็นเครื่องอบแห้งที่อาศัยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนอื่นในกรณีที่แสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอ หรือในบางฤดูที่มีปริมาณแสงแดดน้อย เพื่อให้กระบวนการอบแห้งเป็นไปอย่างต่อเนื่องหรือแม้แต่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้สูงขึ้น หรือลดระยะเวลาในการอบแห้งลง พลังงานความร้อนที่มักใช้ร่วมกับแสงอาทิตย์ คือ พลังงานไฟฟ้าพลังงานเหลือทิ้งจากแหล่งอื่น พลังงานความร้อนจากชีวมวล หรือแม้แต่แก๊สชีวภาพแล้วแต่การประยุกต์ใช้งาน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.7 และ 2.8



ภาพประกอบ 2.7 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับชีวมวล [13]



ภาพประกอบ 2.8 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมฮีตเตอร์ไฟฟ้า [13]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพลและได้มีการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง ซึ่งแหล่งพลังงานที่ป้อนให้ระบบอบแห้งจะประกอบไปด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการประเมินประสิทธิภาพของระบบอบแห้งจะสามารถประเมินได้ดังต่อไปนี้

2.1 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector efficiency; η_c) [16] เป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนให้อากาศที่ดูดเข้ามาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทั่วไปการคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a \int_0^t (T_{\text{outC}} - T_{\text{inC}}) dt}{A_c \int_0^t I dt} \times 100\% \quad (5)$$

โดยที่	η_c	คือ ประสิทธิภาพของแผงรับรังสี (%)
	$\dot{m}_a$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
	T_{inC}	คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
	T_{outC}	คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
	A_c	คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m ²)
	I	คือ รังสีรวมที่ตกกระทบบนระนาบของตัวเก็บรังสี (W/ m ²) ที่เวลาใด ๆ
	C_a	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg- °C)

2.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical Energy Consumption; SEEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานไฟฟ้า (kW-h) ที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง (kg) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$SEEC = \frac{E_E}{m_i - m_f} \quad (6)$$

โดยที่	$SEEC$	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (kW-h/kg)
	E_E	คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอดอินฟราเรด (kW-h)
	m_i	คือ มวลวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	m_f	คือ มวลวัสดุหลังอบแห้ง (kg)

2.3 อัตราการอบแห้ง สามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้งมีหน่วยเป็น kg/h สามารถหาได้จากสมการ

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (7)$$

โดยที่	DR	คือ	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
	m_i	คือ	มวลวัสดุก่อนอบแห้ง (kg)
	m_f	คือ	มวลวัสดุหลังอบแห้ง (kg)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.4 สมการอบแห้ง

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ถูกควบคุมโดยกลไกของการแพร่กระจายของเหลวและ/หรือไอ แบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบาง ซึ่งอธิบายถึงการอบแห้งของวัสดุเหล่านี้แบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ ทฤษฎี กึ่งทฤษฎี และจากการทดลอง (เอมไพริคัล) โดยที่แบบแรกจะคำนวณจากความต้านทานภายในในการส่งผ่านความชื้นในขณะที่อีก 2 แบบ จะพิจารณาจากความต้านทานภายนอกในการส่งผ่านความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์และอากาศ

1. สมการอบแห้งทางทฤษฎี

สมการอบแห้งทางทฤษฎีจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน การเคลื่อนที่ของน้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลเนื่องจากความเข้มข้นของความชื้น สมการทางทฤษฎีจะแสดงการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำในลักษณะการแพร่ เมื่อสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการอบแห้ง แต่อย่างไรก็ตามสมการทางทฤษฎีมีจำนวนเทอมในการวิเคราะห์จำนวนมากซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของผลิตภัณฑ์มีตัวแปรและตัวพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงไม่นิยมนำแบบจำลองมาใช้รูปแบบสมการอบแห้งทางทฤษฎีที่ใช้ในการหาอัตราส่วนความชื้นคือ

1.1 กรณีของวัสดุทรงลูกบาศก์

$$\overline{MR} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \left[\exp\left(-3\pi^2 \frac{Dt}{l^2}\right) + \left(\frac{3}{9}\right) \exp\left(\frac{-11\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \left(\frac{3}{25}\right) \exp\left(\frac{-27\pi^2 Dt}{l^2}\right) \right] \quad (8)$$

1.2 กรณีของวัสดุทรงกลม

$$\overline{MR} = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \sum_{p=1}^{\infty} \left(\frac{1}{p^2}\right) \exp\left(\frac{-p^2 \pi^2 X^2}{9}\right) \quad (9)$$

1.3 กรณีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$$\overline{MR} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{4}{\lambda_n^2}\right) \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 X^2}{4}\right) \quad (10)$$

เมื่อ	$\overline{MR}$	คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ย
	A	คือ พื้นที่ผิว (m^2)
	V	คือ ปริมาตร (m^3)
	X	คือ $(A/V) (Dt)^{1/2}$
	λ_n	คือ รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์
	l	คือ ความหนา (m)
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

2. สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

เป็นสมการแบบจำลองสมการง่าย ๆ โดยการนำสมการทางทฤษฎีมาวิเคราะห์ให้ง่ายขึ้น และไม่ต้องนำรูปทรงของผลิตภัณฑ์มาพิจารณา ซึ่งทำให้สมการไม่มีความซับซ้อนโดยทั่วไปจะถูกสร้างขึ้นโดยการแก้อนุกรมทั่วไปของกฎข้อที่สองของฟิคส์ ให้ง่ายขึ้น โดยการสมมติอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของความชื้นของผลิตภัณฑ์และความชื้นสมดุล ข้อสมมติดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน

3. สมการอบแห้งเอมไพริคัล

เป็นสมการที่ใช้ในการทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี สำหรับกรณีวัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำ กระบวนการอบแห้งจะมีเพียงช่วงอัตราการแห้งลดลงอย่างเดียว แบบจำลองการลดลงของความชื้นในช่วงนี้ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองเอมไพริคัล แต่มีข้อจำกัดคือเงื่อนไขการอบแห้งต้องตรงกับสภาวะการทดลอง ซึ่งในที่นี้ขอยกตัวอย่างสมการอบแห้งเอมไพริคัล ดังต่อไปนี้

3.1 สมการ Semi เป็นกรณีพิเศษของแบบจำลองของ Handerson และ Pabis ได้อธิบายว่าการถ่ายเทความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร สามารถมองให้เหมือนกับการถ่ายเทความร้อนของวัตถุที่จุ่มอยู่ในของไหลเย็น สมการนี้คล้ายคลึงกับกฎการระบายความร้อนของนิวตัน ซึ่งนักวิจัยหลายคนได้ตั้งชื่อสมการนี้ว่าเป็นแบบจำลองของนิวตันก่อน ต่อมา Lewis (1921) แนะนำว่าในช่วงที่การอบแห้งวัสดุที่มีรูพรุน การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของวัสดุอยู่ในช่วงอัตราการลดลง และเป็นอัตราส่วนของผลต่างระหว่างปริมาณความชื้นของวัสดุอบแห้งและความชื้นสมดุลที่สถานะของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สมการนี้ถือว่าการเคลื่อนที่ของความชื้นในวัสดุจากภายใน

ออกมาสู่ที่ผิวภายนอกไม่มีความต้านทาน สมการนี้สามารถนำมาใช้อธิบายการอบแห้ง ข้าวบาร์เลย์ ข้าวสาลี มะม่วงหิมพานต์และวอลนัทได้ดี อย่างไรก็ตามในระยะเวลาแรกของการอบแห้งสมการจะทำนายค่าความชื้นได้สูงเกินไป และในช่วงหลังจะทำนายค่าความชื้นได้ต่ำ [17] ซึ่งสมการมีรูปแบบดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} = e^{-kt} \quad (11)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้นของวัสดุ
 K คือ ค่าคงตัวการอบแห้ง (drying constant) ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ (s^{-1})
 t คือ เวลา

โดยที่ MR มีความสัมพันธ์กับความชื้นของวัสดุ ตามสมการ

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (12)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้งที่เวลา t ($kg\ kg^{-1}$)
 M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ ($kg\ kg^{-1}$)
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ ($kg\ kg^{-1}$)

3.2 สมการ Henderson and Pabis เป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุด โดยปรับปรุงรูปแบบการอบแห้งโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิคซ์ [18] แบบจำลองนี้ประสบความสำเร็จในการจำลองการอบแห้งของข้าวโพด ข้าวสาลี และถั่วลิสง ความชันของแบบจำลองนี้ (สัมประสิทธิ์, k) สัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการแพร่กระจาย เมื่อกระบวนการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และการแพร่กระจายของของเหลวเป็นตัวควบคุมกระบวนการ [17] มีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = ae^{-kt} \quad (13)$$

เมื่อ a คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.3 สมการ Modified Henderson and Pabis สามารถอธิบายลักษณะการอบแห้งถั่วลิสงพร้อมเปลือกได้ดี [19] เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$MR = ae^{-kt} + be^{-gt} + ce^{-ht} \quad (14)$$

เมื่อ a b c g และ h คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.4 สมการ Two term โดย Henderson (1974) [20] ได้นำเสนอสองเทอมแรกของการแก่อนุกรมทั่วไปของสมการของกฎข้อที่สองของฟิชช์ เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องสมการของ Henderson and Pabis อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ต้องให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่ และต้องสมมติค่าการกระจายที่คงที่ ใช้อธิบายการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่คำนึงถึงรูปร่างของวัสดุ เช่น ข้าวโพด ถั่วเหลือง แมคคาเดเมีย ได้ดี อย่างไรก็ตามสมการนี้จะทำนายได้ดีเมื่ออุณหภูมิอบแห้งคงที่ [21] รูปแบบของสมการมีดังนี้

$$MR = ae^{(-kt)} + be^{(-gt)} \quad (15)$$

เมื่อ a , b และ g คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.5 สมการ Two term exponential โดย Sharaf-Eldeen, Blaisdell and Hamdy (1980) [22] ได้ปรับปรุงสมการ Two-term model โดยลดจำนวนค่าคงที่ และจัดเทอมที่สองใหม่ โดยจะต้องมี $(1-a)$ ที่ $t = 0$ เพื่อให้ได้ $MR = 1$ สำหรับทำนายอัตราการอบแห้งของฝักข้าวโพด เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$MR = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kat)} \quad (16)$$

เมื่อ a คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.6 สมการ Logarithmic โดย Chandra และ Singh (1995) [23] เสนอสมการอบแห้งรูปแบบใหม่ โดยเพิ่มพารามิเตอร์เข้าไปในสมการอบแห้งของ Henderson and Pabis จากนั้น Yagcioglu นำแบบจำลองนี้ไปใช้เพื่อการอบแห้งของไบโอเรล [18] ซึ่งรูปแบบของสมการมีดังนี้

$$MR = ae^{(-kt)} + c \quad (17)$$

เมื่อ a และ c คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.7 สมการ Page เป็นสมการที่ Page (1949) [24] ได้นำเสนอเมื่อปี ค.ศ 1949 เป็นการปรับปรุงแบบจำลองของ Lewis เพื่อแก้ไขจุดบกพร่อง แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนายการอบแห้งของธัญพืชข้าวกล้อง ถั่วขาว เมล็ดข้าวโพด ข้าวบาร์เลย์ [17] และการอบแห้งใบโหระพา [25] ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR = e^{(-kt^n)} \quad (18)$$

เมื่อ n คือ ค่าคงตัวที่ได้จากการฟิตแบบจำลองกับผลการทดลองการอบแห้งชั้นบาง

3.8 สมการ Modified Page I เป็นสมการที่ Overhults [26] ได้ปรับเปลี่ยนสมการของ page เพื่ออธิบายการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยอากาศร้อน รูปแบบสมการที่ปรับปรุงนี้ เป็นที่รู้จักโดยทั่วไปว่าเป็นสมการ Modified Page I ซึ่งมีรูปแบบของสมการ ดังนี้

$$MR = e^{(-kt)^n} \quad (19)$$

3.9 สมการ Modified Page II เป็นสมการที่ White (1978) [27] ได้แก้ไขสมการของ Page เพื่ออธิบายการอบแห้งถั่วเหลือง [18] รูปแบบที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นสมการ Modified Page-II ซึ่งมีรูปแบบของสมการ ดังนี้

$$MR = e^{-(kt)^n} \quad (20)$$

3.10 สมการ Wang and Singh โดย Wang and Singh (1978) [28] ได้สร้างสมการสำหรับอบแห้งข้าวเปลือก [18] เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (21)$$

เมื่อ a และ b คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.11 สมการ Diffusion approximation เป็นสมการที่สามารถอธิบายการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบไม่ต่อเนื่องได้ดี [29] เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$MR = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kbt)} \quad (22)$$

เมื่อ a และ b คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.12 สมการ Verma et al. (1985) [30] เป็นสมการที่สามารถอธิบายการอบแห้งอินทผลัมแบบสุญญากาศได้ดี [31] และการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งฟลูอิดซ์เบดแบบไม่ต่อเนื่อง [29] เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$MR = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-gt)} \quad (23)$$

เมื่อ a k และ g คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

3.13 สมการ Midili et al. เป็นสมการที่ Midili et al. (2002) [32] นำเสนอสมการอธิบายรูปแบบใหม่ โดยเพิ่มตัวแปรพิเศษและเทอมของสมการ Henderson and Pabis ซึ่งสมการนี้เป็นการรวมกันของ exponential term และ a linear term สามารถอธิบายผลการทดลองอบแห้งผักโขมด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนด้วยพัดลม [33] การอบแห้ง ถั่วพิตต้าชิโอ ด้วยวิธีที่อบแห้งแตกต่างกัน [18] ซึ่งเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$MR = ae^{(-kt^n)} + bt \quad (24)$$

เมื่อ a และ b คือ สัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ขึ้นกับวัสดุ

4. การวัดประสิทธิภาพในการทำนายของสมการ

4.1 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Squared Error; MSE) เป็นการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง โดยค่าที่ได้ยิ่งต่ำจะยิ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำมาก โดยค่า MSE คำนวณได้จากการนำค่าความคลาดเคลื่อนมายกกำลัง แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย ดังสมการ (25)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (25)$$

โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้

$MR_{exp,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองที่ t ใด ๆ

$MR_{pred,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทำนายที่ t ใด ๆ

4.2 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) เป็นวิธีการวัดค่าความคลาดเคลื่อนแบบมาตรฐาน ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยค่าที่ได้ยิ่งน้อยจะยิ่ง แสดงว่าแบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำมาก วิธีการคำนวณคือจะเป็นการนำค่า MSE ที่คำนวณได้มาหารากที่สอง ดังสมการ (26)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2} \quad (26)$$

4.3 สัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of determination; R^2) หรือ R-square เป็นค่าที่ใช้พิสูจน์ว่าแบบจำลองที่ได้นั้นเหมาะสมหรือไม่ โดยมีค่า 0-1 ซึ่งถ้ามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการนั้นสามารถให้ผลทำนายที่ดี [34] สามารถคำนวณได้ดังสมการ (27)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\sum_{i=1}^N MR_{pred,i}}{N} - MR_{pred,i} \right)^2} \quad (27)$$

4.4 ค่าไคสแควร์ (Chi-square; χ^2) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของสมการในการทำนาย โดยจะเป็นการนำจำนวนของค่าคงที่ (n) ในสมการทำนายมาเพิ่มเข้าไปในสมการหาค่า MSE ซึ่งค่าที่คำนวณได้ยิ่งต่ำจะยิ่งแสดงว่าสมการนั้นมีความแม่นยำมาก [34] ดังสมการ (28)

$$\chi^2 = \frac{1}{(N-n)} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \quad (28)$$

2.5 การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด [35]

รังสีอินฟราเรด หรือ รังสีใต้แดงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 1011-1014 Hz และมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.75 ไมโครเมตรถึง 1000 ไมโครเมตร [36] สารที่มีอุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวิน จะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมาจากตัวมันเองเสมอ

1. หลักการของเทคโนโลยี

การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด เป็นการให้ความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในช่วงของแสงที่มองเห็นได้ ช่วงรังสีอินฟราเรดสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ คลื่นสั้น คลื่นปานกลาง และคลื่นยาว การดูดซับรังสีอินฟราเรดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด ส่วนประกอบของวัตถุ ลักษณะพื้นผิวของวัตถุ มุมตกกระทบ และสีของวัตถุ วัตถุที่เป็นของแข็งส่วนใหญ่จะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 2 เมตรได้ดี ยกเว้นโลหะที่ขัดขึ้นเงา เช่น ทอง เงิน เป็นต้น การใช้งานรังสีอินฟราเรดจะต้องมีตัวปล่อยคลื่น (IR Emitter) ซึ่งประกอบด้วย ตัวปล่อยคลื่นสั้น (Short Wave) ตัวปล่อยคลื่นปานกลาง (Medium Wave) และตัวปล่อยคลื่นยาว (Long Wave)

1.1 คลื่นสั้น (Short Wave) มีความยาวคลื่นในช่วง 0.75-2 μm ตัวปล่อยคลื่น ได้แก่ หลอด Tungsten Filament, หลอด T-3 Quartz Lamps เป็นต้น

1.2 คลื่นปานกลาง (Medium Wave) มีความยาวคลื่นในช่วง $2-4 \mu\text{m}$ ตัวปล่อยคลื่น ได้แก่ คอยล์ หรือ ลวดที่บรรจุในแท่ง Quartz ท่อ Silicon ท่อ Metal Radiant Tubes เป็นต้น

1.3 คลื่นยาว (Long Wave) มีความยาวคลื่นในช่วง $4 - 1,000 \mu\text{m}$ ตัวปล่อยคลื่น ได้แก่ แก้ว เซรามิก เป็นต้น

ปรากฏการณ์ในขณะที่คลื่นรังสีอินฟราเรดกระทบกับวัตถุมี 3 แบบ คือ ส่งผ่าน (Transmission) ดูดซับ (Absorption) และสะท้อน (Reflection) โดยถ้าเป็นวัตถุหนา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีเพียงเฉพาะส่วนที่ดูดซับ (Absorption) เท่านั้น

การให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรดไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทางแสง (Photochemical) เหมือนกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) จึงไม่ทำให้เกิดการเผาไหม้โดยตรงกับผิวหนังร่างกายของคน

2. ประโยชน์ของเทคโนโลยี

2.1 ให้ความร้อนและลดความร้อนได้อย่างรวดเร็ว

2.2 ให้ความร้อนที่รวดเร็ว

2.3 สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.4 มีการควบคุมที่แม่นยำ

2.5 มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

2.6 ต้นทุนเริ่มแรกและค่าบำรุงรักษาต่ำ

3. การประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยี

การประยุกต์ใช้งานการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดจะขึ้นอยู่กับความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ลักษณะการใช้งานโดยมีตัวอย่างการใช้งานที่หลากหลาย ได้แก่ การอบสี การอบผลิตภัณฑ์แป้ง การเคลือบภาชนะในการทำอาหาร การเคลือบสาร PVC บนผนัง การอบแห้งสารแม่เหล็กบนเทปคาสเซต การอบแห้งผลิตภัณฑ์กระจกนิรภัย การอบหนัง การอบแห้งกระดาษ การอบสีและแล็กเกอร์ การบัดกรี การทำให้หดตัวของโลหะ การเผากระเบื้อง เป็นต้น ซึ่งการประยุกต์ใช้งานมีข้อควรพิจารณา ดังนี้

3.1 ขนาดของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากขนาด (ความหนาแน่น) ของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ระยะเวลาการให้ความร้อนก็จะต่างกันด้วย

3.2 ประเภทของวัสดุผลิตภัณฑ์ ชนิดของวัสดุ รวมทั้งลักษณะของพื้นผิวจะมีการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ต่างกันซึ่งต้องพิจารณาเป็นกรณีๆ ไป

3.3 ช่วงความยาวคลื่น คุณสมบัติของรังสีอินฟราเรดจะแตกต่างกันตามช่วงความยาวคลื่น โดยคลื่นอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้น จะมีประสิทธิภาพในการทะลุผ่านพื้นผิว

ของผลิตภัณฑ์ได้มาก (ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนสั้นกว่า) ในขณะที่คลื่นอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นยาวจะทะลุผ่านผลิตภัณฑ์ได้น้อยกว่า (ใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนนานกว่า) ดังนั้น การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นยาวจึงเหมาะสมกับการให้ความร้อนเฉพาะบริเวณพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การอบสี เป็นต้น

4. ศักยภาพการประหยัดพลังงาน

การให้ความร้อนโดยรังสีอินฟราเรด มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบอื่นๆ (Conventional) ค่อนข้างมาก เนื่องจากการให้ความร้อนโดยตรง โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น อากาศในการพาความร้อน และใช้ระยะเวลาในการทำความร้อนได้อย่างรวดเร็ว (ใช้เวลาน้อยกว่าแบบปกติประมาณ 6-8 เท่า) ดังนั้นความสูญเสียในรูปของอากาศปล่อยทิ้ง (Exhaust) หรือการรั่วไหล (Leakage) จึงมีค่าต่ำกว่ามาก

2.6 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน [37]

จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุนนั้นเป็นค่าที่เข้าใจง่าย จุดคุ้มทุนก็คือ จุดที่ได้ทุนคืนพอดี เช่นเดียวกับคำว่า ระยะคืนทุน ซึ่งก็คือ ระยะเวลาที่ได้คืนทุนพอดี ซึ่งถ้าเรารู้ว่าจุดใดคือจุดคุ้มทุน เราก็สามารถตัดสินใจและดำเนินงานผลิตให้มากกว่า เช่นเดียวกับคำว่า ระยะเวลาคืนทุน ถ้าเรารู้ว่าสามารถคืนทุนได้กี่ปีแล้ว เราก็สามารถตัดสินใจและดำเนินงานผลิตให้นานกว่าระยะเวลาคืนทุน เพื่อให้กำไรมาจากการดำเนินงาน

จุดคุ้มทุน (Breakeven Point) คือจุด จุดที่รายรับมีค่าเท่ากับต้นทุนพอดี โดยทั่วไปแล้วจะให้ความสนใจในปริมาณที่จุดคุ้มทุน ซึ่งเรียกว่า Breakeven Quantity (Q_{RE}) หน่วยของปริมาณจุดคุ้มทุนมักเป็นหน่วยต่อปี เพอร์เซ็นต์ของกำลังการผลิต ชั่วโมงต่อเดือน เป็นต้น

จากความหมายของจุดคุ้มทุน จะเห็นได้ว่าจะมีความเกี่ยวข้องกับสองอย่างคือ รายรับและต้นทุน รายรับ (Revenue, R) โดยปกติแล้วจะแปรผันตรงกับจำนวนหน่วยที่ผลิต หรือขาย ดังนั้น ถ้ากำหนดให้ P คือราคาขายต่อหน่วย q คือปริมาณการขาย จะได้

$$R = P \times q \quad (29)$$

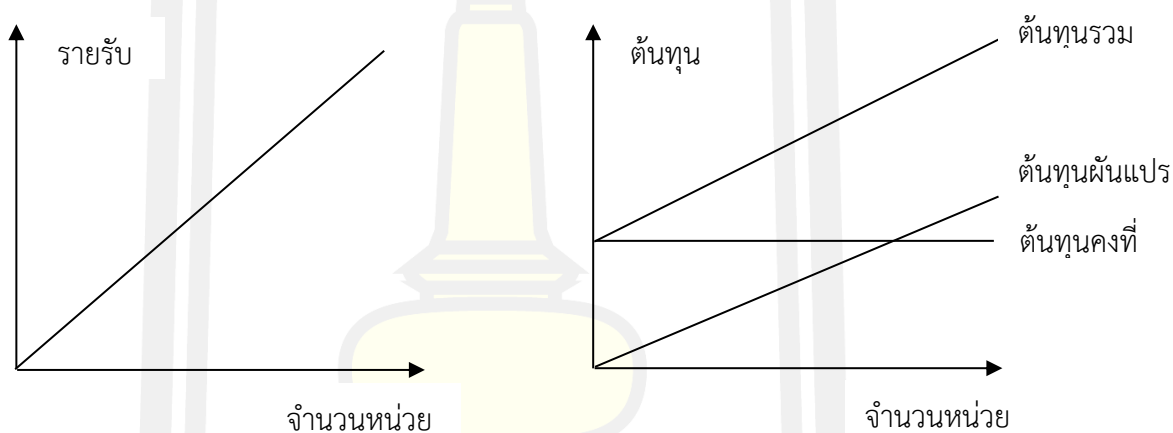
ในขณะที่ต้นทุนนั้นจะสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่ (Fixed Cost, FC) หมายถึงต้นทุนที่ไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยที่ผลิต และต้นทุนผันแปร (Variable Cost, VC) คือต้นทุนที่ขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยที่ผลิต ดังนั้น ถ้าทำการผลิตมากก็จะเสีย

ต้นทุนประเภทนี้มาก ถ้าทำการผลิตน้อยจะเสียต้นทุนประเภทนี้น้อย เช่น ค่าแรงทางตรง ค่าวัตถุดิบทางตรง ค่าการตลาด ถ้า v คือต้นทุนผันแปรต่อหน่วยจะได้

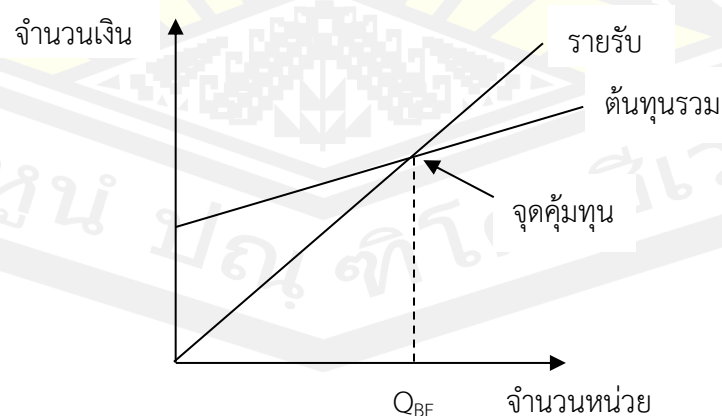
$$VC = v \times q \quad (30)$$

ในการพิจารณาในด้านต้นทุนนี้ เราต้องนำทั้งต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรมารวมกัน ซึ่งเรียกว่า ต้นทุนรวม (Total Cost , TC) ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$TC = FC + v \times q \quad (31)$$



ภาพประกอบ 2.9 ความสัมพันธ์ของรายรับและต้นทุนทั้ง 3 ประเภท กับจำนวนหน่วย [37]



ภาพประกอบ 2.10 จุดคุ้มทุนและปริมาณที่จุดคุ้มทุน [37]

จากภาพประกอบ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของรายรับและต้นทุน ทั้ง 3 ประเภท กับจำนวนหน่วยและเมื่อนำภาพประกอบ 2.9 มารวมกัน จะได้ภาพประกอบ 2.10 ซึ่งความหมายของจุดคุ้มทุนที่รายรับมีค่าเท่ากับต้นทุนพอดี ทำให้จุดคุ้มทุนคือจุดที่เส้นกราฟรายรับและเส้นกราฟต้นทุนตัดกัน และปริมาณที่จุดคุ้มทุนคือเส้นที่ลากกลางมายังจุดคุ้มทุนมาตัดที่แกน X

จากภาพประกอบ 2.9 และ 2.10 จะเห็นได้ว่าปริมาณการผลิต เท่ากับ Q_{BE} รายรับจะมีค่าเท่ากับต้นทุนพอดีนั้นก็คือไม่ได้กำไรและไม่ขาดทุน แต่ถ้าเลื่อนปริมาณการผลิตมาทางด้านซ้าย จะพบว่า ต้นทุนมีค่ามากกว่ารายรับนั้น ก็หมายถึง การขาดทุน โดยการขาดทุนจะเท่ากับผลต่างระหว่างต้นทุน กับรายรับ ในทางตรงกันข้ามถ้าเลื่อนปริมาณการผลิตไปทางขวา จะพบว่า รายรับมีค่ามากกว่าต้นทุน นั้นหมายถึง กำไร โดยกำไรจะเท่ากับผลต่างระหว่างรายรับและต้นทุนนั่นเอง ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปว่า ถ้าปริมาณการผลิตมีค่าน้อยกว่าปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนแล้ว ก็กิจการจะประสบกับการขาดทุน ในทางตรงกันข้ามถ้าปริมาณการผลิตมีค่ามากกว่าปริมาณการผลิตที่จุดคุ้มทุนแล้ว กิจการจะได้รับกำไรจากการดำเนินงาน

อนึ่ง จากภาพประกอบ 2.9 และ 2.10 จะเห็นได้ว่าเส้นรายรับและเส้นต้นทุนนั้นมีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งในความเป็นจริงแล้ว เส้นทั้งสองไม่จำเป็นต้องอยู่ในลักษณะเส้นตรง และในทางกรณีทีเส้นทั้งสองไม่ใช่เส้นตรงอาจทำให้จุดคุ้มทุนมีจำนวนมากกว่าหนึ่งจุดก็เป็นได้

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) คือระยะเวลาที่ทำให้ได้เงินทุนคืนพอดี หรือระยะเวลาที่ทำให้รายรับมีค่าเท่ากับต้นทุนพอดี ซึ่งมีหน่วยเป็นช่วงเวลา และมักมีหน่วยเป็นปี จะได้

$$\text{ระยะคืนทุน} = \frac{\text{ต้นทุนคงที่}}{\text{ต้นทุนผันแปร}} \quad (32)$$

2.7 ไพล [38]

ไพล มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zingiber montanum* (Koenig) Link ex A. Dietr. [39] อยู่ในวงศ์ ZINGIBERACEAE มีชื่อเรียกต่างกันในแต่ละท้องถิ่น คือ ปูลอย ปูเลย (ภาคเหนือ) มันสะล่าง (แม่ฮ่องสอน) ไพล ไพลเหลือง ว่านไฟ (ภาคกลาง) เป็นพืชล้มลุกจำพวกเหง้าใต้ดิน เหง้าเหี่ยวในหน้าแล้ง และงอกงามในหน้าฝน ใบเดี่ยวรูปหอกเรียวยาว ผิวและขอบเรียบ กาบใบหุ้มลำต้นสูง ๒-๔ ฟุต สีเขียวเข้ม โคนกาบสีแดง เนื้อในเหง้าสีเหลืองอ่อนกลิ่นหอมฉุน ดอกช่อทรงพุ่มกลมเรียวยาวตั้งตรง กาบหุ้มสีน้ำตาลเข้มแดงขอบเขียว กลีบดอกทยอยบานออกมาบาง ๆ สีขาวหรือสีเหลือง ผลเป็นผลแห้งรูปทรงกลม



ภาพประกอบ 2.11 ไพล [40]

ไพลเป็นพืชที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วนดังนี้ ใบมีรสขื่นเอียน แก้ก้นเนื้อครันตัว แก่ปวดเมื่อย ดอก มีรสขื่น แก่ไข้ใน กระจายเลือดที่เป็นลิ่มเป็นก้อน ทำลายเลือดเสีย ขับระดู ต้นมีรสฝาดขื่นเอียน แก่อุจจาระพิการ แก่ธาตุพิการ เหง้า รสฝาดขื่นเอียน แก่ท้องอืด ท้องขึ้น ขับลม แก่โรคบิด แก่หืด ตำพอกแก้ฟกช้ำและดูดพิษแผลอักเสบ สกัดผสมทำยาหม่องแก้อาการเคล็ดขัดยอก รักษาอาการไตอักเสบเรื้อรัง เป็นยาชาเฉพาะที่ ช่วยลดอาการปวด จากการศึกษาน้ำมันไพลทางด้านลดการอักเสบพบว่าเฉพาะน้ำมันสกัดดิบเท่านั้นที่ให้ผลดี ครีมน้ำมันไพล 14 % ได้ถูกจัดเข้าในบัญชียาหลักแห่งชาติ พ.ศ. 2542 (บัญชียาหลักสมุนไพร กลุ่มที่ 2 ยาจากสมุนไพรที่มีการพัฒนา)

องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดไพล นอกจาก Curcumin ซึ่งเป็นสารในกลุ่ม Curcuminoids แล้วยังมี Cassumunarin A B และ C ซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่ม Complex Curcuminoids ซึ่งมีฤทธิ์ต้านการอักเสบได้ดีกว่า Curcumin นอกจากนี้ สารสกัดไพลด้วยไดคลอโรมีเทนมีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ ได้ดี แต่สารสกัดไพลด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ไม่แสดงฤทธิ์ยับยั้งเชื้อทั้งสองชนิด แต่มีฤทธิ์ลดการหลั่งของสารที่ทำให้เกิดการแพ้และอักเสบของเซลล์ผิวหนังในคน นอกจากนี้สาร Zerumbone ซึ่งเป็นสารพวก sesquiterpene ที่สกัดได้จากไพล ยังมีฤทธิ์ต้านเชื้อรา Rhizoctonia solani ซึ่งเป็นเชื้อราที่ทำให้เกิดโรคเน่าในพืช โดยมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่มีผลฆ่าเชื้อราได้เท่ากับ 1000 มก./ลิตร ได้ผลดีกว่ายาฆ่าเชื้อราบางชนิด โดยการทดลองใช้ป้องกันการเน่าของเมล็ดพืชที่เกิดเชื้อรา *R.solani* พบว่าสามารถป้องกันได้ถึง 85.7 เปอร์เซ็นต์

องค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยไพลเป็นสารกลุ่ม terpenoid เช่น α -pinene, sabinene, α -terpinene, terpinen-4-ol และ สารกลุ่ม phenylbutanoid มีรายงานการวิจัยว่า DMPBD มีฤทธิ์ลดอาการปวดและอักเสบของข้อเท้าได้ดีกว่ายาแก้ปวด แก้อักเสบในกลุ่ม

NSAD เช่น Diclofenac, Phenidone เป็นต้น ทำให้มีการใช้ไพลเป็นส่วนประกอบในการอบไอน้ำ หรือในลูกประคบเพื่อแก้ปวด และ DMPBD ยังมีฤทธิ์ในการกำจัดหมัดสุนัข น้ำมันหอมระเหยจากไพล ยังมีฤทธิ์ต่อต้านเชื้อรา *Aspergillus flavus* ซึ่งเป็นเชื้อราที่สร้างความเสียหายให้กับอาหาร สารเคมี อีกชนิดหนึ่งที่พบในไพลและมีความสำคัญคือ Sabinene และ Terpinen-4-ol โดยสารทั้งสองชนิดมี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฆ่าเชื้อราโรคพืชได้ดี พบว่า Terpinen-4-ol ที่ความเข้มข้น 2.5 % มีฤทธิ์ฆ่า เชื้ออสุจิของวัวไถ่ใกล้เคียงกับยาสังเคราะห์ Delfen นอกจากนี้ terpinen-4-ol ยังมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ และการติดเชื้

2.8 ทบทวนวรรณกรรม

ปัจจุบันทุกภูมิภาคของโลกได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในด้านการประหยัดพลังงาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หรือการ นำพลังงานมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีประเด็นปัญหา ในการพัฒนา คือ ความไม่สม่ำเสมอของพลังงาน ชั่วโมงการทำงานจำกัดกว่าแหล่งพลังงานอื่น และใช้ เวลาในการอบแห้งนาน มีนักวิจัยหลายคนที่ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อแก้ไข จุดอ่อนของการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ด้านการอบแห้ง ซึ่งอาจใช้วิธีหาแหล่งพลังงาน เสริมจากแหล่งอื่นมาช่วยในการอบแห้ง มีรายงานการศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น โดย Mortezapour H. [41] ศึกษาการอบแห้ง กล้วยฝักรับด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ คือ 40 50 และ 60 °C ซึ่งการทำงานมีสองโหมด คือ แบบที่มีและไม่มีระบบปั๊มความร้อน ผลการวิจัยพบว่า เวลาการอบแห้ง ลดลง 62% เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจาก 40 เป็น 60 °C นอกจากนี้การใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับการลดความชื้นอากาศอบแห้ง ทำให้อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น และใช้เวลาการอบแห้งสั้นลง ประมาณ 40% ต่อมา Yahya M. [42] ศึกษาการอบแห้งมันสำปะหลังและประสิทธิภาพของเครื่อง อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (SD) และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์-ปั๊มความร้อน (SAHPD) สำหรับระบบ SD และ SAHPD ทำให้มวลของมันสำปะหลังลดลงจาก 30.8 kg เหลือ 17.4 kg ภายในเวลา 13 และ 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 40 °C และ 45 °C ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงความ ร้อนเฉลี่ยเป็น 25.6% และ 30.9% สำหรับ SD และ SAHPD อัตราการอบแห้งเฉลี่ย (DR) และอัตราการ ระเหยน้ำจำเพาะ (SMER) เป็น 1.33 kg/h และ 0.38 kg/kW-h ตามลำดับ สำหรับ SD และ 1.93 kg/h และ 0.47 kg/kW-h ตามลำดับ สำหรับ SAHPD จากนั้น Ziaforoughi A. [7] ได้ทำการ สร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าจาก ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำการทดลองที่ขึ้นมันฝรั่งมีความหนา 3 5 และ 7 mm อบแห้งที่อุณหภูมิ 50

60 และ 70 °C ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่คล้ายกันของเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดแบบไม่ต่อเนื่อง ผลการวิจัยพบว่า มีการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ 40% ถึง 69% ซึ่งมีผลมาจากระบบแสงอาทิตย์ นอกจากนี้สามารถลดเวลาในการอบแห้ง ไม่น้อยกว่า 31% ถึง 52% เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งแบบอินฟราเรดแบบไม่ต่อเนื่อง

สำหรับการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่อาศัยแหล่งพลังงานอื่นมาเสริม ซึ่งมีนักวิจัยพยายามพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น และมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดย Gulcimen F. [25] ศึกษาการอบแห้งโหระพา โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่การพัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งมีการติดครีบบรรยากาศร้อนเยี่ยงทำมุมกับทิศทางการไหลของอากาศ (30 45 60 °) พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ติดครีบบรรยากาศร้อน 30 ° จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด แล้วนำตัวเก็บรังสีนี้มาทำการทดลองอบแห้งใบโหระพาที่อัตราการไหลเชิงมวลที่แตกต่างกัน พบว่า ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุด 42% สำหรับอัตราการไหล 0.012 kg/s 51% สำหรับอัตราการไหล 0.026 kg/s และ 63% สำหรับอัตราการไหล 0.033 kg/s หรือการเพิ่มประสิทธิภาพทางพลังงาน โดยติดตั้งตัวกักเก็บความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน ซึ่งมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อน ซึ่ง Rabha D.K. and P. Muthukumar [8] ทำการศึกษาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนร่วมกับหน่วยเก็บความร้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ซีฟิ่งพาราฟิน เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ double-pass สองตัว ตัวกักเก็บความร้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้พาราฟิน พัดลมและห้องอบแห้ง เครื่องอบแห้งได้รับการทดสอบด้วยการอบแห้งพริกแดง 20 kg ในช่วงอุณหภูมิอากาศแห้ง 36-60 °C ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยร้อยละ 73.5 (w.b.) และลดลงเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 9.7 (w.b.) เป็นเวลา 4 วัน ติดต่อกัน พบว่า ประสิทธิภาพด้านพลังงานเฉลี่ยของตัวเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชุดแรกเท่ากับ 32.4% ส่วนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชุดที่สองเท่ากับ 14.1% ประสิทธิภาพด้านพลังงานของหน่วยเก็บความร้อนแบบแฝงอยู่ในช่วง 43.6-49.8% ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอบแห้งมีค่าเท่ากับ 6.8 kW-h/kg_{moisture} และ 10.8% ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การใช้หน่วยเก็บความร้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ซีฟิ่งพาราฟินร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และช่วยลดการผันผวนของอุณหภูมิอากาศอบแห้งในช่วงแสงแดดน้อย

นอกจากนี้ยังมีวิธีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ ทำให้ระบบอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น aktas M. [9] ทำการอบแห้งเมลอนด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด และมีการนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับคืนมาใช้โดยอาศัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °C และความเร็วลม 0.5 m/s พบว่า การนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับคืนมาใช้สามารถเพิ่มพลังงานในการอบแห้ง 23-28% ของพลังงานที่ใช้อบแห้งทั้งหมด

สำหรับแหล่งพลังงานเสริมที่น่าสนใจที่สามารถนำมาพร้อมกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อให้ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสูงขึ้น คือ ป้อนความร้อน รังสีอินฟราเรด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาแหล่งพลังงานสองแหล่งนี้เพื่อมาใช้ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีงานวิจัยที่เปรียบเทียบการอบแห้งด้วยป้อนความร้อนกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดย aktas M. [5] พัฒนาเครื่องอบแห้งแบบป้อนความร้อน (HPD) และเครื่องอบแห้งอินฟราเรด (IRD) นอกจากนี้เปรียบเทียบซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี และวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ การอบแห้งขนมปังหน้า 15 mm สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบป้อนความร้อน ($COP_{ws, HP}$) ที่คำนวณได้เป็น 3.7 และประสิทธิภาพการอบแห้งของ IRD และ HPD เท่ากับ 39% และ 25% ตามลำดับ เมื่อนำระบบ IRD และ HPD มาเปรียบเทียบในแง่ของเวลาการอบแห้งและการใช้พลังงาน พบว่าระบบ IRD ไม่เพียงแต่ทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลงถึง 69% แต่ยังลดลงการใช้พลังงานของระบบลง 43.2% ดังนั้นแหล่งพลังงานเสริมที่เหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ คือ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มีงานวิจัยที่รายงานผลปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดย Younis M. [43] ศึกษาการอบแห้งกระเทียมด้วยรังสีอินฟราเรด (IR) ที่ความเข้มรังสี 0.075 0.15 0.225 และ 0.3 W/cm² ความเร็วของอากาศอบแห้ง 0.75 และ 1.25 m/s ผลการวิจัยพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งและการลดลงของเวลาการอบแห้ง เป็นผลมาจากการลดความเร็วของอากาศอบแห้ง และความเข้มรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้น ส่วนพลังงานกระตุ้น (activation energy : E_a) โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มรังสีอินฟราเรดลดลงและความเร็วการของอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีการติดตั้งครีบบระบายความร้อนร้อนที่มุมเอียง 30 องศา ติดตั้งหน่วยเก็บความร้อนแบบเปลือกและท่อโดยใช้ขี้ผึ้งพาราฟิน และมีการนำความร้อนทั้งจากการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ที่มนุษย์พยายามคิดค้นและพัฒนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง และลดความเสียหายในการตากแห้งโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะพัฒนาโดยการนำมาใช้ร่วมกับแหล่งพลังงานอื่น หรือพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งโพลี ซึ่งมีการนำเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มาร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นและพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ นอกจากนั้นแล้วยังได้มีการแก้ไขปัญหาความไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยมีการติดตั้งระบบกักเก็บความร้อน และมีการนำความร้อนทิ้งจากการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนในการศึกษาดังนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือเก็บข้อมูล

1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar power meter รุ่น TES-1333R Accuracy: Typically within $\pm 10 \text{ W/m}^2$)
3. เครื่องวัดความเร็วลมแบบ Hotwire (anemometer รุ่น TESTO 425 Accuracy: $\pm 0.03 \text{ m/s} + 5\% \text{ of m.v.}$)
4. เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data logger รุ่น Agilent 34970A)
5. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (Fluke 1735 Three-Phase Power Quality Logger Operating error: $\pm 1.5 \% \text{ of m.v.} + \text{F variation error}^* + 20 \text{ digit}$)
6. เครื่องวัดค่าสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunterlab รุ่น ColorFlex EZ 45-0 (LAV)
7. สายเทอร์โมคัปเปิ้ล ยี่ห้อ JEDTO รุ่น KTP-03G (Thermocouple Type K วัดอุณหภูมิได้สูงสุด $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Accuracy: $\pm 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

8. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ OHAUS รุ่น PA2102C (precision of 0.01 g) และ รุ่น PA413 (precision of 0.001 g)
9. เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF110 (ช่วงการทำความร้อน ตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง +10 °C ถึง +300 °C)
10. ครอบอะลูมิเนียม 5 ครอบ (Moisture Can เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm สูง 40 mm)

วัสดุอุปกรณ์สำหรับสร้างเครื่องอบแห้ง

1. เหล็กกล่องขนาด 1x1 inch
2. เหล็กฉากขนาด 1x1 inch
3. ฉนวนยางดำหนา 10 mm และฉนวนใยแก้ว
4. แผ่นอะลูมิเนียม และอะลูมิเนียมฟอยล์
5. พัดลมกระแสตรงขนาด 12 V
6. แผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดโปร่งแสง หนา 6 mm
7. เซลล์แสงอาทิตย์
8. สังกะสีแผ่นเรียบ
9. หลอดอินฟราเรดเซรามิกส์แบบแผ่น ขนาด 500 1,000 และ 1,500 W
10. พาราฟิน (Paraffin)

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

ในการออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีข้อกำหนดและเงื่อนไขในการออกแบบ ดังนี้

- ปริมาณโพลีที่ใช้อบแห้ง 100 g [7]
- ความเข้มรังสีอาทิตย์มาตรฐาน 1,000 W/m² [44]
- ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 25% [45]
- โพลีเป็นแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.4 cm หนาประมาณ 2.0 mm
- มวลของโพลีเท่ากันทุกชิ้น คือ 2.5 g
- ความชื้นเริ่มต้นของโพลีประมาณ 395% (d.b) [1]
- ความชื้นสุดท้ายของโพลีประมาณ 13% (d.b) [1]
- ความเร็วของอากาศอบแห้ง ประมาณ 0.05 m/s [46]

- อุณหภูมิเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 30 และ 60 °C

3.2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

จากข้อกำหนดและเงื่อนไขข้างต้นสามารถนำมาออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

1. การคำนวณหาความเร็วของอากาศอบแห้งภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากเงื่อนไขการออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถคำนวณหาขนาดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับอบแห้งไพล 100 g ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 395% (d.b) จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 13% (d.b) ได้ดังนี้

- การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

การคำนวณหามวลแห้งของกระชายดำสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) โดยแทนค่าความชื้นเริ่มต้น (M_d) เท่ากับ 3.95 และมวลเริ่มต้นเท่ากับ (w) เท่ากับ 100 g จะสามารถหามวลแห้ง (d) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 3.95 &= \frac{100-d}{d} \\ d &= \frac{100}{4.95} \\ &= 20.2 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น มวลแห้งของไพล (d) เท่ากับ 20.2 g

ถ้าต้องการอบแห้งไพลจนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 13% (d.b) จะสามารถหามวลสุดท้ายของชิ้นไพลได้โดยการแทนค่าความชื้นสุดท้าย (M_d) เท่ากับ 0.13 และมวลแห้ง (d) เท่ากับ 20.2 g ลงในสมการ (2) จะได้

$$\begin{aligned} 0.13 &= \frac{w-20.2}{20.2} \\ w &= 20.2 \times 1.13 \\ &= 22.83 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้น มวลสุดท้ายของไพล (w) เท่ากับ 22.83 กรัม ซึ่งจะต้องระเหยน้ำออกจากไพลทั้งหมด $100 - 22.83 = 77.17 \text{ g}$

นั่นคือ ถ้าต้องการอบแห้งไพลจำนวน 100 g จากความชื้นเริ่มต้น 395% (d.b) จนกระทั่งเหลือ 13% (d.b) จะต้องระเหยน้ำออก 77.17 g

สามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้จากสมการสมดุลพลังงาน

$$m_a c_p (T_i - T_o) = m_w h_{fg} \quad (33)$$

โดยที่ m_a = มวลอากาศแห้ง, kg
 c_p = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศเท่ากับ 1 kJ/kg-K
 T_i = อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง, °C
 T_o = อุณหภูมิที่ออกจากห้องอบแห้ง, °C
 m_w = มวลน้ำหรือปริมาณน้ำที่ระเหย, kg
 h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ = 2,257 kJ/kg

สมมติให้อากาศอบแห้งมีอุณหภูมิ 60 °C และอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งเท่ากับ 54 °C จะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้ดังนี้

$$m_a = \frac{m_w h_{fg}}{c_p (T_{mix} - T_o)} = \frac{0.077 \times 2,257}{1 \times (60 - 54)}$$

$$= \frac{173.79}{6} = 28.96 \text{ kg}$$

ดังนั้น มวลอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 28.96 kg

ถ้าต้องการอบแห้งให้เสร็จภายใน 4 ชั่วโมง จะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลได้ ดังนี้

$$\dot{m}_a = \frac{28.96}{4 \times 3,600} = 0.002 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

สำหรับงานวิจัยนี้มีการกำหนดให้ทุกจุดภายในเครื่องอบแห้งที่อากาศอบแห้งไหลผ่านมีอัตราการไหลของอากาศอบแห้งมีค่าเท่ากัน เพื่อความสะดวกในการออกแบบเครื่องอบแห้ง ดังนั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งกำหนดให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความกว้าง 1 m และสูง 0.15 m ทำให้มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.15 m² จะสามารถเปลี่ยนหน่วยอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอบแห้ง (kg/s) เป็นหน่วยของความเร็วน้ำ (m/s) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{m} = \rho A v \quad (34)$$

แทนค่าพื้นที่หน้าตัดตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 0.15 m^2 อัตราการไหลอากาศอบแห้ง เท่ากับ 0.002 kg/s และความหนาแน่นของอากาศ เท่ากับ 1.1 kg/m^3 จะสามารถคำนวณหาความเร็วของอากาศอบแห้ง ได้ดังนี้

$$v = \frac{0.002}{1.1 \times 0.15} = 0.012 \text{ m/s}$$

ดังนั้นความเร็วของอากาศอบแห้งจึงควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.012 m/s ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง 12 V ซึ่งทำให้ความเร็วอากาศอบแห้งมีค่าประมาณ 0.05 m/s

2. คำนวณพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากการเลือกใช้พัดลมไฟฟ้ากระแสตรง 12 V ซึ่งทำให้ความเร็วของอากาศอบแห้งมีค่าประมาณ 0.05 m/s และพื้นที่หน้าตัดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เท่ากับ 0.15 m^2 สามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho A v \\ \dot{m} &= \left(1.1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0.15 \text{ m}^2)(0.05) \\ \dot{m} &= 0.00825 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\end{aligned}$$

สำหรับการคำนวณหาพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะสามารถได้จากสมการต่อไปนี้

$$A_c = \frac{\dot{m} c_p (T_{\text{out } c} - T_{\text{in } c})}{\eta_c I} \quad (35)$$

เมื่อแทนค่าอัตราการไหลเชิงมวลและค่าจากข้อกำหนดและเงื่อนไขในการออกแบบ จะสามารถคำนวณหาพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}A_c &= \frac{(0.00825 \text{ kg/s})(1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C})(60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})}{(0.25)\left(1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)} \\ A_c &= 0.99 \text{ m}^2 \text{ หรือประมาณ } 1 \text{ m}^2\end{aligned}$$

ดังนั้นพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 1 m^2 แต่สำหรับงานวิจัยนี้มีการติดตั้งตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งสามารถกักเก็บความร้อนเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต้องเพียงพอสำหรับสะสมในตัวกักเก็บความร้อนและอบแห้งผลิตภัณฑ์ ทำให้พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำเป็นต้องมีขนาดเป็นสองเท่า ดังนั้นตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์จึงมีเท่ากับ 2 m^2 และเนื่องจากการกำหนดความกว้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไว้แล้ว 1 m ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความยาว 2 m

3. สร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากการคำนวณได้พื้นที่ของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์มีขนาดเท่ากับ 2.00 m^2 โดยมีความกว้าง 1.00 m ยาว 2.00 m สูง 0.15 m ด้านข้างและด้านล่างถูกปิดด้วยสังกะสีแผ่นเรียบและหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนหนา 0.006 m เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1



ภาพประกอบ 3.1 หุ้มฉนวนกันความร้อนตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์

ด้านบนตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดโปร่งแสงหนา 0.004 m ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเอียงทำมุม 15 องศา กับแนวราบ [47] และติดตั้งขาตั้งดังแสดงภาพประกอบ 3.2

พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นตัวดูดซับรังสีอาทิตย์จะปูด้วยแผ่นอะลูมิเนียมอีกชั้น และติดตั้งครีบบระบายความร้อนซึ่งทำจากอะลูมิเนียมสูง 0.05 m ยาว 0.12 m จำนวน 48 ครีบ เอียงทำมุม 30 องศา กับทิศทางการไหลของอากาศอบแห้ง [25] เพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิตความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับใช้ในการอบแห้งดังแสดงในภาพประกอบ 3.3



ภาพประกอบ 3.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเอียงทำมุม 15 องศา กับแนวราบ



ภาพประกอบ 3.3 การติดตั้งครีบบายความร้อน

ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำด้วยสีดำด้านเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์
 ดังแสดงในภาพประกอบ 3.4



ภาพประกอบ 3.4 รังสีอาทิตย์ทำด้วยสีดำด้าน

4. การออกแบบ สร้างห้องอบแห้งและติดตั้งหลอดอินฟราเรด

จากข้อกำหนดและเงื่อนไขในการออกแบบ เมื่อนำมาคำนวณหาขนาดห้องอบแห้งที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า สำหรับวางชั้นโพลมวล 100 g ความชื้นเริ่มต้น 395% (d.b) สามารถคำนวณหาพื้นที่ของถาดอบแห้งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จำนวนชั้นโพล} &= \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมดของโพลที่ใช้อบแห้ง}}{\text{น้ำหนักของโพลหนึ่งชั้น}} \quad (36) \\ &= 100/2.5 = 40 \text{ ชั้น} \end{aligned}$$

ดังนั้นจำนวนชั้นโพลที่ใช้ในแต่ละการทดลอง จะใช้ 40 ชั้น

ชั้นโพลมีลักษณะเป็นวงกลมเท่ากันทุกชั้น โดยโพลหนึ่งชั้นมีขนาด $3.14 \times 1.2^2 = 4.52 \text{ cm}^2$ จะสามารถหาพื้นที่ของถาดอบแห้งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ขนาดถาดอบแห้ง} &= \text{จำนวนชั้นโพลที่ใช้ในแต่ละการทดลอง} \times \text{พื้นที่ของโพลหนึ่งชั้น} \quad (37) \\ &= 40 \times 4.52 = 180.8 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

ในการออกแบบห้องพิจารณาการวางชิ้นโพลีไมล์ให้ชิดกันจนเกินไปเนื่องจากต้องการให้อากาศร้อนสัมผัสกับผิวชิ้นโพลีไมล์ให้มากที่สุด ดังนั้นพื้นที่ของถาดอบแห้งควรมีขนาดที่มากกว่าที่คำนวณได้เล็กน้อย จึงเลือกขนาดพื้นที่ถาดอบแห้ง เท่ากับ 200 cm^2 โดยกำหนดให้ถาดมีความกว้าง 10 cm ยาว 20 cm

เมื่อทราบพื้นที่ของถาดอบแห้งแล้ว สามารถกำหนดปริมาตรห้องอบแห้งได้ โดยกำหนดให้มีขนาดกว้าง 30 cm ยาว 40 cm สูง 30 cm ผนังด้านบน ด้านล่างและด้านข้างของห้องอบแห้งจะปิดด้วยสังกะสีแผ่นเรียบดังภาพประกอบ 3.5



ภาพประกอบ 3.5 ห้องอบแห้ง

ห้องอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ภายในห้องอบแห้งจะถูกบุด้วยอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้น เพื่อสะท้อนรังสีอินฟราเรดให้กระทบกับชิ้นโพลีไมล์ ด้านบนของห้องอบแห้งจะติดตั้งหลอดอินฟราเรดพร้อมโคมสะท้อนรังสีอินฟราเรด สำหรับเป็นแหล่งให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด และด้านล่างของห้องอบแห้งมีการเจาะรูสำหรับติดตั้งขาของถาดอบแห้ง ดังภาพแสดงในประกอบ 3.6



ภาพประกอบ 3.6 การติดตั้งโคม หลอดอินฟราเรด ถาดอบแห้งพร้อม خارองถาดอบแห้ง

5. การออกแบบและสร้างระบบกักเก็บความร้อน

ตัวกักเก็บความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยแก้ไขปัญหของความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถกักเก็บความร้อนจากแสงอาทิตย์และจ่ายให้กับระบบอบแห้งในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ซึ่งตัวกักเก็บความร้อนในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell and tube heat exchanger) โดยใช้พาราฟินเป็นวัสดุกักเก็บความร้อน ซึ่งขั้นตอนการออกแบบและสร้างสามารถแบ่งได้ดังนี้

- คำนวณหามวลของพาราฟิน

คำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำจากซินไพล ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = mL \quad (38)$$

แทนค่ามวลของน้ำที่ต้องการระเหยออกจากซินไพล

$$= 0.077 \times 2,257$$

$$= 173.79 \text{ kJ}$$

ดังนั้นความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากซินไพลมีค่าเท่ากับ 173.79 kJ

คำนวณหามวลของพาราฟินได้จากพลังงานที่กักเก็บในพาราฟิน จากสมการ
ดังต่อไปนี้

$$Q = mc_p\Delta T + mh_{fg} \quad (39)$$

โดยพาราฟินมีคุณสมบัติดังนี้

1. จุดเดือด 58-60 °C
2. ความหนาแน่น 0.9 g/cm³
3. ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย 145-240 J/g
4. ความจุความร้อน 2.14–2.9 J/g-K

ดังนั้นสามารถคำนวณหามวลของพาราฟินได้จากสมการพลังงานดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} 173.79 \times 1000 &= m \times 2.14 \times (60 - 35) + m \times 145 \\ &= m (53.5 + 198.5) \end{aligned}$$

$$m = \frac{173.79}{252}$$

ดังนั้นต้องใช้พาราฟิน 689.64 g หรือประมาณ 700 g

- คำนวณหาปริมาตรของตัวกักเก็บความร้อน

การคำนวณหาปริมาตรของตัวกักเก็บความร้อน สามารถคำนวณมาจากมวลของพาราฟิน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (40)$$

$$V = \frac{700 \text{ g}}{0.9 \text{ g/cm}^3}$$

$$V = 777.78$$

ในการออกแบบจำเป็นต้องให้ค่าเผื่อการออกแบบ 25 % ดังนั้นจะได้ปริมาตรตัวกักเก็บความร้อน ดังนี้

$$777.78 + (777.78 \times 0.25) = 777.78 + 233.33 = 972.23 \text{ cm}^3 \text{ ประมาณ } 1,000 \text{ cm}^3$$

ดังนั้นปริมาตรของตัวกักเก็บความร้อนเท่ากับ 1,000 cm³

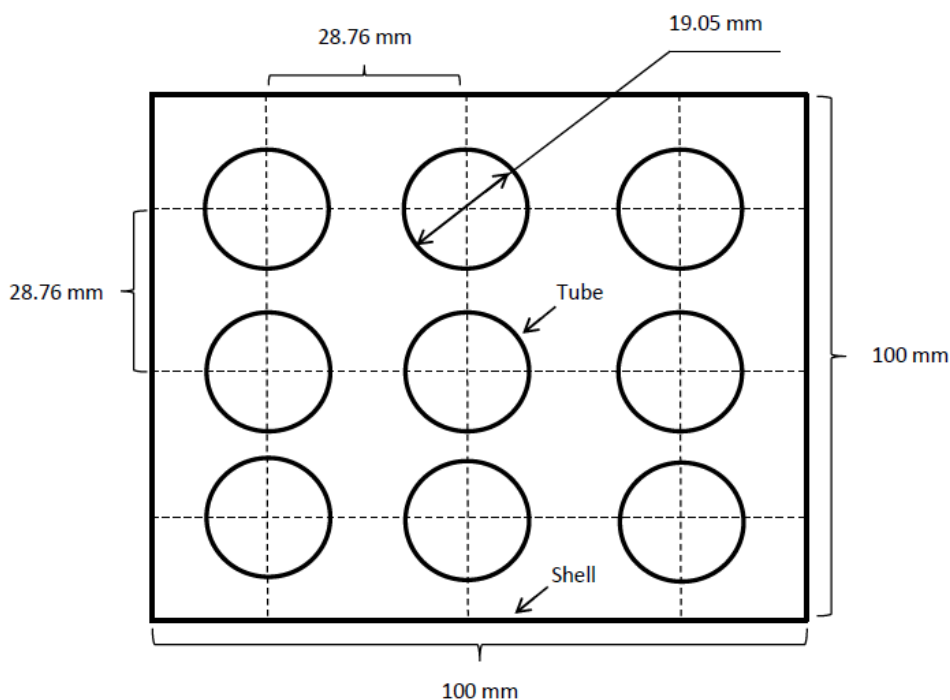
คำนวณหาปริมาตรของท่อนำความร้อน ซึ่งท่อนำความร้อนนี้เป็นท่อที่ถูกติดตั้งภายในตัวกักเก็บความร้อนเพื่อเป็นช่องทางผ่านของอากาศอบแห้งก่อนเข้าห้องอบแห้ง (ณ. บริเวณนี้ จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศอบแห้งกับวัสดุกักเก็บความร้อน) โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ท่อทองแดงซึ่งมีคุณสมบัติในการนำความร้อนได้ดี โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 cm ยาว 14 cm ดังนั้นปริมาตรของนำความร้อน 9 ท่อ จะได้

$$= 9 \times 14 \times 3.14 \times 1^2$$

$$= 395.64 \text{ cm}^3 \text{ ประมาณ } 400 \text{ cm}^3$$

ดังนั้น ตัวกักเก็บความร้อนมีปริมาตรเท่ากับ $1,400 + 4,000 = 1,400 \text{ cm}^3$

เมื่อนำปริมาตรของตัวกักเก็บความร้อนมาคำนวณหาพื้นที่หน้าตัด โดยได้กำหนดให้ตัวกักเก็บความร้อนมีความยาวเท่ากับท่อนำความร้อนซึ่งยาว 14 cm จะได้พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ $10 \times 10 = 100 \text{ cm}^2$ โดยพื้นที่หน้าตัดของตัวเก็บกักเก็บความร้อนจะแสดงในภาพประกอบ 3.7



ภาพประกอบ 3.7 ระบบกักเก็บความร้อน [8]

- สร้างตัวกักเก็บความร้อนจากเหล็กกล่องซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ $10 \times 10 \times 14 \text{ cm}^3$ และใช้ท่อทองแดงเป็นท่อนำความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 3.8 และนำท่อนำความร้อนมาเชื่อมต่อกัน จะได้ดังภาพประกอบ 3.9



ภาพประกอบ 3.8 ท่อบรรจุพาราฟิน และท่ออากาศร้อน



ภาพประกอบ 3.9 การเชื่อมต่อท่ออากาศร้อน

นำตัวกักเก็บความร้อน และท่ออากาศร้อน มาเชื่อมต่อกันและเจาะรูสำหรับใส่ พาราฟินจะได้ตัวกักเก็บความร้อน ดังแสดงในภาพประกอบ 3.10



ภาพประกอบ 3.10 ตัวกักเก็บความร้อน

6. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่ติดตั้งระบบกักเก็บความร้อนและระบบนำความร้อนทั้งกับมาใช้ใหม่ ซึ่งมีขั้นตอนในการประกอบ ดังนี้

- ประกอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตัวเก็บความร้อนด้วยขี้ผึ้งพาราฟิน และห้องอบแห้ง เข้าด้วยกันและต่อท่อนำอากาศอบแห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.11



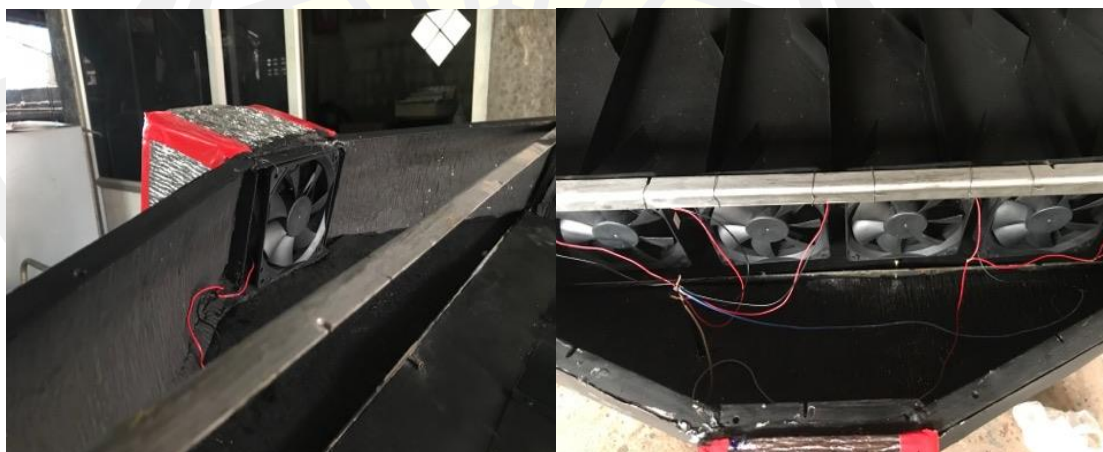
ภาพประกอบ 3.11 การประกอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

- ติดตั้งระบบนำความร้อนกลับคืนมาใช้ โดยนำความร้อนทิ้งที่ปล่อยออกมาจากห้องอบแห้งไพลเวียนกลับคืนมาใช้สัดส่วน 70% เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศอบแห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.12



ภาพประกอบ 3.12 ระบบนำความร้อนกลับคืนมาใช้ใหม่สัดส่วน 70%

- สำหรับการพาความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้งจะเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งมีการติดตั้งพัดลมไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V จำนวน 6 ตัว ไว้ทางเข้าอากาศอบแห้งของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และทางออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1 ตัว เพื่อพาความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังห้องอบแห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 3.13 โดยแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับพัดลมจะอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 17.5 V 40 W และแบตเตอรี่ 12 V



ภาพประกอบ 3.13 การติดตั้งพัดลมไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V

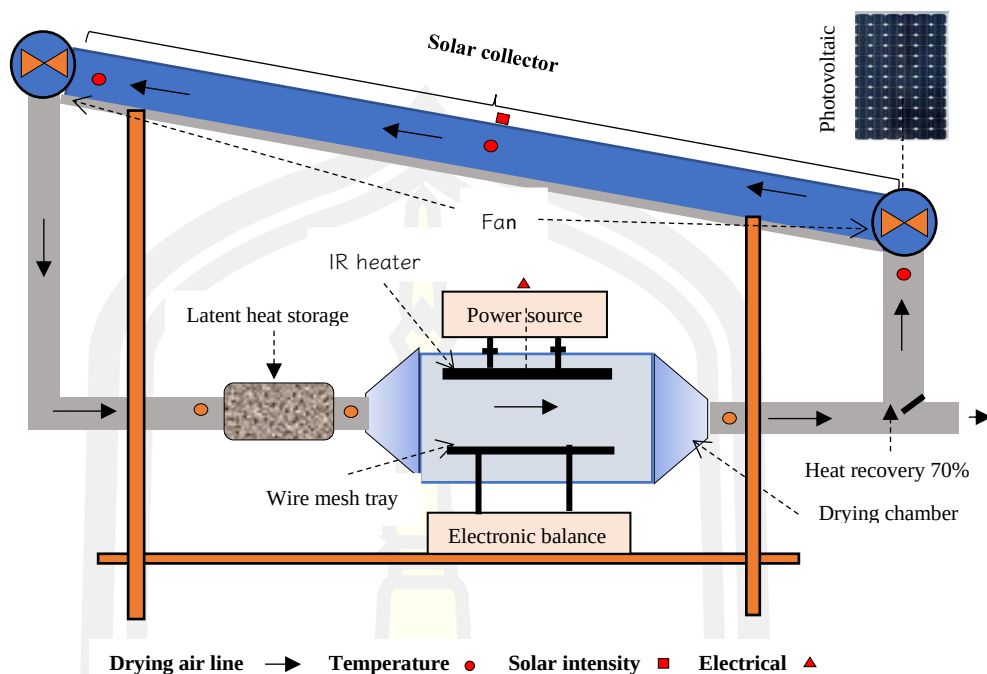
- ทำการหุ้มฉนวนกันความร้อนท่อนำอากาศอบแห้ง ตัวกักเก็บความร้อน และ ด้านบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะถูกปิดด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดโปร่งแสง จะได้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล ดังแสดงในภาพประกอบ 3.14



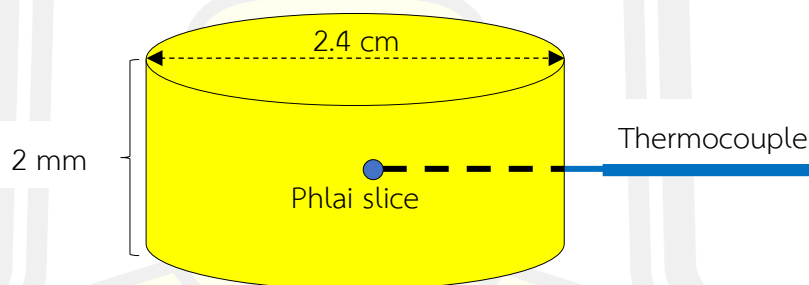
ภาพประกอบ 3.14 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งไพล

3.3 การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

1. เตรียมไพลสำหรับอบแห้ง โดยนำเหง้าล้างน้ำให้สะอาดและหั่นเป็นแว่นหนาประมาณ 2.0 mm จำนวน 100 g
2. ทำการอบแห้งโดยใช้หลอดอินฟราเรดขนาด 500 W ที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล 50 60 และ 70 °C จนไพลมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 13% (d.b) และขณะอบแห้งบันทึกค่ามวลที่เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 15 นาที
3. วัดอุณหภูมิอากาศอบแห้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเครื่องอบแห้ง และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล วัดความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนระนาบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ วัดพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหลอดรังสีอินฟราเรด ซึ่งตำแหน่งวัดค่าต่าง ๆ จะแสดงดังภาพประกอบ 3.15 และบันทึกผลทุก ๆ 15 นาที
4. สำหรับการวัดอุณหภูมิภายในชั้นไพล จะทำการเสียบเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้าไปภายในชั้นไพลดังแสดงในภาพประกอบ 3.16
5. วัดอัตราการไหลของอากาศภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์



ภาพประกอบ 3.15 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ ความเข้มรังสีอาทิตย์ พลังงานไฟฟ้า และการซังมวลของไหล



ภาพประกอบ 3.16 ลักษณะการวัดอุณหภูมิภายในชิ้นไหล

6. ทำการอบแห้งไหลตั้งแต่ 9.00–17.00 น. ของทุกวันทำการทดลอง
7. หลังการทดลอง เก็บรักษาชิ้นไหลไว้ในถุงซิปล็อคและดูอากาศออกจากถุง แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 4 °C เพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์หาความชื้นสุดท้ายและคุณภาพด้านสี
8. ทำการทดลองข้อ 1-8 ซ้ำ 3 ครั้ง
9. ทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนขนาดหลอดอินฟราเรดเป็น 1,000 และ 1,500 W

3.4 การศึกษาประสิทธิภาพ

รวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จากสมการ (5) การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะจากสมการ (6) และอัตราการอบแห้งจากสมการ (7)

3.5 จลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

1. นำค่าของมวลไพลที่เปลี่ยนแปลง มาคำนวณเพื่อหาค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเวลาการอบแห้ง

2. นำค่าความชื้นมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้ง

3. นำอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการอบแห้งไพล มาสร้างสมการที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งไพลผ่านรูปแบบสมการอบแห้งต่างๆ โดยใช้รูปแบบสมการ 13 สมการดังนี้

- Semi
- Henderson and pabis
- Modified Henderson and Pabis
- Logarithmic
- Two term
- Two term exponential
- Page
- Modified Page I
- Modified Page II
- Diffusion approximation
- Wang and Singh
- Midilli et al.
- Verma et al.

4. ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (Coefficient of determination: R^2) ไควสแควร์ (Chi-square : χ^2) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถในการทำนายของการ

3.6 คุณภาพด้านสีของโพล

ทำการวัดสีผิวหน้าของขึ้นโพล ซึ่งในแต่ละสภาวะการอบแห้งทำการวัดซ้ำ 10 ครั้ง โดยการกำหนดมาตรฐานชั้นสีในปัจจุบันนิยมใช้ระบบ CIE 1976 L* a* b (CIELAB) ซึ่งเป็นการกำหนดค่าโคออร์ดิเนตใน 3 มิติ ในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องวัดค่าสี (Spectrophotometer) รุ่น ColorFlex EZ แสดงค่า L, a, b ดังนี้

L ใช้กำหนดค่าความสว่างของเนื้อสี

L = 0 จะมองเห็นเป็นสีดำ

L = 100 จะมองเห็นเป็นสีขาว

(ค่าที่ทำให้มองเห็นเนื้อสีเด่นชัดจะเป็นค่ากลาง ๆ ประมาณ 50 – 60 ถ้าต่ำกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างไปทางสีดำมืด แต่ถ้าสูงกว่านี้เนื้อสีจะค่อนข้างสว่าง หรือจางลง)

a ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีแดงกับสีเขียว

ถ้า a มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีแดง

ถ้า a มีค่า – สีจะไปในทิศทางของสีเขียว

b ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีเหลืองกับสีน้ำเงิน

ถ้า b มีค่า + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง

ถ้า b มีค่า – สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

คำนวณหาค่าความแตกต่างสีรวม (ΔE^*) ค่าความเข้ม (C^*) และค่าบอกกลุ่มสี (h^*) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta E^* = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad (41)$$

$$C^* = [(a)^2 + (B)^2]^{1/2} \quad (42)$$

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (43)$$

3.7 วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{เงินสดลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ/เงินสดรับสุทธิรายเดือน} \quad (44)$$

3.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่ศึกษาในแต่ละเงื่อนไข โดยใช้วิธี
Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)



บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

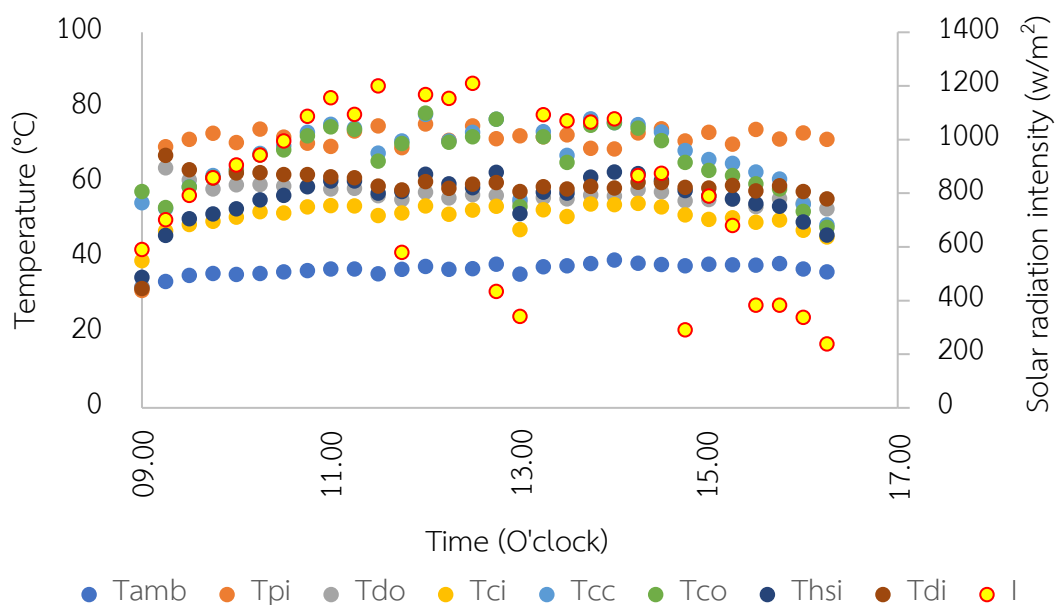
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด สำหรับอบแห้งไพล ทำการอบแห้งตั้งแต่เวลา 9.00-17.00 น. ของทุกวันการทดลอง (ทำการทดลอง ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2562-พฤษภาคม 2563) อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล 50 60 และ 70 °C กำลังอินฟราเรดขนาด 500 1,000 และ 1,500 W และศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง จลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของไพล และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลการวิจัยในแต่ละหัวข้อจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง สามารถพิจารณาได้จากอัตราการอบแห้ง (Drying rate ; DR) ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector efficiency ; η_{coll}) และ ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical energy consumption ; SEEC) ซึ่ง จำเป็นต้องมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ ความเข้มรังสีอาทิตย์ ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกมา ดังนั้นการศึกษา ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งจึงสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ และความเข้มรังสีอาทิตย์ ในแต่ละเวลาระหว่างการอบแห้ง

ในการทดลองได้เก็บข้อมูลของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเครื่องอบแห้งและ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละเวลาการอบแห้ง สำหรับนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้ง โดยจะยกตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ และความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละเวลาการอบแห้งของการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W เท่านั้น เพราะการอบแห้งที่สภาวะอื่น ๆ จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งสามารถแสดง ในภาพประกอบ 4.1 ส่วนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ และความเข้มรังสีอาทิตย์ในแต่ละเวลาการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งอื่น ๆ แสดงในภาคผนวก ข



ภาพประกอบ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ ความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไฟล 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W

โดยที่

- T_{amb} คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (°C)
 T_{pi} คือ อุณหภูมิภายในชั้นไฟล (°C)
 T_{do} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากห้องอบแห้ง (°C)
 T_{ci} คือ อุณหภูมิของอากาศเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
 T_{cc} คือ อุณหภูมิของอากาศตรงกลางตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
 T_{co} คือ อุณหภูมิของอากาศออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
 T_{hsi} คือ อุณหภูมิของอากาศเข้าตัวสะสมความร้อน (°C)
 T_{di} คือ อุณหภูมิของอากาศเข้าห้องอบแห้ง (°C)
 I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m²)

จากการเก็บข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลาการอบแห้ง แล้วนำมาเขียนกราฟ แสดงให้เห็นว่า ความเข้มแสงอาทิตย์ (I) อยู่ระหว่าง 238-1,200 W/m² อุณหภูมิแวดล้อม (T_{amb}) มีค่าอยู่ระหว่าง 32-39 °C อุณหภูมิอากาศเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{ci}) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของอากาศจากห้องอบแห้งซึ่งเป็นการนำความร้อนจากการอบแห้งกลับคืน

มาใช้และจากอากาศแวดล้อมมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมทำให้อุณหภูมิขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{co}) มีค่าสูง ส่งผลให้หลอดอินฟราเรดใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง ในส่วนของอุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้ง (T_{di}) พบว่ามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิขาออกห้องอบแห้ง (T_{do}) เล็กน้อย เพราะว่าเมื่ออากาศอบแห้งเข้าไปสัมผัสกับชั้นโพลทำให้ความชื้นที่อยู่ภายในชั้นโพลถูกระเหยออกมากับอากาศอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิของอากาศอบแห้งลดลงเล็กน้อย และพบว่าสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพล 60 และ 70 °C จะมีอุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิภายในชั้นโพลที่กำหนดไว้ อาจเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์และผลของตัวกักเก็บความร้อน จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งความร้อนเสริม โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้หลอดรังสีอินฟราเรดซึ่งจะถูกควบคุมการทำงานด้วยอุณหภูมิภายในชั้นโพลเป็นแหล่งความร้อนเสริม เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในชั้นโพลตามที่ต้องการ โดยจะถูกติดตั้งไว้เหนือถาดอบแห้งภายในห้องอบแห้ง ในส่วนของอุณหภูมิขาเข้าตัวกักเก็บความร้อน (T_{hsi}) ซึ่งตลอดระยะเวลาการอบแห้งส่วนมากจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิขาออกตัวกักเก็บความร้อน (T_{di}) เนื่องจากตัวกักเก็บความร้อนมีการดึงพลังงานความร้อนไปเก็บสะสมไว้จึงส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศขาออกตัวกักเก็บความร้อนลดลง แสดงว่าการทำงานตัวกักเก็บความร้อนส่วนใหญ่จะเป็นการกักเก็บความร้อน (charging) แต่ในช่วงเวลาที่ระบบอบแห้งต้องการพลังงานความร้อนสำหรับอบแห้ง หรือความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าลดลง ความร้อนในตัวกักเก็บความร้อนก็จะถูกถ่ายเทออกมา (discharging) ช่วยให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งยังคงมีค่าสูง [8] ส่งผลทำให้หลอดอินฟราเรดใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ สำหรับสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพล 50 °C พบว่า ช่วงเวลาเริ่มแรกของการอบแห้ง อุณหภูมิภายในชั้นโพลจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ แต่เมื่อถึงช่วงบ่ายซึ่งความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูงทำให้อากาศขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงและพลังงานความร้อนที่สะสมในตัวกักเก็บความร้อนมีมากขึ้น ทำให้พาราฟินซึ่งเป็นวัสดุกักเก็บความร้อนที่บรรจุภายในตัวกักเก็บความร้อนหลอมละลายจนหมด จนไม่สามารถดึงความร้อนจากอากาศร้อนที่ได้รับมาจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาสะสมได้อีก ทำให้อุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ในช่วงเวลาอุณหภูมิภายในชั้นโพลมีค่ามากกว่า 50 °C ตามที่ได้กำหนดไว้เล็กน้อย (อุณหภูมิภายในชั้นโพลอยู่ในช่วง 50-55 °C)

4.1.2 การศึกษาระยะเวลา และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งโพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด อุณหภูมิภายในชั้นโพล 50 60 และ 70 °C กำลังอินฟราเรด 500 1,000 และ 1,500 W โดยโพลมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 395% (d.b) อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้าย 13% (d.b) ซึ่งเครื่องอบแห้งมีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นแหล่งผลิตอากาศร้อนสำหรับอบแห้งซึ่งไม่มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และยังมีการใช้ร่วมกับการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงาน ให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ระบบยังมีการแก้ปัญหาของความไม่สม่ำเสมอของพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งระบบกักเก็บความร้อน (heat storage) และมีการนำความร้อนทิ้งจากจากการอบแห้ง

กลับคืนมาใช้ (heat recovery) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบอบแห้ง ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง และลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรด โดยเมื่อทำการศึกษาระยะเวลาและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน จะได้ผลการศึกษาดังแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งไพล

conditions	Drying time (h)			Electrical Energy (kW-h)		
Infrared power (W)	500	1000	1500	500	1000	1500
Temperature (°C)						
50	17.00	15.75	13.50	0.581	0.564	0.150
60	16.00	13.75	9.50	1.105	0.708	0.650
70	12.25	10.75	7.25	1.156	1.012	0.880

จากตาราง 4.1 พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าอยู่ระหว่าง 7.25-17.00 ชั่วโมง และ 0.150-1.156 kW-h ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาระยะเวลาการอบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในขึ้นไพล 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด 7.25 ชั่วโมง ส่วนสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในขึ้นไพล 50 °C กำลังอินฟราเรด 500 W จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด 17.00 ชั่วโมง หรืออาจกล่าวได้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในขึ้นไพลสูง กำลังอินฟราเรดสูง จะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง [48] (ระยะเวลาในการอบแห้งแปรผกผันกับอุณหภูมิภายในขึ้นไพลและกำลังอินฟราเรด) ซึ่งระยะเวลาในการอบแห้งจะมีค่าขึ้นอยู่กับการแพร่ความร้อนโดยมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการอบแห้งและกำลังอินฟราเรด ซึ่งการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับการแพร่ความร้อนที่นิยมกันอย่างแพร่หลายจะใช้รูปแบบของสมการ Arrhenius [19] ดังแสดงในสมการ (45) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการแพร่ของความชื้นจากภายในออกมายังผิวภายนอกได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (45)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ปรากฏ (m^2/h)
 D_0 คือ อาร์เรเนียสแฟกเตอร์ (m^2/h)

E_a	คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (J/mol) ,
R	คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ (8.314 J/mol. K)
T	คือ อุณหภูมิ (K)

สำหรับอิทธิพลของรังสีอินฟราเรดที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เนื่องจากชั้นไพลมีน้ำเป็นองค์ประกอบทำให้สามารถดูดซับรังสีอินฟราเรดได้ดี พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีที่ตกกระทบชั้นไพลจะถูกดูดกลืนไว้และทำให้โมเลกุลของน้ำได้รับพลังงานและถูกกระตุ้นให้อยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการสั่นของพันธะ [49] และโมเลกุลมีการเคลื่อนที่มากขึ้น [50] และเกิดการชนกันของโมเลกุล มีแลกเปลี่ยนพลังงานซึ่งกันและกัน ทำให้แต่ละโมเลกุลมีพลังงานจลน์แตกต่างกันไป โดยโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงก็จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและระเหยกลายเป็นไอ [51] ส่วนโมเลกุลที่มีพลังงานจลน์น้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในรูปของเหลวซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูง (โมเลกุลมีการเคลื่อนที่มากขึ้นเนื่องจากผลของรังสีอินฟราเรด) ก็จะเกิดการแพร่ออกมายังผิวของชั้นไพล [52] จากนั้นจะถูกพาออกไปจากผิวด้วยลมร้อนที่สัมผัสกับชั้นไพล โดยการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดสูงขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำได้รับพลังงานมากขึ้น ทำให้ความชื้นเกิดการแพร่จากภายในออกมายังผิวภายนอกได้ดีกว่าการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดต่ำ ผลการวิจัยจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nafiye Adak et. al. (2017) ทำการอบแห้งสตเบอร์รี่ด้วยรังสีอินฟราเรด ที่กำลังอินฟราเรด 100 200 และ 300 W อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 80 และ 100 °C พบว่า เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งและกำลังอินฟราเรดสูงขึ้น จะมีผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง [48] สำหรับการศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W จะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด 0.150 kW-h ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C กำลังอินฟราเรด 500 W จะใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดเท่ากับ 1.156 kW-h ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถ้าสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพลสูงขึ้น จะส่งผลให้หลอดอินฟราเรดมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากหลอดอินฟราเรดซึ่งถูกควบคุมการทำงานด้วยอุณหภูมิภายในชั้นไพล ถ้ากำหนดอุณหภูมิภายในชั้นไพลสูงขึ้น จะส่งผลให้หลอดอินฟราเรดมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อให้อุณหภูมิภายในชั้นไพลมีค่าตามที่กำหนด ในทางตรงกันข้ามถ้าสภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดสูงขึ้น จะส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรดมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังอินฟราเรดสูงขึ้นจะทำให้หลอดอินฟราเรดมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง แต่กระบวนการอบแห้งใช้เวลาสั้นลง เป็นผลทำให้ตลอดกระบวนการอบแห้งหลอดอินฟราเรดจะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการอบแห้งที่ใช้กำลังอินฟราเรดต่ำ

4.1.3 ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดสำหรับอบแห้งโพลีที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน โดยจะพิจารณาจากอัตราการอบแห้ง (Drying rate ; DR) ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector efficiency ; η_{coll}) และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical energy consumption ; SEEC) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.2

ตาราง 4.2 สรุปค่าเฉลี่ยของ DR , η_{coll} และ SEEC

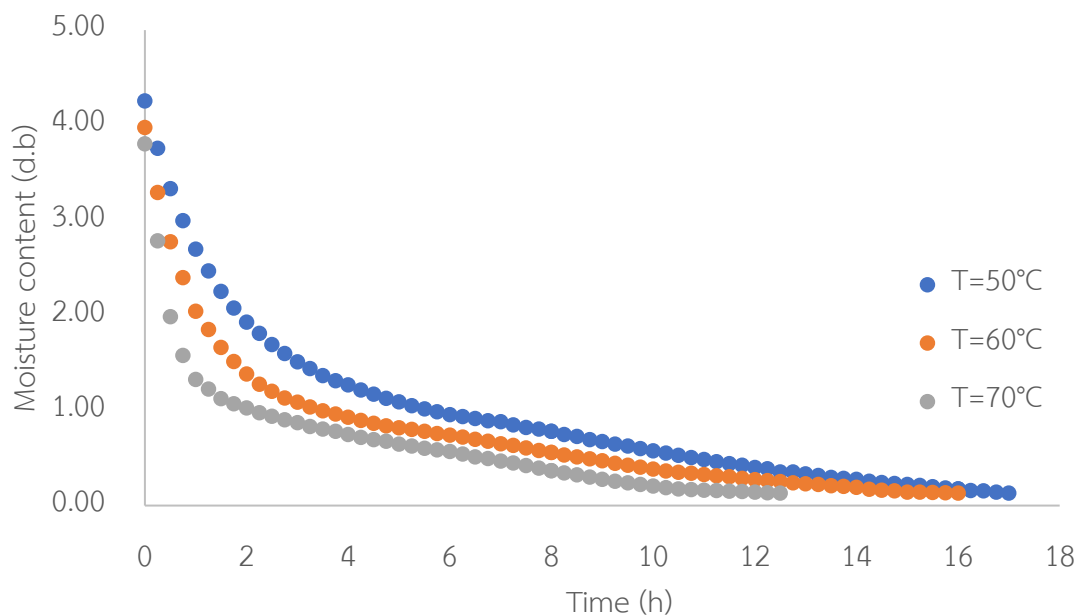
Infrared power (W)	Temperature (°C)	DR (kg _{water} /h)	η_{coll}	SEEC (kW-h/kg _{water})
500	50	0.0047	64.36	7.28
	60	0.0051	70.43	13.57
	70	0.0067	53.36	14.15
1,000	50	0.0049	80.18	7.36
	60	0.0061	83.69	8.54
	70	0.0077	56.98	12.16
1,500	50	0.0070	69.65	1.58
	60	0.0082	76.69	8.32
	70	0.0123	70.54	9.82

จากตาราง 4.2 พบว่า ค่า DR และ SEEC มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0047-0.0123 kg_{water}/h และ 1.58-14.15 kW-h/ kg_{water} โดยเมื่อพิจารณาค่า DR ในแต่ละสภาวะการอบแห้ง พบว่า ที่สภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพลี 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W จะมีค่า DR สูงที่สุด 0.0123 kg_{water}/h ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพลี 50 °C กำลังอินฟราเรด 500 W จะมีค่า DR ต่ำที่สุด 0.0047 kg_{water}/h ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่า DR แปรผันโดยตรงกับกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิภายในชั้นโพลี เมื่อพิจารณาค่า SEEC ในแต่ละสภาวะการทดลอง พบว่า ที่สภาวะการ

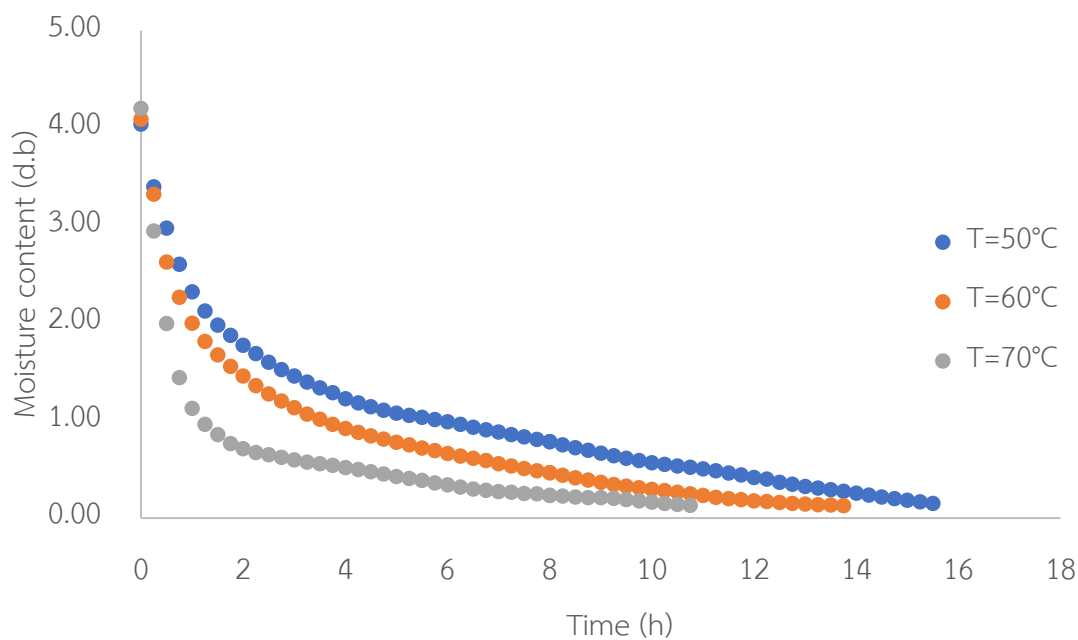
อบแห้งอุณหภูมิกายในชั้นไพล 50 °C กำลังอินฟราเรด 1,500 W จะมีค่า SEEC ต่ำที่สุด 1.58 kW-h/kg_{water} ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิกายในชั้นไพล 70 °C กำลังอินฟราเรด 500 W จะทำให้มีค่า SEEC สูงที่สุด 14.15 kW-h/kg_{water} ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่า SEEC แปรผันแบบผกผันกับกำลังอินฟราเรด และแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิกายในชั้นไพล ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amin Ziaforoughi and Javad Abolfazli Esfahani (2016) ซึ่งทำการอบแห้งมันฝรั่งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดแบบไม่ต่อเนื่อง ความหนาของชั้นมันฝรั่ง 3, 5 และ 7 mm อบแห้งที่อุณหภูมิกายในชั้นไพล 50, 60 and 70 °C กำลังอินฟราเรด 175 W พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิกายและความหนาของชั้นมันฝรั่งมากขึ้นจะมีค่า SEEC สูงขึ้น โดยสภาวะอบแห้งที่อุณหภูมิกาย 50 °C ความหนาชั้นมันฝรั่ง 3 mm จะมีค่า SEEC ต่ำที่สุด [7] สำหรับการพิจารณาค่า η_{coll} พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 53.36-83.69 % ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า η_{coll} จะขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้ง (อุณหภูมิกายและกำลังอินฟราเรด) และสภาวะแวดล้อม

4.2 จลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

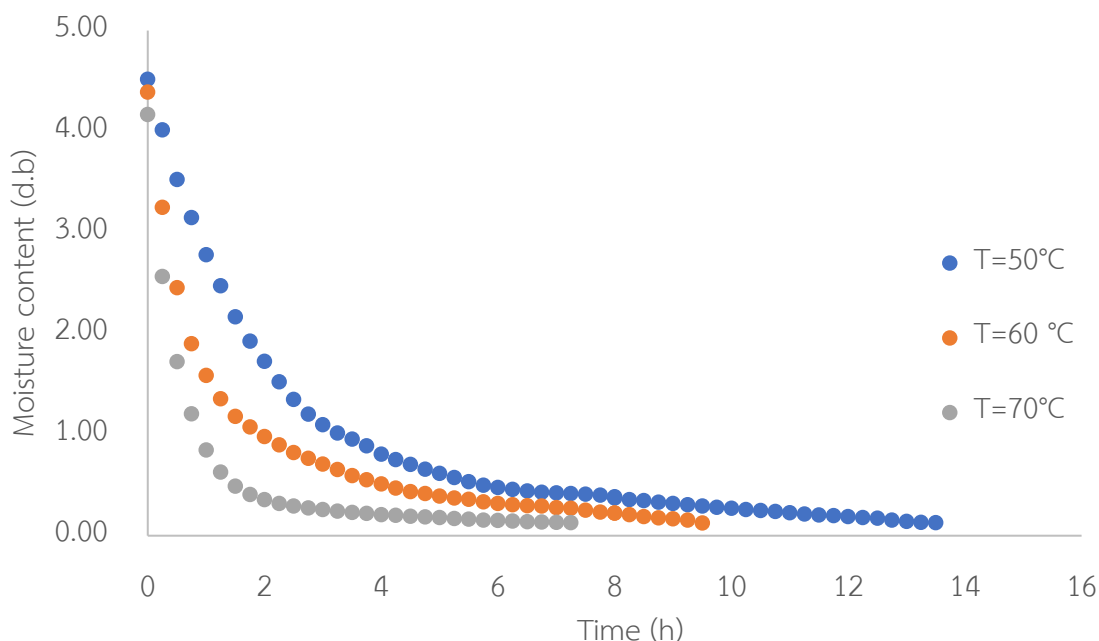
การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด อัตราส่วนของการนำความร้อนจากการอบแห้งกลับคืนมาใช้ 70% อบแห้งที่อุณหภูมิกายในชั้นไพล 50 60 และ 70 °C กำลังอินฟราเรดขนาด 500 1,000 และ 1,500 W ความชื้นเริ่มต้นของชั้นไพลประมาณ 395% (d.b) อบแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 13% (d.b) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไพลในแต่ละเวลาการอบแห้งแสดงดังภาพประกอบ 4.2-4.4



ภาพประกอบ 4.2 ความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 500 W
อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพลแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 4.3 ความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,000 W
อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นโพลแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 4.4 ความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งโดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,500 W
อบแห้งที่อุณหภูมิภายในชิ้นโพลแตกต่างกัน

จากภาพประกอบ 4.2-4.4 แสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งจะลดลงแบบ exponential โดยความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 2 ชั่วโมงแรกของการอบแห้ง ทำให้ในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งเส้นกราฟมีความชัน (Slope) มาก โดยเฉพาะสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชิ้นโพลสูงและกำลังหลอดอินฟราเรดสูงทำให้กราฟมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าความชื้นของกราฟแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิภายในชิ้นโพลและกำลังอินฟราเรด และเมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้นความชื้นจะค่อย ๆ ลดลง ความชื้นจะมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับช่วงเวลาเริ่มต้น สำหรับในช่วงท้ายของการอบแห้งความชื้นจะลดลงน้อยมากทำให้ความชันกราฟมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

4.2.1 การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสม

สำหรับการวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราการอบแห้งโพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิภายในชิ้นโพล 50 60 และ 70 °C กำลังอินฟราเรดขนาด 500 1,000 และ 1,500 W โดยในงานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบาง 13 สมการ ที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งเป็นสมการที่สร้างขึ้นจากแนวโน้มข้อมูลการทดลอง โดยสมการเหล่านี้จะพิจารณาการลดลงของความชื้นหรืออัตราการอบแห้งของวัสดุทั้งชิ้น และไม่สามารถหาการกระจายของความชื้นภายในวัสดุได้ แต่จะได้ภาพรวมของการลดลงของความชื้นของวัสดุทั้งชิ้น [15] ซึ่งในการ

วิเคราะห์จำเป็นต้องทราบค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา โดยสามารถคำนวณได้จากมวลของไพลที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา เมื่อทราบค่าความชื้นจะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (MR) ได้จากสมการ $MR = (M_t - M_e)/(M_i - M_e)$ แต่ในงานวิจัยนี้ค่าความชื้นสมดุล M_e มีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้น M_i มาก ๆ จึงประมาณค่าความชื้นสมดุล $M_e \cong 0$ ได้ ดังนั้นสมการคำนวณอัตราส่วนความชื้นสามารถลดรูปเป็น $MR = M_t/M_i$ [53] โดยข้อมูลของมวล ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลาระหว่างการอบแห้งจะแสดงในภาคผนวก ก จากนั้นนำอัตราส่วนความชื้นและเวลามาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression) เพื่อหาค่าคงที่ในสมการอบแห้งชิ้นบางของแต่ละสมการโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (IBM SPSS version 25) โดยจะยกตัวอย่างค่าคงที่ของสมการ Verma et. al. ที่สามารถทำนายได้เหมาะสมที่สุดเท่านั้น ดังแสดงในตาราง 4.3 สำหรับค่าคงที่ของสมการอบแห้งอื่น ๆ จะแสดงในตาราง ฉ-1-ฉ-3

ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการ Verma et al.

Equation	conditions		Drying Constant		
			a	k	g
Verma et al.	500 W	50°C	0.531	0.144	1.031
		60°C	0.419	0.145	1.314
		70°C	0.384	0.175	2.537
	1,000 W	50°C	0.549	0.140	1.492
		60°C	0.497	0.192	1.838
		70°C	0.774	2.131	0.170
	1,500 W	50°C	0.169	0.110	0.604
		60°C	0.329	0.246	1.843
		70°C	0.889	2.110	0.193

การวิเคราะห์ความสามารถของสมการในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า R^2 และ χ^2 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการในการทำนาย ซึ่งสมการที่สามารถทำนายได้ดีที่สุดจะต้องมีค่า R^2 มากที่สุดและให้ค่า χ^2 ต่ำที่สุด โดยผลการทำนายจะแสดงเฉพาะผลของสมการที่สามารถทำนายได้ดีที่สุด ดังแสดงในตาราง 4.4 สำหรับผลของสมการอบแห้งอื่น ๆ แสดงในตาราง ฉ-4 - ฉ-6

ตาราง 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2

Equation		R^2			χ^2		
		50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C
Verma et al.	500 W	0.99781	0.99831	0.99634	1.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}	1.2×10^{-4}
	1,000 W	0.99631	0.99915	0.99849	1.5×10^{-4}	3.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}
	1,500 W	0.99919	0.99944	0.99963	4.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
This study	500 W	0.99974	0.99978	0.99911	1.2×10^{-5}	8.4×10^{-6}	3.3×10^{-5}
	1,000 W	0.99881	0.99930	0.99898	4.8×10^{-5}	2.8×10^{-5}	3.5×10^{-5}
	1,500 W	0.99933	0.99951	0.99985	3.6×10^{-5}	2.2×10^{-5}	7.2×10^{-6}

จากการวิเคราะห์เพื่อหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายผลการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า สมการ Verma et al. ให้ผลทำนายได้ดีที่สุด ซึ่งให้ค่า R^2 สูงที่สุดและให้ค่า χ^2 ต่ำที่สุด โดยมีรูปแบบสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$MR = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-gt)} \quad (46)$$

จากการวิเคราะห์สมการ (46) ซึ่งเป็นสมการที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาในการอบแห้ง (t) พบว่า สมการประกอบไปด้วยฟังก์ชัน exponential สองพจน์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการนี้จะแบ่งความชื้นภายในชิ้นไพลออกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนมีค่าแตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่การอบแห้ง a, k และ g โดยผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นมาจากผลรวมการทำนายของสองพจน์ในสมการ เมื่อแยกวิเคราะห์ในแต่ละพจน์ของสมการ พบว่า ทุกสภาวะการอบแห้งจะให้ผลการทำนายของพจน์แรกของสมการมีส่วนผลการทำนายมากกว่าพจน์ที่สอง และมีความมากขึ้นเมื่อเวลาการอบแห้งมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนการทำนายของพจน์ที่สองมีค่าน้อยลงและมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาการอบแห้งมากขึ้น ยกเว้นสภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 และ 1,500 W อุณหภูมิภายในชิ้นไพล 70 °C จะให้สัดส่วนผลการทำนายของพจน์แรกลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของผลการทำนายของพจน์ที่สองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการอบแห้งมากขึ้น ซึ่งสามารถนำผลการวิเคราะห์นี้ไปเป็นแนวทางในการพัฒนาสมการอบแห้งได้ เมื่อพิจารณาผลการทำนายของสมการในแต่ละสภาวะการอบแห้งพบว่า สมการ Verma et al. ให้ผลการทำนายอยู่ในระดับ $R^2=0.99$ ทุกสภาวะการอบแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่

สภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W ของทุกอุณหภูมิภายในชั้นโพลจะให้ผลการทำนายอยู่ในระดับ $R^2=0.999$ และผลการทำนายของสมการทุกสภาวะการอบแห้งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทำนายอัตราการอบแห้งจากสมการ Verma et al. จะพิจารณาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ง่ายที่สุดในการอธิบายลักษณะการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน exponential มีรูปแบบคล้ายคลึงกับกฎการทำความเย็นของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังสมการ (47)

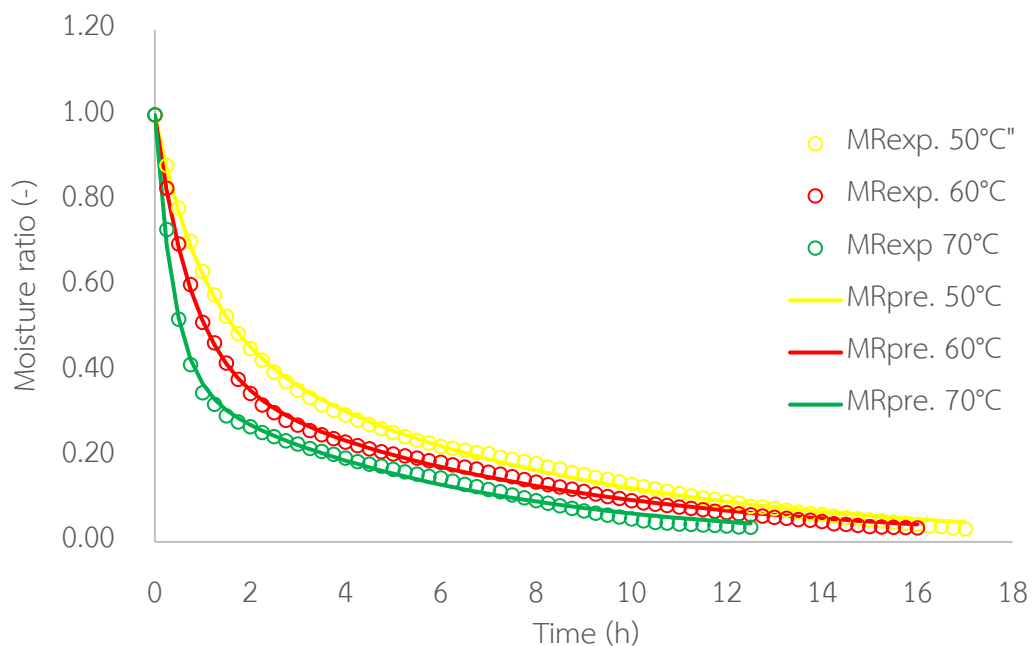
$$MR = e^{-kt} \quad (47)$$

เมื่อนำสมการ (47) มาทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาจะได้อัตราการอบแห้ง [54] ดังแสดงในสมการ (48)

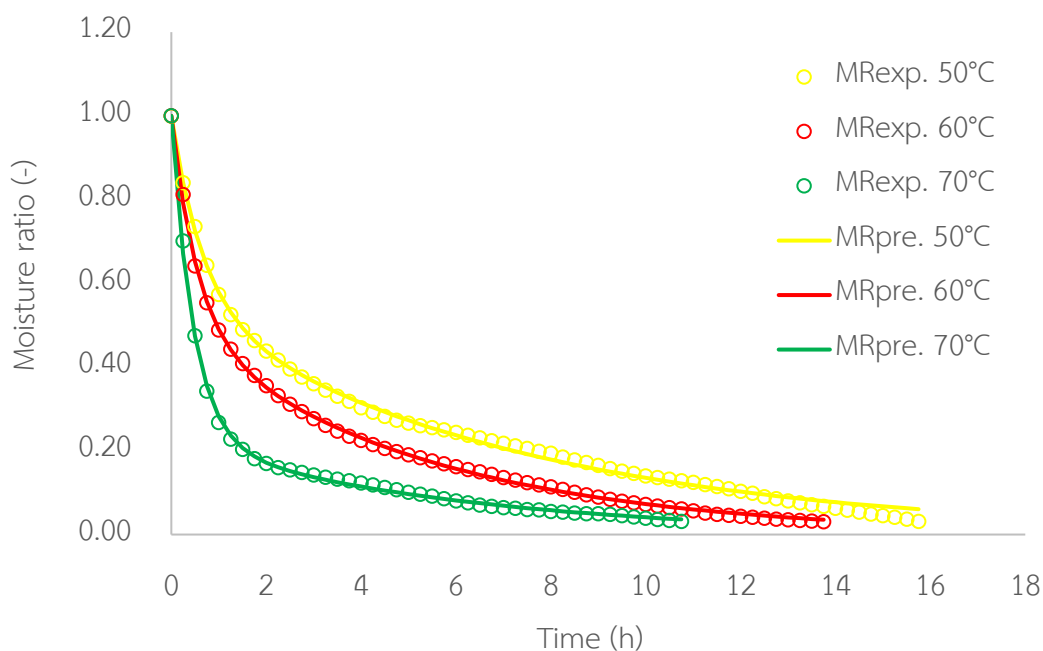
$$\frac{dMR}{dt} = -k \cdot MR \quad (48)$$

จากสมการ (48) แสดงให้เห็นว่า อัตราการอบแห้งแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนความชื้น โดยมีค่า k เป็นค่าคงที่การอบแห้ง ซึ่งเครื่องหมายลบ (-) ทางด้านขวามือของสมการ (48) บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ Verma et al. ซึ่งมีรูปแบบดังสมการ (46) โดยรูปแบบสมการนี้จะแบ่งความชื้นภายในชั้นโพลออกเป็นสองส่วนดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นแต่ละส่วนมีพฤติกรรมตามสมการ (47) และ (48) และมีค่าคงที่ที่ต่างกัน

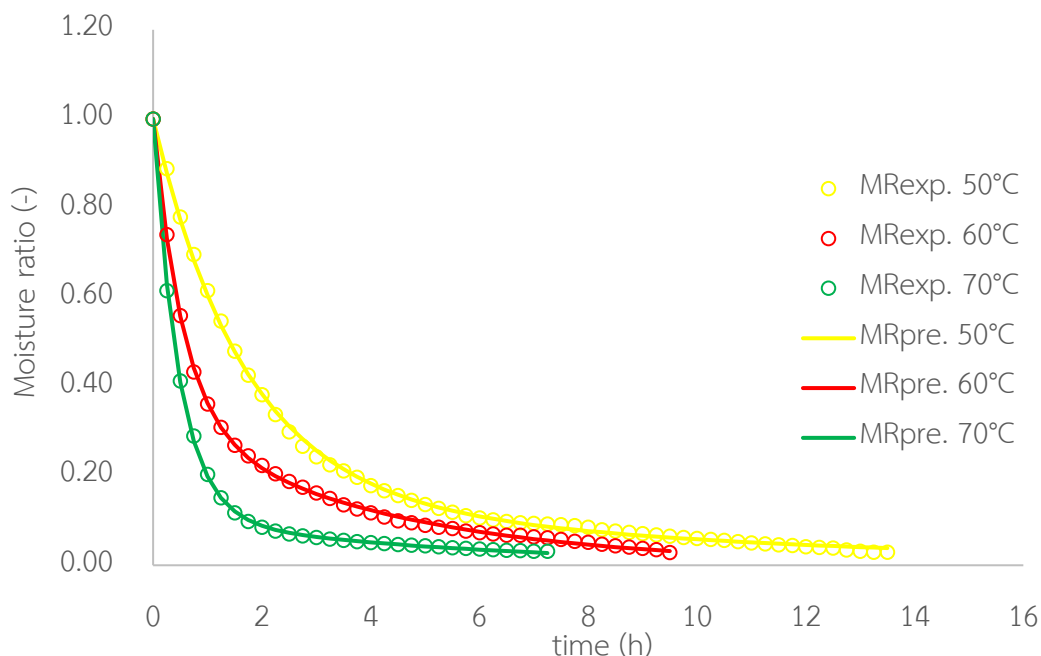
จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถนำสมการ Verma et. al. มาใช้ในการติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งและทำนายอัตราการอบแห้งได้อย่างเหมาะสม ทำให้ทราบเวลาในการอบแห้งโดยจะส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากการสัมผัสกับความร้อนและอากาศอบแห้งเป็นเวลานานเกินไป สำหรับผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นในแต่ละเวลาการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ($MR_{exp.}$) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย ($MR_{pre.}$) ของสมการ Verma et al. แสดงดังภาพประกอบ 4.5-4.7



ภาพประกอบ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Verma et. al. เปรียบเทียบกับการทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 500 W



ภาพประกอบ 4.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Verma et. al. เปรียบเทียบกับการทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W



ภาพประกอบ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนายของสมการ Verma et. al. เปรียบเทียบกับการทดลองอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W

นำค่าคงที่ของสมการอบแห้งที่ทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุด มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิและกำลังอินฟราเรดที่ใช้อบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้ง ซึ่งผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าคงที่ในสมการกับอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรดแสดงดังตาราง 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

ตาราง 4.5 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าคงที่ของสมการ Verma et. al. กับอุณหภูมิอบแห้งเพื่อหาสัมประสิทธิ์ในสมการ Quadratic

Infrared power (W)	Drying constant	Parameter in Quadratic Relationship		
		A	B	C
500	a	0.00039	-0.05355	2.24600
	k	0.00015	-0.01585	0.57400
	g	0.005	-0.489	13.716

ตาราง 4.5 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าคงที่ของสมการ Verma et. al. กับอุณหภูมิอบแห้งเพื่อหาสัมประสิทธิ์ในสมการ Quadratic

Infrared power (W)	Drying constant	Parameter in Quadratic Relationship		
		A	B	C
1,000	a	0.002	-0.186	5.744
	k	0.009	-1.033	28.185
	g	-0.010	1.142	-30.448
1,500	a	0.002	-0.204	5.369
	k	0.009	-0.937	25.350
	g	-0.014	1.713	-48.926

ตาราง 4.6 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าคงที่ของสมการ Verma et. al. กับกำลังอินฟราเรด เพื่อหาสัมประสิทธิ์ในสมการ Quadratic

Temperature (°C)	Drying constant	Parameter in Quadratic Relationship		
		A	B	C
50	a	-7.96×10^{-7}	0.001	0.115
	k	-5.20×10^{-8}	7.00×10^{-5}	0.122
	g	-2.70×10^{-6}	0.005	-0.779
60	a	-4.92×10^{-7}	0.001	0.095
	k	1.40×10^{-8}	7.30×10^{-5}	0.105
	g	-1.05×10^{-6}	0.003	0.271
70	a	-5.50×10^{-7}	0.002	-0.281
	k	-3.95×10^{-6}	0.010	-3.758
	g	4.78×10^{-6}	-0.012	7.294

4.2.2 การพัฒนาสมการอบแห้งชั้นบาง

การพัฒนาสมการอบแห้งชั้นบางสำหรับการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ซึ่งการพัฒนาสมการอบแห้งชั้นบางนี้จะนำรูปแบบสมการ Verma et al. ที่สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดมาปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ได้สมการรูปแบบใหม่ โดยพิจารณาจากแนวทางในการพัฒนาสมการอบแห้งที่เสนอไว้ในหัวข้อ 4.2.1 โดยเพิ่มค่าคงที่ n เข้าไปในสมการ ซึ่งค่าคงที่ n นี้จะถูกเพิ่มเข้ามาเป็นเลขชี้กำลังของตัวแปรต้น t ในเทอมแรกของสมการ Verma et al. ดังแสดงในสมการ (49) ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) ในแต่ละเวลาการอบแห้งจากการทำนายของสมการมีค่าแม่นยำมากยิ่งขึ้น

$$MR = ae^{(-kt^n)} + (1 - a)e^{(-gt)} \quad (49)$$

ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาของการอบแห้ง เพื่อหาค่าคงที่ในสมการที่ได้รับการพัฒนา จะแสดงในตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการได้รับการพัฒนาจากงานวิจัยนี้

Equation	conditions		Drying Constant			
			a	k	n	g
This study	500 W	50°C	0.326	0.017	1.728	0.771
		60°C	0.277	0.019	1.732	1.061
		70°C	0.282	0.033	1.677	2.098
	1,000 W	50°C	0.383	0.025	1.607	1.080
		60°C	0.433	0.125	1.158	1.667
		70°C	0.172	0.041	1.584	1.980
	1,500 W	50°C	0.102	0.005	2.050	0.577
		60°C	0.392	0.357	0.856	1.904
		70°C	0.198	0.672	0.521	2.062

เมื่อนำสมการรอบแห้งชั้นบางที่ได้รับการพัฒนามาเปรียบเทียบกับสมการ Verma et. al. โดยใช้ค่า R^2 และค่า χ^2 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการในการทำนาย พบว่าสมการที่พัฒนาขึ้นมานี้สามารถทำนายผลการทดลองได้ดียิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับสมการ Verma et al. โดยเฉพาะในช่วงเวลาอบแห้งนานขึ้นสมการที่พัฒนาขึ้นมานี้จะให้ผลการทำนายได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าสมการ Verma et. al. อย่างเห็นได้ชัด ทำให้มีค่า R^2 สูงกว่าทุกสภาวะการอบแห้ง เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติจากค่า χ^2 ซึ่งเป็นค่าสถิติที่มีการนำจำนวนค่าคงที่ในสมการมาพิจารณาด้วย ถ้าจำนวนของค่าคงที่มากขึ้นจะทำให้ค่า χ^2 มีค่าสูงขึ้น นั่นหมายความว่าความสามารถในการทำนายของสมการน้อยลง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาสมการอบแห้งโดยเพิ่มค่าคงที่ n เข้าไปในสมการ Verma et al. อีกหนึ่งตัว ซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ความสามารถในการทำนายของสมการเมื่อพิจารณาจากค่า χ^2 แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ผลการวิเคราะห์ค่า χ^2 ยังมีค่าต่ำกว่าสมการ Verma et. al. ทุกสภาวะการอบแห้ง ยกเว้นสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในขึ้นไพล 60 °C กำลังหลอดอินฟราเรด 1,500 W สมการ Verma et. al. ให้ค่า χ^2 ที่ต่ำกว่าเล็กน้อย แสดงว่าสมการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น (MR) ในแต่ละเวลาการอบแห้งมีค่าแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยผลการวิเคราะห์ค่า R^2 และค่า χ^2 ของสมการ Verma et al. เทียบกับสมการที่ได้รับการพัฒนาจากงานวิจัยนี้ แสดงดังตาราง 4.4

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทำนายระยะเวลาในการอบแห้ง (t) ของสมการอบแห้งที่ได้รับการพัฒนาดังแสดงในสมการ (49) เปรียบเทียบกับสมการ Verma et. al. ดังแสดงในสมการ (46) ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะเวลาในการอบแห้งได้จากสภาวะสิ้นสุดการอบแห้ง โดยสภาวะนี้ความชื้นสุดท้ายของขึ้นไพลจะมีค่าเท่ากับ 13% (d.b) อัตราส่วนความชื้น 0.03 และแทนค่าคงที่การอบแห้งของแต่ละสมการอบแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นในแต่ละสภาวะการอบแห้ง โดยค่าคงที่การอบแห้งในแต่ละสภาวะการอบแห้งของสมการ Verma et. al. (ประกอบด้วยค่า a, k, g) จะแสดงในตาราง 4.3 สำหรับค่าคงที่การอบแห้งของสมการอบแห้งที่ได้รับการพัฒนา (ประกอบด้วยค่า a, k, n, g) จะแสดงดังตาราง 4.7 จากนั้นนำระยะเวลาในการอบแห้งที่ได้จากการทำนายของทั้งสองสมการมาคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเทียบกับระยะเวลาในการทดลองซึ่งผลการทำนายระยะเวลาในการอบแห้ง และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะแสดงในตาราง 4.8

ตาราง 4.8 ผลการทำนายเวลาในการอบแห้งและเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของสมการที่ได้รับการพัฒนาเปรียบเทียบกับสมการ Verma et. al.

Conditions		Drying time of Experiment	Drying time prediction		% Error	
IR power (W)	Temperature (°C)		Verma et. al	This work	Verma et. al.	This work
500	50°C	17.00	19.82	17.40	16.58	2.34
	60°C	16.00	17.57	15.27	9.79	4.58
	70°C	12.50	13.82	11.93	10.56	4.54
1,000	50°C	15.75	20.33	17.50	29.10	11.13
	60°C	13.75	14.43	13.90	4.98	1.09
	70°C	10.75	11.65	10.53	8.35	2.05
1,500	50°C	13.50	16.12	14.91	19.42	10.45
	60°C	9.50	9.95	10.27	4.72	8.14
	70°C	7.50	6.62	7.03	11.77	6.30

จากตาราง 4.8 พบว่า สมการที่ได้รับการพัฒนาจากงานวิจัยนี้สามารถทำนายเวลาในการอบแห้งได้ดีกว่าสมการ Verma et. al. ทุกสภาวะการอบแห้ง ยกเว้นสภาวะการอบแห้งที่กำลังโหลดอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิภายในชั้นในไฟ 60 °C สมการ Verma et. al. จะสามารถให้ผลทำนายเวลาในการอบแห้งได้ดีกว่าเล็กน้อย (ให้ผลการทำนายแตกต่างกัน 3 %)

4.3 คุณภาพด้านสี

การศึกษาคุณภาพด้านสีของไฟลหลังจากการอบแห้ง จะวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี Spectrophotometer รุ่น ColorFlex EZ โดยจะแสดงค่าผลออกมาเป็นค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ในระบบ Commission International de l'Eclairage (CIE) ซึ่งในการศึกษาคุณภาพด้านสีของไฟลอบแห้งจำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่าสีของไฟลสดเพื่อเปรียบเทียบกับค่าสีหลังการอบแห้ง โดยผลการวัดค่าสีของไฟลสดแสดงในตาราง 4.9

ตาราง 4.9 คุณภาพสีของไพลสด

Colour quality	Colour values of fresh Phlai $\pm$ STD
L*	61.71 $\pm$ 3.44
a*	6.80 $\pm$ 3.02
b*	53.83 $\pm$ 3.20

สำหรับการวัดค่าสีของไพลหลังการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกันจะแสดงในตาราง 4.10

ตาราง 4.10 คุณภาพสีของไพลหลังการอบแห้ง (L*, a* และ b*)

Conditions		Colour values $\pm$ STD		
IR power (W)	Temperature ($^{\circ}$ C)	L*	a*	b*
fresh phlai		61.71 $\pm$ 3.44	6.80 $\pm$ 3.02	53.83 $\pm$ 3.20
500	50	54.06 $\pm$ 1.64 ^{de}	4.49 $\pm$ 0.23 ^c	43.29 $\pm$ 2.81 ^{bc}
	60	55.49 $\pm$ 0.54 ^{cd}	4.97 $\pm$ 0.50 ^b	46.51 $\pm$ 2.24 ^a
	70	53.19 $\pm$ 6.29 ^{de}	5.67 $\pm$ 0.08 ^a	42.19 $\pm$ 8.73 ^c
1000	50	65.73 $\pm$ 10.47 ^a	3.01 $\pm$ 0.27 ^e	35.52 $\pm$ 3.11 ^{ef}
	60	62.31 $\pm$ 4.73 ^b	3.60 $\pm$ 0.43 ^d	45.34 $\pm$ 3.54 ^{ab}
	70	58.11 $\pm$ 0.36 ^c	4.42 $\pm$ 0.33 ^c	44.31 $\pm$ 2.02 ^{abc}
1500	50	57.55 $\pm$ 1.55 ^c	3.67 $\pm$ 0.31 ^d	39.14 $\pm$ 0.34 ^d
	60	49.84 $\pm$ 4.47 ^f	3.52 $\pm$ 0.45 ^d	33.40 $\pm$ 5.49 ^f
	70	51.92 $\pm$ 1.62 ^f	4.08 $\pm$ 0.10 ^c	37.98 $\pm$ 1.60 ^{de}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของไหลหลังการอบแห้งจะแสดงผลออกมาเป็นค่า L^* , a^* และ b^* โดยค่า L^* บ่งบอกถึงความขาวหรือความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว) ยิ่งมีค่าสูง แสดงว่าปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลก็จะน้อยลง ค่า a^* ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีแดงกับสีเขียว ถ้า a^* มีค่าเป็นบวก (+) สีจะไปในทิศทางของสีแดง ถ้า a^* มีค่าเป็นลบ (-) สีจะไปในทิศทางของสีเขียว ส่วนค่า b^* ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างสีเหลืองกับสีน้ำเงิน ถ้า b^* มีค่าเป็น + สีจะไปในทิศทางของสีเหลือง ถ้า b^* มีค่าเป็น - สีจะไปในทิศทางของสีน้ำเงิน จากตาราง 4.10 พบว่า การอบแห้งที่ สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันจะทำให้ค่า L^* , a^* , b^* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่า L^* , a^* , b^* มีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของไหลสด เมื่อพิจารณาว่า a^* พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไหลสูงขึ้น แสดงว่าค่าสีเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เอนไซม์ (Non enzymatic browning) ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard) และการเกิดสีน้ำตาลของกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid browning) และการเกิดคาราเมลไลเซชัน (caramelization) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการอบแห้ง ด้วยความร้อน [55]

จากผลการวิเคราะห์ค่าสี L^* , a^* และ b^* ที่ได้จากตาราง 4.10 สามารถนำมาคำนวณหาค่า ความแตกต่างสีรวม (Total colour differences : ΔE^*) ค่าความเข้มสี (Chroma : C^*) และค่าเฉดสี (Hue angle : h^*) จะได้ผลการคำนวณดังแสดงในตาราง 4.11

ตาราง 4.11 คุณภาพสีของไหลหลังการอบแห้ง (ΔE^* , C^* และ h^*)

Conditions		Colour values $\pm$ STD		
IR power (W)	Temperature ($^{\circ}$ C)	ΔE^*	C^*	h^*
fresh phlai		-	54.33 $\pm$ 3.18	82.79 $\pm$ 3.22
500	50	14.26 $\pm$ 0.72 ^c	43.56 $\pm$ 2.72 ^b	82.99 $\pm$ 2.30 ^{ab}
	60	10.38 $\pm$ 1.40 ^d	46.78 $\pm$ 2.24 ^a	83.88 $\pm$ 0.6 ^{bc}
	70	15.38 $\pm$ 9.69 ^c	42.59 $\pm$ 8.65 ^b	82.09 $\pm$ 1.54 ^a
1000	50	21.39 $\pm$ 2.38 ^{ab}	34.70 $\pm$ 4.77 ^{de}	85.16 $\pm$ 0.10 ^{cd}
	60	10.63 $\pm$ 1.65 ^{ed}	45.49 $\pm$ 3.56 ^{ab}	85.48 $\pm$ 0.27 ^d
	70	10.82 $\pm$ 2.14 ^{ed}	44.54 $\pm$ 1.97 ^{ab}	84.24 $\pm$ 0.72 ^{bcd}

ตาราง 4.11 (ต่อ) คุณภาพสีของไพลหลังการอบแห้ง (ΔE^* , C^* และ h^*)

Conditions		Colour values $\pm$ STD		
IR power (W)	Temperature ($^{\circ}$ C)	ΔE^*	C^*	h^*
fresh phlai		-	54.33 $\pm$ 3.18	82.79 $\pm$ 3.22
1,500	50	15.86 $\pm$ 0.37 ^c	39.31 $\pm$ 0.31 ^c	84.66 $\pm$ 0.49 ^{cd}
	60	24.25 $\pm$ 6.87 ^a	33.61 $\pm$ 5.51 ^e	83.93 $\pm$ 0.17 ^{bc}
	70	18.97 $\pm$ 2.19 ^b	38.21 $\pm$ 1.58 ^{cd}	83.79 $\pm$ 0.34 ^{bc}

หมายเหตุ - ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่ตามด้วยอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

จากตาราง 4.11 พบว่า ค่าความแตกต่างสีรวม (ΔE^*) ค่าความเข้มของสี (C^*) และค่าเฉดสี (h^*) จะขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้ง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาค่า C^* และ h^* ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า a^* กับ b^* พบว่า ค่า C^* อยู่ในช่วง 33.61-46.78 และค่า h^* อยู่ในช่วง 82.09-85.48 ทำให้ค่าสีของไพลหลังการอบแห้งมีสีเหลือง เช่นเดียวกับไพลสด ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ บุญมาก หมื่นอาจอาสา (2554, 59-72) ซึ่งพบว่า ค่าสี L^* a^* b^* หลังการอบแห้งมีค่าลดลง และการอบแห้งที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้ค่าสีมีค่าแตกต่างกัน [1]

4.4 วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เป็นการศึกษาระยะเวลาในการคืนทุน (Payback period) สามารถคำนวณได้จากสมการ (44) ซึ่งต้นทุนที่ใช้ในการอบแห้งไพล ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้ง ค่าไพลสดที่ใช้ในการอบแห้ง และค่าไฟฟ้าในการอบแห้ง ส่วนรายรับ คือ กำไรที่ได้จากการขายไพลอบแห้ง เมื่อนำต้นทุนและรายรับมาวิเคราะห์ จะได้ระยะเวลาคืนทุนดังแสดงในตาราง 4.12

ตาราง 4.12 ระยะเวลาคืนทุนจากการคำนวณปริมาณและราคาขายไพลอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

Drying conditions	maximum amount of Phlai drying (Kg/month)	Price of Phlai fresh (baht)	Electricity bill (bath/month)	profit of dried Phlai sell (bath/month)	Payback period (month)	Payback period (year)
500W-50°C	1.41	49.41	19.27	185.44	82.75	6.90
500W-60°C	1.52	53.30	39.52	181.29	84.64	7.05
500W-70°C	1.92	67.31	52.22	226.63	67.71	5.64
1000W-50°C	1.52	53.30	20.17	200.64	76.48	6.37
1000W-60°C	1.74	61.05	29.00	223.90	68.53	5.71
1000W-70°C	2.24	78.36	53.22	271.41	56.54	4.71
1500W-50°C	1.74	61.05	6.15	246.76	62.19	5.18
1500W-60°C	2.52	88.24	38.49	327.06	46.92	3.91
1500W-70°C	3.30	115.38	68.14	409.88	37.44	3.12

จากตาราง 4.12 พบว่า สภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 500 วัตต์ อุณหภูมิ 60 °C (500W-60°C) จะมีระยะเวลาคืนทุนนานที่สุดเท่ากับ 7.05 ปี ส่วนสภาวะการอบแห้งที่มีระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุดคือ สภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 วัตต์ อุณหภูมิ 70 °C (1,500W-70°C) มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.12 ปี แสดงให้เห็นว่าสภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรดสูง มีแนวโน้มทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลง เนื่องจากสภาวะการอบแห้งที่ใช้กำลังอินฟราเรดสูงจะทำให้เวลาในการอบแห้งเร็ว ส่งผลให้ในแต่ละปีสามารถอบแห้งได้มากกว่าที่สภาวะอื่น ๆ ซึ่งสามารถสร้างกำไรได้มากขึ้น ทำให้ส่วนของรายรับมีค่าเพิ่มขึ้น ประกอบกับหลอดอินฟราเรดใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงทำให้ต้นทุนการอบแห้งน้อยลง เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ทำให้ในแต่ละปีสามารถอบแห้งได้ปริมาณมาก ทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นลง ถึงแม้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นก็ตาม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล (T) 50 60 และ 70 °C กำลังหลอดอินฟราเรด (P) 500 1,000 และ 1,500 W สามารถสรุปผลการทดลองดังนี้

5.1 การศึกษาระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ระยะเวลาในการอบแห้งและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งมาค่าอยู่ระหว่าง 7.00-17.00 ชั่วโมง และ 0.150-1.156 kW-h ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการอบแห้ง (t) จะแปรผกผันกับอุณหภูมิภายในชั้นไพล และกำลังอินฟราเรด ($t = \frac{k}{PT}$) และพลังงานไฟฟ้า (E) แปรผันตรงกับการอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพลและแปรผกผันกับกำลังอินฟราเรด ($E = \frac{kT}{P}$)

5.2 การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด พบว่า อัตราการอบแห้ง (DR) และ ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.0047-0.0123 และ 1.58-14.15 kW-h/kg_{water} โดยค่า DR จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในชั้นไพลและกำลังอินฟราเรด ($DR = kPT$) ส่วนค่า SEEC จะแปรผันตรงกับอุณหภูมิภายในชั้นไพลและแปรผกผันกับกำลังอินฟราเรด ($SEEC = \frac{kT}{P}$)

5.3 การศึกษาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด โดยใช้ค่า R^2 และค่า χ^2 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถของสมการในการทำนาย พบว่า สมการ Verma et. al. สามารถทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดโดยให้ค่า R^2 มากและค่า χ^2 น้อยที่สุด

สำหรับการพัฒนาสมการอบแห้งชั้นบางจะนำรูปแบบสมการ Verma et. al. มาปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้ได้สมการรูปแบบใหม่ที่สามารถทำนายผลการอบแห้งได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งมีรูปแบบดังสมการต่อไปนี้

$$MR = ae^{(-kt^n)} + (1 - a)e^{(-gt)} \quad (47)$$

5.5 การวิเคราะห์คุณภาพสีของไพลหลังการอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันจะทำให้ค่า L^* , a^* , b^* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่ค่า L^* a^* b^* หลังการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีของไพลสด ส่วนค่าความ

แตกต่างสีรวม (ΔE^*) ค่าความเข้มของสี (C^*) และค่าเฉดสี (h^*) จะขึ้นอยู่กับสภาวะการอบแห้ง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และเมื่อพิจารณาค่า h^* พบว่า ค่าสีของไพลหลังการอบแห้งมีสีเหลือง

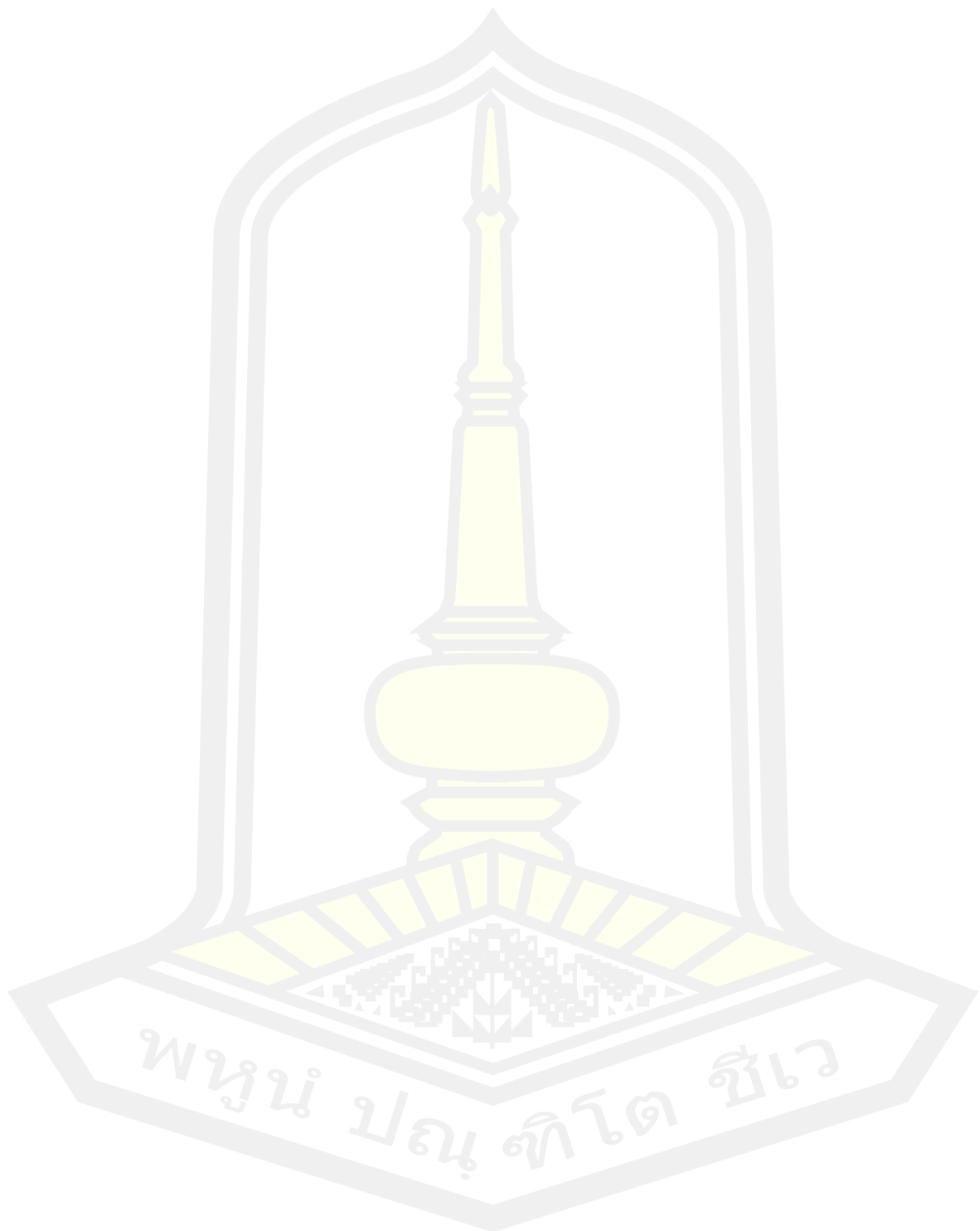
5.6 การศึกษาค่าทางเศรษฐศาสตร์ เป็นการศึกษาระยะเวลาในการคืนทุน พบว่า ระยะเวลาในการคืนทุนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออบแห้งด้วยกำลังอินฟราเรดสูง อุณหภูมิภายในชั้นไพลสูง

โดยสรุป สภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งไพล เนื่องจากมีค่า DR สูงที่สุด ค่า SEEC ต่ำที่สุด และระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิภายในชั้นไพลที่เหมาะสมสามารถพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ ถ้าพิจารณาในส่วนของการประหยัดพลังงานไฟฟ้า การอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล 50 °C จะมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้ค่า SEEC ต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการอบแห้งและระยะเวลาคืนทุน การอบแห้งที่อุณหภูมิภายในชั้นไพล 70 °C จะมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีค่า DR สูงที่สุด และมีระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาคุณภาพของไพลหลังการอบแห้งด้านอื่นๆ ให้มากกว่านี้ เช่น องค์ประกอบทางเคมี หรือฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันหอมระเหยไพล เป็นต้น
2. ควรมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแหล่งความร้อนทั้งอื่น ๆ เพื่อประหยัดพลังงานและลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิลให้น้อยลง เช่น ใช้ร่วมกับความร้อนทิ้งจากระบบปรับอากาศของอาคารหรือโรงงาน เป็นต้น

บรรณานุกรม



พูน ปณ จิต ชีเว

บรรณานุกรม

- [1] บุญนาก หมื่นอาจอาสา ยิ่งยง ไพสุขศานติวัฒนา เบญญา มะโนชัย, “ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อคุณภาพของเห้้า ไพล,” *วารสารวิชาการเกษตร*, vol. 29, no. 1. pp. 59–72, 2554, [Online]. Available: <https://www.tci-thaijo.org/index.php/thaiagriculturalresearch/article/view/90520>.
- [2] N. Sittichai, “Herbal standardization in thai herbal pharmacopia,” *Thai J. Phytopharm.*, vol. 11, no. 1, pp. 21–32, 2004.
- [3] A. Agarwal and R. M. Sarviya, “An experimental investigation of shell and tube latent heat storage for solar dryer using paraffin wax as heat storage material,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 619–631, 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2015.09.014.
- [4] S. Janjai, J. Laksanaboonsong, M. Nunez, and A. Thongsathitya, “Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment,” *Sol. Energy*, vol. 78, no. 6, pp. 739–751, 2005, doi: 10.1016/j.solener.2004.09.009.
- [5] M. Aktaş, S. Şevik, and B. Aktekeli, “Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 113, pp. 82–94, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.028.
- [6] P. Nuthong, A. Achariyaviriya, K. Namsanguan, and S. Achariyaviriya, “Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air,” *J. Food Eng.*, vol. 102, no. 3, pp. 233–239, 2011, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.08.024.
- [7] A. Ziafroughi and J. A. Esfahani, “A salient reduction of energy consumption and drying time in a novel PV-solar collector-assisted intermittent infrared dryer,” *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 428–436, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.07.025.
- [8] D. K. Rabha and P. Muthukumar, “Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with a paraffin wax-based latent heat storage system,” *Sol. Energy*, vol. 149, pp. 214–226, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.04.012.

- [9] M. Aktaş, S. Şevik, A. Amini, and A. Khanlari, "Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer," *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 500–515, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.08.036.
- [10] บุญมัน แสงสุลักษณ์, อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และ ศิวะ อัจฉริยวิริยะ, "แบบจำลองพลศาสตร์การอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนความเร็วรอบแปรผัน," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย*
- [11] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, *การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [12] คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [13] จรรย์ คนแรง อัญชนา อุดประภูถ วีสานินี ศรีสุวรรณ วิภพ ใจแข็ง, "การวิจัยตู้อบสับประรดอบแห้งโดยใช้พลัง งานแสงอาทิตย์ของชุมชนนางแลจังหวัด เชียงราย," 2557, [Online]. Available: <http://www.ind.crru.ac.th/articleind/54.pdf>.
- [14] เสริม จันทรฉาย, *รังสีอาทิตย์*. 2557.
- [15] เสริม จันทรฉาย, *Solar Drying Technology*, 1st ed., vol. 1. บริษัท เพชรเกษมพรินต์ติ้ง จำกัด, 2012.
- [16] ฝไท่ จินเวชศาสตร์, "การเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบแผ่นเรียบโดยใช้เทคนิคสนามไฟฟ้า," *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*, 2548.
- [17] M. Kashaninejad, A. Mortazavi, A. Safekordi, and L. G. Tabil, "Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts," *J. Food Eng.*, vol. 78, no. 1, pp. 98–108, 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.09.007.
- [18] Z. Erbay and F. Icier, "A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 50, no. 5, pp. 441–464, 2010, doi: 10.1080/10408390802437063.
- [19] O. A. Aregbesola, B. . Ogunsina, A. E. Sofolahan, and N. N. Chime, "Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels," *Niger. Food J.*, vol. 33, no. 1, pp. 83–89, 2015, doi: 10.1016/j.nifoj.2015.04.012.

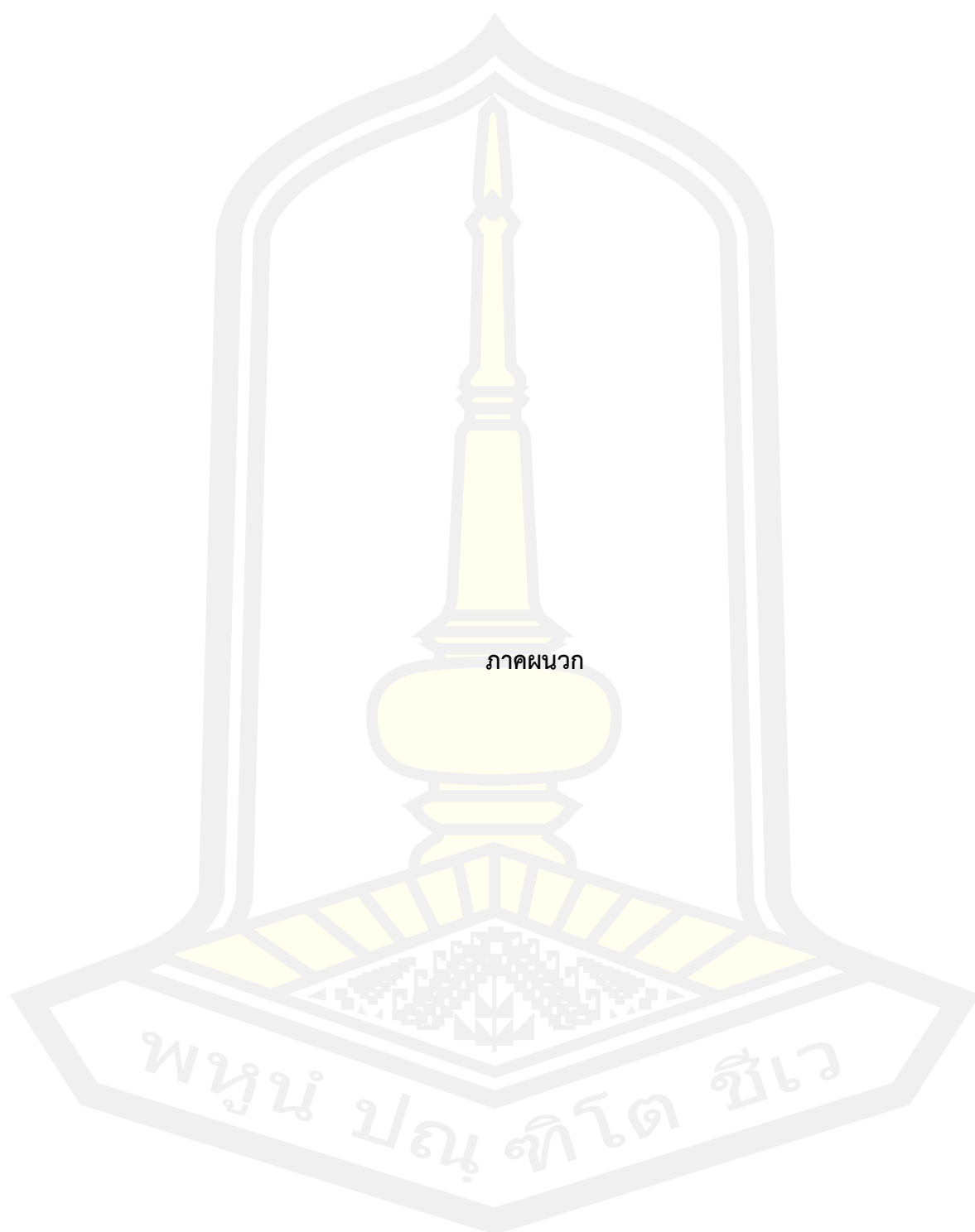
- [20] S. . Henderson, "Progress in developing the thin-layer drying equation," *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric Eng.)*, vol. 1172, no. 17, pp. 1167–1168, 1974.
- [21] D. Y. O. Ozdemir M., "Thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting," *J. Food Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 225–233, 1999.
- [22] M. Y. Sharaf-Eldeen Y.I., Blaisdell, J.L., Hamdy, "A model for ear corn drying," *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric Eng.)*, vol. 1271, no. 23, pp. 1261–1265, 1980.
- [23] P. K. R. P. S. Chandra, *Methods for Food and Agricultural Engineers*. California: University of California, 1995.
- [24] G. Page, "Factor influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layer," Purdue University, 1949.
- [25] F. Gulcimen, H. Karakaya, and A. Durmus, "Drying of sweet basil with solar air collectors," *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 77–86, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.033.
- [26] D. G. D. G. Overhults, G. M. G. M. White, H. E. H. E. Hamilton, and I. J. I. J. Ross, "Drying Soybeans With Heated Air," *Trans. ASAE*, vol. 16, no. 1, pp. 0112–0113, 1973, doi: 10.13031/2013.37459.
- [27] I. J. White, G.M., Briedges, T.C., Loewer, O.J., Ross, "Seed coat damage in thin-layer drying of soybeans as affected by drying conditions," *ASAE Pap. 78-3052. Am. Soc. Agric. Eng. St. Joseph, MI*.
- [28] R. P. Wang, C.Y., Singh, "A single layer drying equation for rough rice," *Am. Soc. Agric Eng., St. Joseph. MI.*, vol. 16, no. 1, pp. 18–22, 1978.
- [29] M. Golmohammadi, M. Rajabi, and M. Foroughi-dahr, "Intermittent drying kinetics of paddy rice: modeling and experimental validation," no. February, 2012, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/309443272_INTERMITTENT_DRYING_KINETICS_OF_PADDY_RICE_MODELING_AND_EXPERIMENTAL_VALIDATION.
- [30] W. F. Verma LR, Bucklin RA, Endan JB, "Effects of drying air parameters on rice drying models," *Trans ASAE*, vol. 28, pp. 296–301, 1985.
- [31] Z. Ashraf, Z. Hamidi-Esfahani, and M. A. Sahari, "Evaluation and Characterization of vacuum drying of date paste," *J. Agric. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 565–575, 2012.

- [32] Z. Midilli, A., Kucuk, H. Yapar, “A New model for single-layer drying,” *Dry. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 1503–1533, 2002.
- [33] S. N. Karaaslan and I. K. Tunçer, “Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach,” *Biosyst. Eng.*, vol. 100, no. 1, pp. 44–52, 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.12.012.
- [34] O. O. Agbede *et al.*, “Thin layer drying of green microalgae (*Chlorella* sp.) paste biomass: Drying characteristics, energy requirement and mathematical modeling,” *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 11, no. June, p. 100467, 2020, doi: 10.1016/j.biteb.2020.100467.
- [35] E. Heater and I. Emitter, “เทคโนโลยีการให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Electric Infrared Heating),” pp. 1–6.
- [36] D. Huang, P. Yang, X. Tang, L. Luo, and B. Sunden, “Application of infrared radiation in the drying of food products,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 110, no. January, pp. 765–777, 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2021.02.039.
- [37] หริรักษ์ ควรประดิษฐ์, “การพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์แบบจานรวมรังสีในกระบวนการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร,” มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2556.
- [38] S. Nongnuang, T. Pattanaseree, A. Pornleesangsuwan, and S. Wattanasuksakul, “Production and Chemical Properties of *Zingiber montanum* within Plantations,” pp. 1–12.
- [39] เต็ม สมิตินันท์, *ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: สำนักงานหอพรรณไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช, 2557.
- [40] ศิริภรณ์ แก้วคูณ, “พฤติกรรมผู้บริโภคผลิตภัณฑ์สมุนไพรที่มีส่วนผสมของไพล,” no. 1, pp. 1–121, 2018, [Online]. Available: <http://mab.eco.ku.ac.th/wp-content/uploads/2015/06/5914750733.pdf.pdf>.
- [41] H. Mortezaipoor, B. Ghobadian, M. H. Khoshtaghaza, and S. Minaei, “Drying kinetics and quality characteristics of saffron dried with a heat pump assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer,” *J. Agric. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 33–45, 2014.
- [42] M. Yahya, A. Fudholi, H. Hafizh, and K. Sopian, “Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava,” *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 606–613, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.07.049.

- [43] M. Younis, D. Abdelkarim, and A. Zein El-Abdein, "Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices," *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 25, no. 2, pp. 332–338, 2018, doi: 10.1016/j.sjbs.2017.06.011.
- [44] ณัฐวุฒิ เกตุจำนงค์ จิตติพร ขาวสะอาด นิพนธ์ เจาจะจง, "การศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้รายปีภายใต้สภาวะการใช้งานจริง," *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, pp. 44–49, 2552.
- [45] ศันสนีย์ แสนศิริพันธ์, *การพัฒนาเครื่องอบแห้งสตรอเบอรี่โดยใช้ความร้อนทั้งจากคอนเดนเซอร์ และพลังงานแสงอาทิตย์*. .
- [46] ธาณินทร์ รัชโพธิ์, *การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมสำหรับอบแห้งพริกแดงโดยใช้ทราย เป็นวัสดุกักเก็บความร้อน*. พิษณุโลก, 2559.
- [47] วิทยา ยงเจริญ ธารรัตน์ มาลาหอม, "การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนที่ใช้แผงรับแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบท่อฮีตไปป์," *วารสารวิจัยพลังงาน*, pp. 64–72, 2554.
- [48] N. Adak, N. Heybeli, and C. Ertekin, "Infrared drying of strawberry," *Food Chem.*, vol. 219, pp. 109–116, 2017, doi: 10.1016/j.foodchem.2016.09.103.
- [49] P. Sakare, N. Prasad, N. Thombare, R. Singh, and S. C. Sharma, "Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances," *Food Eng. Rev.*, vol. 12, no. 3, pp. 381–398, 2020, doi: 10.1007/s12393-020-09237-w.
- [50] W. K. Abdelbasset, S. M. Alrawaili, S. M. Elkholi, M. M. Eid, A. A. Abd-Elghany, and M. Z. Mahmoud, "The role of infrared waves in increasing the quality of food products," *Food Sci. Technol.*, vol. 42, pp. 1–5, 2022, doi: 10.1590/fst.118421.
- [51] W.J.N. Fernando, HuaChin Low and A.L. Ahmad, "The effect of infrared on diffusion coefficients and activation energies in convective drying: A case study for banana, cassava, and pumpkin," *Journal of Applied Sciences*. 11(21) pp. 3635-3639, 2011, doi: 10.3923/jas.2011.3635.3639
- [52] A. S. Sabau *et al.*, "Evaporation due to infrared heating and natural convection," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 56, no. 8, pp. 2585–2593, 2020, doi: 10.1007/s00231-020-02875-0.
- [53] H. O. Menges and C. Ertekin, "Thin layer drying model for treated and untreated Stanley plums," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 15–16, pp. 2337–2348, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.11.016.

- [54] W. P. da Silva, C. M. D. P. S. e Silva, F. J. A. Gama, and J. P. Gomes, "Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas," *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 67–74, 2014, doi: 10.1016/j.jssas.2013.01.003.
- [55] Z. Ren *et al.*, "Combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)," *Lwt*, vol. 144, no. November 2020, p. 111238, 2021, doi: 10.1016/j.lwt.2021.111238.





ภาคผนวก ก เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้า



ตาราง ก-1 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วนความชื้น (MR)	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	101.70	4.26	1.00	745.3	0.000
9.15	92.00	3.75	0.88	899.3	0.068
9.30	83.82	3.33	0.78	995.7	0.102
9.45	77.34	3.00	0.70	1035	0.122
10.00	71.53	2.70	0.63	1141	0.140
10.15	67.06	2.47	0.58	1152	0.164
10.30	62.92	2.25	0.53	1189	0.180
10.45	59.55	2.08	0.49	1231	0.194
11.00	56.66	1.93	0.45	1239	0.207
11.15	54.41	1.81	0.43	1258	0.221
11.30	52.13	1.69	0.40	1264	0.235
11.45	50.27	1.60	0.38	1295	0.241
12.00	48.60	1.51	0.36	1297	0.248
12.15	47.20	1.44	0.34	1291	0.258
12.30	45.77	1.37	0.32	1287	0.259
12.45	44.74	1.31	0.31	1251	0.265
13.00	43.86	1.27	0.30	1244	0.271
13.15	42.85	1.21	0.29	1223	0.280
13.30	42.00	1.17	0.28	1216	0.280
13.45	41.18	1.13	0.27	1194	0.288
14.00	40.45	1.09	0.26	1188	0.288
14.15	39.66	1.05	0.25	1176	0.296
14.30	38.99	1.01	0.24	974.5	0.296
14.45	38.41	0.99	0.23	965.2	0.296
15.00	37.83	0.96	0.22	817.3	0.304

ตาราง ก-1 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	37.41	0.93	0.22	798.3	0.304
15.30	37.06	0.92	0.22	763.4	0.304
15.45	36.60	0.89	0.21	81.3	0.312
16.00	36.39	0.88	0.21	78.4	0.325
16.15	35.73	0.85	0.20	66.8	0.333
16.30	35.25	0.82	0.19	52.7	0.347
16.45	34.92	0.80	0.19	52.8	0.363
17.00	34.47	0.78	0.18	47.9	0.377
9.00	34.47	0.78	0.18	803.4	0.377
9.15	33.82	0.75	0.18	882.7	0.384
9.30	33.42	0.73	0.17	954.2	0.387
9.45	32.75	0.69	0.16	981.8	0.392
10.00	32.36	0.67	0.16	1059	0.402
10.15	31.84	0.65	0.15	1142	0.406
10.30	31.42	0.62	0.15	1189	0.416
10.45	30.93	0.60	0.14	1235	0.421
11.00	30.44	0.57	0.13	1268	0.423
11.15	29.99	0.55	0.13	1289	0.430
11.30	29.56	0.53	0.12	1297	0.435
11.45	29.07	0.50	0.12	1321	0.435
12.00	28.68	0.48	0.11	1298	0.439
12.15	28.25	0.46	0.11	1304	0.439
12.30	27.86	0.44	0.10	1298	0.444
12.45	27.52	0.42	0.10	1289	0.444

ตาราง ก-1 (ต่อ) เวลา น้ำหนัก ความชื้น อัตราส่วนความชื้น และความเข้มรังสีอาทิตย์ที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	27.10	0.40	0.09	1275	0.449
13.15	26.85	0.39	0.09	1254	0.449
13.30	26.19	0.35	0.08	1231	0.449
13.45	26.15	0.35	0.08	1176	0.454
14.00	25.79	0.33	0.08	1106	0.454
14.15	25.46	0.32	0.07	1043	0.454
14.30	25.09	0.30	0.07	965.3	0.459
14.45	24.85	0.28	0.07	889.4	0.459
15.00	24.67	0.27	0.06	823.7	0.459
15.15	24.31	0.26	0.06	753.2	0.464
15.30	24.05	0.24	0.06	143.6	0.469
15.45	23.84	0.23	0.05	67.9	0.475
16.00	23.61	0.22	0.05	64.1	0.48
16.15	23.43	0.21	0.05	61.7	0.485
16.30	23.16	0.20	0.05	51.7	0.495
16.45	22.93	0.19	0.04	39.4	0.501
17.00	22.71	0.17	0.04	28.8	0.511
9.00	22.71	0.17	0.04	815.6	0.511
9.15	22.41	0.16	0.04	897.2	0.535
9.30	22.31	0.15	0.04	960.1	0.549
9.45	22.05	0.14	0.03	1057	0.568
10.00	21.87	0.13	0.03	1115	0.581

ตาราง ก-2 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	105.40	3.97	1.00	811.9	0.000
9.15	90.96	3.29	0.83	806.9	0.098
9.30	79.94	2.77	0.70	945.3	0.150
9.45	71.96	2.40	0.60	995.2	0.200
10.00	64.45	2.04	0.51	788.5	0.241
10.15	60.41	1.85	0.47	1061	0.269
10.30	56.43	1.66	0.42	867	0.299
10.45	53.27	1.51	0.38	556.5	0.304
11.00	50.48	1.38	0.35	1001	0.317
11.15	48.21	1.28	0.32	886.2	0.327
11.30	46.65	1.20	0.30	1083	0.335
11.45	45.17	1.13	0.29	1275	0.340
12.00	44.21	1.09	0.27	889.4	0.355
12.15	43.11	1.03	0.26	1397	0.366
12.30	42.32	1.00	0.25	1240	0.374
12.45	41.56	0.96	0.24	1250	0.380
13.00	40.89	0.93	0.23	1193	0.387
13.15	40.15	0.89	0.23	1058	0.399
13.30	39.52	0.87	0.22	1095	0.405
13.45	38.96	0.84	0.21	1058	0.412
14.00	38.54	0.82	0.21	993.4	0.425
14.15	38.15	0.80	0.20	916.5	0.432
14.30	37.71	0.78	0.20	811.9	0.438
14.45	37.21	0.76	0.19	793.5	0.452
15.00	36.88	0.74	0.19	731.5	0.465

ตาราง ก-2 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	36.41	0.72	0.18	721.3	0.479
15.30	35.96	0.70	0.18	632.2	0.496
15.45	35.54	0.68	0.17	573.9	0.513
16.00	34.93	0.65	0.16	465.4	0.533
16.15	34.56	0.63	0.16	421.9	0.533
16.30	34.03	0.61	0.15	367.9	0.552
16.45	33.47	0.58	0.15	324.5	0.576
17.00	32.98	0.56	0.14	204.7	0.581
9.00	32.98	0.56	0.14	904.2	0.581
9.15	32.47	0.53	0.13	799.4	0.607
9.30	32.04	0.51	0.13	999.4	0.636
9.45	31.58	0.49	0.12	1059	0.649
10.00	31.17	0.47	0.12	497.7	0.669
10.15	30.61	0.44	0.11	606.2	0.684
10.30	30.14	0.42	0.11	579.9	0.698
10.45	29.74	0.40	0.10	542.4	0.707
11.00	29.31	0.38	0.10	844.1	0.715
11.15	28.84	0.36	0.09	712.1	0.728
11.30	28.62	0.35	0.09	756.7	0.735
11.45	28.37	0.34	0.09	121.3	0.740
12.00	28.07	0.32	0.08	355.5	0.747
12.15	27.79	0.31	0.08	341.9	0.759
12.30	27.57	0.30	0.08	1082	0.764
12.45	27.24	0.29	0.07	1201	0.777

ตาราง ก-2 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	26.97	0.27	0.07	547.3	0.783
13.15	26.71	0.26	0.07	1030	0.789
13.30	26.52	0.25	0.06	370.2	0.799
13.45	26.25	0.24	0.06	1146	0.811
14.00	26.02	0.23	0.06	1070	0.815
14.15	25.87	0.22	0.06	1020	0.821
14.30	25.61	0.21	0.05	950.1	0.839
14.45	25.47	0.20	0.05	875.1	0.851
15.00	25.22	0.19	0.05	819.1	0.870
15.15	24.79	0.17	0.04	733.9	0.880
15.30	24.62	0.16	0.04	133.8	0.908
15.45	24.44	0.15	0.04	75.4	0.937
16.00	24.18	0.14	0.04	65.2	0.973
16.15	24.13	0.14	0.03	61.5	1.012
16.30	24.07	0.14	0.03	50.5	1.051
16.45	24.01	0.13	0.03	50.3	1.081
17.00	23.95	0.130	0.03	38.6	1.105

ตาราง ก-3 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

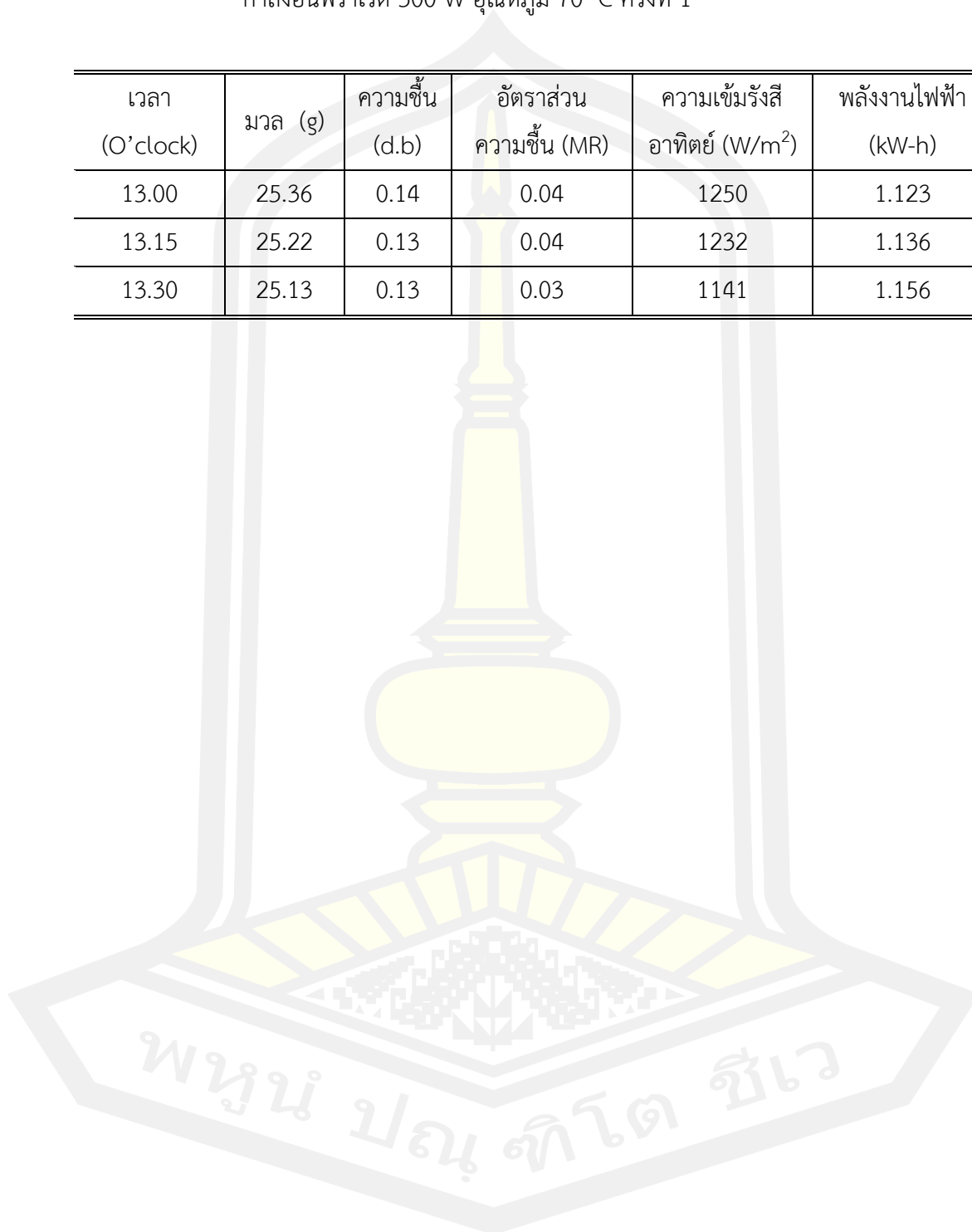
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	106.8	3.80	1.00	562.3	0.000
9.15	84.14	2.78	0.73	679.6	0.077
9.30	66.39	1.99	0.52	834.2	0.119
9.45	57.34	1.58	0.42	996.7	0.164
10.00	51.75	1.33	0.35	864.7	0.201
10.15	49.49	1.23	0.32	1003	0.228
10.30	47.21	1.12	0.30	1132	0.256
10.45	46.03	1.07	0.28	998.8	0.285
11.00	45.07	1.03	0.27	1045	0.308
11.15	43.94	0.98	0.26	1028	0.328
11.30	43.08	0.94	0.25	1216	0.349
11.45	42.27	0.90	0.24	907.6	0.367
12.00	41.63	0.87	0.23	994.7	0.384
12.15	40.71	0.83	0.22	1003	0.400
12.30	40.15	0.81	0.21	1201	0.416
12.45	39.57	0.78	0.21	997.9	0.435
13.00	38.84	0.75	0.20	1185	0.449
13.15	38.13	0.71	0.19	1003	0.468
13.30	37.61	0.69	0.18	943.2	0.483
13.45	37.28	0.68	0.18	743.7	0.498
14.00	36.63	0.65	0.17	983.6	0.513
14.15	36.12	0.62	0.16	998.7	0.528
14.30	35.64	0.60	0.16	997.3	0.543
14.45	35.23	0.58	0.15	1023	0.564
15.00	34.88	0.57	0.15	1012	0.583

ตาราง ก-3 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	34.26	0.54	0.14	1031	0.596
15.30	33.62	0.51	0.13	1056	0.617
15.45	33.21	0.49	0.13	698.3	0.643
16.00	32.61	0.47	0.12	1012	0.671
16.15	32.16	0.45	0.12	1127	0.700
16.30	31.54	0.42	0.11	1132	0.730
16.45	30.98	0.39	0.10	732.2	0.757
17.00	30.39	0.37	0.10	632.6	0.787
9.00	30.39	0.37	0.10	876.3	0.790
9.15	29.89	0.34	0.09	874.7	0.818
9.30	29.37	0.32	0.08	903.2	0.849
9.45	28.86	0.30	0.08	927.5	0.875
10.00	28.39	0.28	0.07	1054	0.899
10.15	27.94	0.26	0.07	1087	0.924
10.30	27.53	0.24	0.06	1034	0.946
10.45	27.17	0.22	0.06	1089	0.967
11.00	26.78	0.20	0.05	1126	0.989
11.15	26.43	0.19	0.05	1189	1.008
11.30	26.08	0.17	0.05	1205	1.024
11.45	25.97	0.17	0.04	1223	1.042
12.00	25.8	0.16	0.04	1167	1.061
12.15	25.73	0.16	0.04	1239	1.075
12.30	25.6	0.15	0.04	1283	1.092
12.45	25.49	0.15	0.04	1284	1.108

ตาราง ก-3 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	25.36	0.14	0.04	1250	1.123
13.15	25.22	0.13	0.04	1232	1.136
13.30	25.13	0.13	0.03	1141	1.156



ตาราง ก-4 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	อัตราการอบแห้ง kg/h
9.00	101.27	6.39	1.00	792.4	0.000
9.15	87.96	5.42	0.85	450.2	0.068
9.30	73.44	4.36	0.68	884.8	0.097
9.45	59.74	3.36	0.53	694.6	0.115
10.00	51.77	2.78	0.43	1109	0.136
10.15	47.14	2.44	0.38	1049	0.136
10.30	43.60	2.18	0.34	1027	0.158
10.45	39.96	1.92	0.30	1105	0.163
11.00	36.95	1.70	0.27	1036	0.165
11.15	34.57	1.52	0.24	1076	0.168
11.30	32.58	1.38	0.22	1112	0.168
11.45	30.91	1.26	0.20	1184	0.168
12.00	29.46	1.15	0.18	1139	0.168
12.15	28.22	1.06	0.17	1122	0.168
12.30	27.14	0.98	0.15	749.6	0.168
12.45	26.26	0.92	0.14	529.7	0.168
13.00	25.55	0.86	0.14	910.3	0.169
13.15	24.53	0.79	0.12	1100	0.169
13.30	24.33	0.78	0.12	677.6	0.169
13.45	23.92	0.75	0.12	756.2	0.169
14.00	23.49	0.71	0.11	903.8	0.169
14.15	23.09	0.68	0.11	983.4	0.169
14.30	22.69	0.66	0.10	1010	0.169
14.45	22.24	0.62	0.10	656.8	0.169
15.00	21.93	0.60	0.09	688.3	0.169

ตาราง ก-4 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	21.55	0.57	0.09	676	0.169
15.30	21.29	0.55	0.09	664.7	0.169
15.45	21.07	0.54	0.08	701.4	0.169
16.00	20.86	0.52	0.08	694.9	0.169
16.15	20.61	0.50	0.08	386.4	0.169
16.30	20.41	0.49	0.08	474.3	0.169
16.45	20.21	0.47	0.07	372.7	0.169
17.00	20.05	0.46	0.07	331.7	0.169
9.00	20.05	0.46	0.07	922.2	0.169
9.15	19.81	0.45	0.07	788.6	0.269
9.30	19.54	0.43	0.07	895.2	0.301
9.45	19.37	0.41	0.06	953.1	0.328
10.00	19.22	0.40	0.06	968.8	0.349
10.15	19.07	0.39	0.06	1025	0.354
10.30	18.91	0.38	0.06	1081	0.366
10.45	18.73	0.37	0.06	1120	0.374
11.00	18.62	0.36	0.06	284.2	0.381
11.15	18.50	0.35	0.05	1226	0.393
11.30	18.37	0.34	0.05	360.8	0.393
11.45	18.25	0.33	0.05	1245	0.393
12.00	18.09	0.32	0.05	1267	0.393
12.15	17.95	0.31	0.05	427.7	0.393
12.30	17.85	0.30	0.05	1230	0.393
12.45	17.72	0.29	0.05	1140	0.393

ตาราง ก-4 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	17.57	0.28	0.04	1193	0.393
13.15	17.42	0.27	0.04	1156	0.393
13.30	17.29	0.26	0.04	1148	0.393
13.45	17.19	0.25	0.04	280.3	0.393
14.00	17.07	0.25	0.04	189.7	0.393
14.15	16.97	0.24	0.04	992.3	0.393
14.30	16.81	0.23	0.04	971.5	0.393
14.45	16.66	0.22	0.03	792.5	0.393
15.00	16.51	0.20	0.03	349.7	0.393
15.15	16.40	0.20	0.03	731.1	0.393
15.30	16.30	0.19	0.03	455.7	0.393
15.45	16.20	0.18	0.03	596.3	0.393
16.00	16.10	0.18	0.03	128.4	0.393
16.15	16.03	0.17	0.03	421.5	0.393
16.30	15.98	0.17	0.03	370.9	0.393
16.45	15.93	0.16	0.03	310.8	0.401
17.00	15.88	0.16	0.02	247.3	0.410
9.00	15.88	0.16	0.02	714.7	0.410
9.15	15.65	0.14	0.02	809.5	0.440
9.30	15.61	0.14	0.02	842.1	0.465
9.45	15.54	0.13	0.02	898.4	0.465
10.00	15.47	0.129	0.02	959.4	0.473

ตาราง ก- 5 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

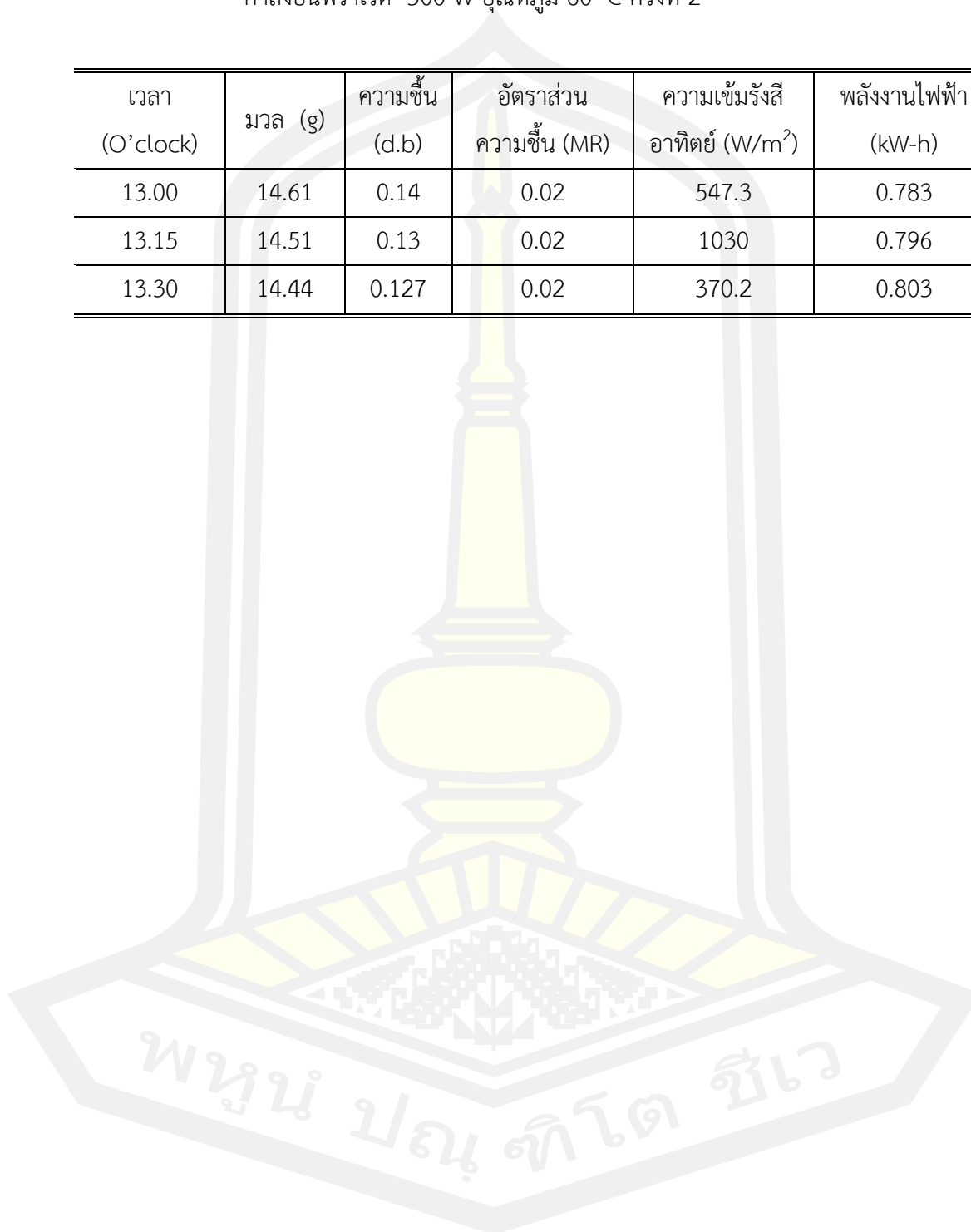
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	98.83	6.72	1.00	811.9	0.000
9.15	82.32	5.43	0.81	806.9	0.090
9.30	65.49	4.11	0.61	945.3	0.121
9.45	53.66	3.19	0.47	995.2	0.153
10.00	45.23	2.53	0.38	788.5	0.172
10.15	38.83	2.03	0.30	1061	0.194
10.30	33.8	1.64	0.24	867	0.210
10.45	30.01	1.34	0.20	556.5	0.230
11.00	26.79	1.09	0.16	1001	0.254
11.15	24.59	0.92	0.14	886.2	0.276
11.30	23.08	0.80	0.12	1083	0.291
11.45	22.04	0.72	0.11	1275	0.299
12.00	21.22	0.66	0.10	889.4	0.306
12.15	20.68	0.61	0.09	1397	0.316
12.30	20.24	0.58	0.09	1240	0.318
12.45	19.83	0.55	0.08	1250	0.328
13.00	19.54	0.53	0.08	1193	0.334
13.15	19.29	0.51	0.08	1058	0.343
13.30	19.11	0.49	0.07	1095	0.348
13.45	18.94	0.48	0.07	1058	0.354
14.00	18.72	0.46	0.07	993.4	0.358
14.15	18.5	0.44	0.07	916.5	0.362
14.30	18.32	0.43	0.06	811.9	0.368
14.45	18.11	0.41	0.06	793.5	0.371
15.00	17.92	0.40	0.06	731.5	0.374

ตาราง ก-5 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	17.78	0.39	0.06	721.3	0.377
15.30	17.65	0.38	0.06	632.2	0.379
15.45	17.52	0.37	0.05	573.9	0.387
16.00	17.42	0.36	0.05	465.4	0.398
16.15	17.32	0.35	0.05	421.9	0.408
16.30	17.22	0.34	0.05	367.9	0.417
16.45	17.16	0.34	0.05	324.5	0.431
17.00	17.08	0.33	0.05	204.7	0.450
9.00	17.16	0.33	0.05	904.2	0.450
9.15	16.76	0.31	0.05	799.4	0.495
9.30	16.6	0.30	0.04	999.4	0.523
9.45	16.43	0.28	0.04	1059	0.543
10.00	16.26	0.27	0.04	497.7	0.565
10.15	16.1	0.26	0.04	606.2	0.585
10.30	15.97	0.25	0.04	579.9	0.606
10.45	15.83	0.24	0.04	542.4	0.631
11.00	15.69	0.22	0.03	844.1	0.649
11.15	15.55	0.21	0.03	712.1	0.670
11.30	15.41	0.20	0.03	756.7	0.690
11.45	15.24	0.19	0.03	121.3	0.690
12.00	15.01	0.17	0.03	355.5	0.722
12.15	14.9	0.16	0.02	341.9	0.738
12.30	14.8	0.16	0.02	1082	0.753
12.45	14.71	0.15	0.02	1201	0.769

ตาราง ก-5 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	14.61	0.14	0.02	547.3	0.783
13.15	14.51	0.13	0.02	1030	0.796
13.30	14.44	0.127	0.02	370.2	0.803



ตาราง ก-6 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	102.20	6.26	1.00	606.6	0.000
9.15	80.62	4.73	0.76	484.9	0.091
9.30	61.63	3.38	0.54	491.4	0.144
9.45	46.99	2.34	0.37	477.7	0.191
10.00	37.80	1.69	0.27	668.5	0.233
10.15	31.68	1.25	0.20	466.1	0.268
10.30	27.90	0.98	0.16	813.4	0.303
10.45	25.54	0.82	0.13	953.7	0.327
11.00	24.00	0.71	0.11	1029	0.349
11.15	23.00	0.63	0.10	1142	0.370
11.30	22.20	0.58	0.09	1140	0.384
11.45	21.89	0.56	0.09	1181	0.407
12.00	21.49	0.53	0.08	884	0.418
12.15	21.22	0.51	0.08	719.3	0.436
12.30	20.99	0.49	0.08	730.2	0.450
12.45	20.80	0.48	0.08	694.7	0.469
13.00	20.65	0.47	0.07	629.2	0.487
13.15	20.47	0.45	0.07	590.4	0.509
13.30	20.34	0.45	0.07	827	0.530
13.45	20.17	0.43	0.07	692	0.546
14.00	20.02	0.42	0.07	858.9	0.560
14.15	19.80	0.41	0.07	968.9	0.571
14.30	19.60	0.39	0.06	949	0.581
14.45	19.38	0.38	0.06	861.2	0.589
15.00	19.11	0.36	0.06	884.4	0.603

ตาราง ก-6 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	18.93	0.35	0.06	690.2	0.613
15.30	18.75	0.33	0.05	854.2	0.627
15.45	18.54	0.32	0.05	508.9	0.637
16.00	18.43	0.31	0.05	524.6	0.652
16.15	18.35	0.30	0.05	275.7	0.666
16.30	18.29	0.30	0.05	201.9	0.690
16.45	18.24	0.30	0.05	200.4	0.713
17.00	18.23	0.30	0.05	129.5	0.736
9.00	18.23	0.30	0.05	685.7	0.736
9.15	18.07	0.28	0.05	796.7	0.913
9.30	17.90	0.27	0.04	804.6	0.950
9.45	17.71	0.26	0.04	915	1.011
10.00	17.48	0.24	0.04	959.2	1.071
10.15	17.29	0.23	0.04	978.6	1.129
10.30	17.08	0.21	0.03	1027	1.178
10.45	16.93	0.20	0.03	1058	1.227
11.00	16.75	0.19	0.03	1119	1.275
11.15	16.62	0.18	0.03	1133	1.309
11.30	16.45	0.17	0.03	1174	1.355
11.45	16.28	0.16	0.03	1197	1.394
12.00	16.12	0.15	0.02	1049	1.431
12.15	15.97	0.14	0.02	1258	1.472
12.30	15.81	0.124	0.02	1287	1.510

ตาราง ก- 7 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	112.43	4.06	1.00	851.4	0.000
9.15	101.81	3.58	0.88	889.7	0.068
9.30	92.85	3.18	0.78	893.4	0.097
9.45	85.75	2.86	0.70	898.5	0.115
10.00	79.39	2.57	0.63	965.8	0.136
10.15	74.49	2.35	0.58	998.3	0.148
10.30	69.96	2.15	0.53	1123	0.148
10.45	66.27	1.98	0.49	1135	0.148
11.00	63.1	1.84	0.45	1127	0.148
11.15	60.64	1.73	0.43	1132	0.148
11.30	58.14	1.62	0.40	1118	0.156
11.45	56.1	1.52	0.38	1178	0.157
12.00	54.27	1.44	0.35	1127	0.158
12.15	52.74	1.37	0.34	1138	0.158
12.30	51.17	1.30	0.32	1120	0.158
12.45	50.04	1.25	0.31	895.4	0.158
13.00	49.08	1.21	0.30	997.6	0.158
13.15	47.97	1.16	0.29	994.3	0.164
13.30	47.04	1.12	0.27	1112	0.164
13.45	46.14	1.08	0.26	1124	0.164
14.00	45.34	1.04	0.26	1210	0.164
14.15	44.48	1.00	0.25	998.7	0.164
14.30	43.74	0.97	0.24	1123	0.167
14.45	43.11	0.94	0.23	856.7	0.167
15.00	42.47	0.91	0.22	759.8	0.167

ตาราง ก-7 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	42.01	0.89	0.22	1131	0.169
15.30	41.63	0.87	0.21	1261	0.169
15.45	41.13	0.85	0.21	892.5	0.169
16.00	40.90	0.84	0.21	641.2	0.169
16.15	40.55	0.82	0.20	432.4	0.169
16.30	39.65	0.78	0.19	438.7	0.169
16.45	39.29	0.77	0.19	356.1	0.169
17.00	38.90	0.75	0.18	298.7	0.169
9.00	38.90	0.75	0.18	983.5	0.169
9.15	38.08	0.71	0.18	892.5	0.263
9.30	37.64	0.69	0.17	916.4	0.298
9.45	36.91	0.66	0.16	982.9	0.322
10.00	36.48	0.64	0.16	999.2	0.343
10.15	35.91	0.62	0.15	987.3	0.348
10.30	35.45	0.59	0.15	1007	0.370
10.45	34.91	0.57	0.14	1126	0.376
11.00	34.38	0.55	0.13	1129	0.386
11.15	33.89	0.52	0.13	563.6	0.397
11.30	33.41	0.50	0.12	1185	0.398
11.45	32.88	0.48	0.12	1217	0.398
12.00	32.45	0.46	0.11	1229	0.400
12.15	31.98	0.44	0.11	1167	0.400
12.30	31.55	0.42	0.10	1176	0.400
12.45	31.18	0.40	0.10	1128	0.400

ตาราง ก-7 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	30.72	0.38	0.09	587.8	0.400
13.15	30.45	0.37	0.09	943.8	0.400
13.30	29.72	0.34	0.08	1217	0.400
13.45	29.68	0.34	0.08	1173	0.400
14.00	29.28	0.32	0.08	854.3	0.400
14.15	28.92	0.30	0.07	886.9	0.400
14.30	28.52	0.28	0.07	732.5	0.400
14.45	28.25	0.27	0.07	761.4	0.400
15.00	27.95	0.26	0.06	287.6	0.400
15.15	27.78	0.25	0.06	658.2	0.400
15.30	27.75	0.25	0.06	653.7	0.400
15.45	27.75	0.25	0.06	558.2	0.400
16.00	27.75	0.25	0.06	469.7	0.400
16.15	27.72	0.25	0.06	441.3	0.401
16.30	27.72	0.25	0.06	351.8	0.401
16.45	27.21	0.22	0.06	325.6	0.401
17.00	26.89	0.21	0.05	210	0.401
9.00	26.89	0.21	0.05	873.4	0.401
9.15	26.02	0.17	0.04	818.3	0.429
9.30	25.76	0.16	0.04	893.1	0.454
9.45	25.35	0.14	0.03	905.7	0.462
10.00	24.99	0.12	0.03	1000.8	0.463

ตาราง ก-8 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	107.62	3.95	1.00	783.7	0.000
9.15	77.86	2.58	0.65	810.6	0.086
9.30	65.11	2.00	0.51	964.3	0.118
9.45	54.74	1.52	0.38	998.6	0.134
10.00	49.74	1.29	0.33	1005	0.169
10.15	44.19	1.03	0.26	1061	0.191
10.30	40.7	0.87	0.22	1128	0.208
10.45	38.8	0.79	0.20	1125	0.236
11.00	37.46	0.72	0.18	1001	0.249
11.15	35.03	0.61	0.15	834.7	0.278
11.30	33.86	0.56	0.14	1004	0.297
11.45	32.76	0.51	0.13	1176	0.301
12.00	32.5	0.50	0.13	908.2	0.308
12.15	31.79	0.46	0.12	1349	0.314
12.30	30.91	0.42	0.11	1294	0.319
12.45	30.52	0.40	0.10	1302	0.330
13.00	29.47	0.36	0.09	1173	0.335
13.15	28.88	0.33	0.08	1007	0.339
13.30	28.48	0.31	0.08	1021	0.349
13.45	27.98	0.29	0.07	1389	0.356
14.00	27.85	0.28	0.07	1382	0.359
14.15	27.41	0.26	0.07	962.4	0.364
14.30	27.2	0.25	0.06	998.7	0.367
14.45	26.93	0.24	0.06	1012	0.371
15.00	26.71	0.23	0.06	1312	0.375

ตาราง ก-8 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	26.66	0.23	0.06	892.4	0.379
15.30	26.61	0.22	0.06	776.3	0.381
15.45	26.56	0.22	0.06	1017	0.387
16.00	26.52	0.22	0.06	1145	0.399
16.15	26.40	0.21	0.05	348.2	0.412
16.30	26.28	0.21	0.05	449.3	0.420
16.45	26.28	0.21	0.05	342.8	0.437
17.00	26.00	0.20	0.05	218.5	0.458
9.00	26.00	0.20	0.05	874.9	0.458
9.15	25.99	0.20	0.05	893.2	0.512
9.30	25.95	0.19	0.05	997.6	0.539
9.45	25.95	0.19	0.05	1009	0.552
10.00	25.94	0.19	0.05	1098	0.576
10.15	25.95	0.19	0.05	985.2	0.599
10.30	25.94	0.19	0.05	865.2	0.617
10.45	25.97	0.20	0.05	994.7	0.643
11.00	26.00	0.20	0.05	786.3	0.673
11.15	26.04	0.20	0.05	889.4	0.689
11.30	26.12	0.20	0.05	729.6	0.706
11.45	26.24	0.21	0.05	1014	0.741
12.00	26.17	0.20	0.05	1156	0.744
12.15	26.21	0.21	0.05	904.2	0.757
12.30	26.19	0.21	0.05	1173	0.773
12.45	26.15	0.20	0.05	1289	0.789

ตาราง ก-8 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	15.57	0.15	0.02	989.3	0.802
13.15	15.47	0.15	0.02	1172	0.814
13.30	15.38	0.14	0.02	997.6	0.827
13.45	15.26	0.13	0.02	1045	0.831
14.00	15.21	0.127	0.02	998.7	0.870
14.15	25.48	0.17	0.04	1089	0.870
14.30	25.32	0.17	0.04	1045	0.874
14.45	25.21	0.16	0.04	1125	0.874
15.00	25.07	0.15	0.04	1254	0.874
15.15	25	0.15	0.04	1148	0.874
15.30	24.89	0.15	0.04	1035	0.874
15.45	24.84	0.14	0.04	1054	0.874
16.00	24.78	0.14	0.04	897.6	0.874
16.15	24.73	0.14	0.03	1027	0.876
16.30	24.67	0.14	0.03	763.6	0.876
16.45	24.61	0.13	0.03	642.4	0.876
17.00	24.54	0.13	0.03	542.1	0.883

ตาราง ก-9 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	105.87	3.97	1.00	562.3	0.000
9.15	81.22	2.81	0.71	679.6	0.097
9.30	61.47	1.88	0.47	834.2	0.158
9.45	49.42	1.32	0.33	996.7	0.187
10.00	41.83	0.96	0.24	864.7	0.253
10.15	38.57	0.81	0.20	1003	0.272
10.30	35.59	0.67	0.17	1132	0.306
10.45	33.51	0.57	0.14	998.8	0.321
11.00	32.15	0.51	0.13	1045	0.351
11.15	31.12	0.46	0.12	1028	0.365
11.30	30.46	0.43	0.11	1216	0.387
11.45	29.85	0.40	0.10	907.6	0.392
12.00	29.41	0.38	0.10	994.7	0.426
12.15	29.09	0.36	0.09	1003	0.432
12.30	28.83	0.35	0.09	1201	0.446
12.45	28.55	0.34	0.09	997.9	0.471
13.00	28.32	0.33	0.08	1185	0.484
13.15	28.21	0.32	0.08	1003	0.513
13.30	27.99	0.31	0.08	943.2	0.528
13.45	27.86	0.31	0.08	743.7	0.548
14.00	27.71	0.30	0.08	983.6	0.561
14.15	27.6	0.29	0.07	998.7	0.572
14.30	27.42	0.29	0.07	997.3	0.586
14.45	27.31	0.28	0.07	1023	0.591
15.00	27.16	0.27	0.07	1012	0.606

ตาราง ก-9 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	27.04	0.27	0.07	1031	0.618
15.30	26.9	0.26	0.07	1056	0.625
15.45	26.79	0.26	0.06	698.3	0.638
16.00	26.69	0.25	0.06	1012	0.655
16.15	26.64	0.25	0.06	1127	0.679
16.30	26.62	0.25	0.06	1132	0.681
16.45	26.61	0.25	0.06	732.2	0.711
17.00	26.57	0.25	0.06	632.6	0.727
9.00	26.55	0.25	0.06	876.3	0.727
9.15	26.37	0.24	0.06	874.7	0.912
9.30	26.25	0.23	0.06	903.2	0.965
9.45	26.08	0.22	0.06	927.5	1.011
10.00	25.97	0.22	0.05	1054	1.075
10.15	25.82	0.21	0.05	1087	1.131
10.30	25.71	0.21	0.05	1034	1.176
10.45	25.55	0.20	0.05	1089	1.185
11.00	25.42	0.19	0.05	1126	1.219
11.15	25.31	0.19	0.05	1189	1.284
11.30	25.16	0.18	0.05	1205	1.348
11.45	25.05	0.17	0.04	1223	1.381
12.00	24.88	0.17	0.04	1167	1.411
12.15	24.81	0.16	0.04	1239	1.452
12.30	24.68	0.16	0.04	1283	1.465
12.45	24.57	0.15	0.04	1287	1.465

ตาราง ก-9 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	24.44	0.15	0.04	1308	1.465
13.15	24.3	0.14	0.04	1298	1.465
13.30	24.21	0.14	0.03	1465	1.465
13.45	24.13	0.13	0.03	1365	1.465
14.00	24.06	0.13	0.03	1276	1.468



ตาราง ก-10 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	98.67	4.04	1.00	767.30	0.000
9.15	86.06	3.40	0.84	778.10	0.085
9.30	77.79	2.97	0.74	863.80	0.158
9.45	70.48	2.60	0.64	903.60	0.199
10.00	64.95	2.32	0.57	964.30	0.252
10.15	61.14	2.12	0.53	998.70	0.280
10.30	58.28	1.98	0.49	1034.00	0.379
10.45	56.24	1.87	0.46	1093.00	0.335
11.00	54.27	1.77	0.44	1126.00	0.347
11.15	52.58	1.69	0.42	1174.00	0.359
11.30	50.87	1.60	0.40	1232.00	0.370
11.45	49.34	1.52	0.38	1265.00	0.382
12.00	48.07	1.46	0.36	1211.00	0.382
12.15	46.86	1.39	0.34	1258.00	0.393
12.30	45.72	1.34	0.33	1216.00	0.404
12.45	44.73	1.29	0.32	1205.00	0.404
13.00	43.54	1.22	0.30	1192.00	0.404
13.15	42.71	1.18	0.29	1194.00	0.404
13.30	41.88	1.14	0.28	1175.00	0.404
13.45	41.18	1.10	0.27	1202.00	0.404
14.00	40.63	1.08	0.27	1133.00	0.404
14.15	40.16	1.05	0.26	991.20	0.404
14.30	39.77	1.03	0.26	918.20	0.404
14.45	39.34	1.01	0.25	895.80	0.404
15.00	38.86	0.99	0.24	855.50	0.404

ตาราง ก-10 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	38.35	0.96	0.24	683.20	0.404
15.30	37.83	0.93	0.23	653.90	0.404
15.45	37.31	0.91	0.22	587.10	0.404
16.00	36.82	0.88	0.22	519.30	0.404
16.15	36.31	0.86	0.21	381.20	0.404
16.30	35.87	0.83	0.21	146.20	0.414
16.45	35.34	0.81	0.20	119.80	0.425
17.00	34.93	0.78	0.19	184.50	0.432
9.00	34.93	0.78	0.19	490.20	0.432
9.15	34.24	0.75	0.19	787.20	0.442
9.30	33.67	0.72	0.18	986.10	0.453
9.45	33.18	0.70	0.17	697.10	0.460
10.00	32.62	0.67	0.16	1028.00	0.470
10.15	32.05	0.64	0.16	1122.00	0.478
10.30	31.57	0.61	0.15	631.80	0.486
10.45	31.12	0.59	0.15	538.60	0.497
11.00	30.64	0.57	0.14	1085.00	0.509
11.15	30.36	0.55	0.14	430.90	0.520
11.30	30.05	0.54	0.13	1318.00	0.531
11.45	29.76	0.52	0.13	1121.00	0.531
12.00	29.43	0.50	0.12	1150.00	0.531
12.15	29.04	0.48	0.12	1192.00	0.542
12.30	28.63	0.46	0.11	1202.00	0.542
12.45	28.21	0.44	0.11	1197.00	0.542

ตาราง ก-10 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	27.74	0.42	0.10	1153.00	0.542
13.15	27.37	0.40	0.10	1152.00	0.542
13.30	26.72	0.37	0.09	1072.00	0.542
13.45	26.33	0.35	0.09	1084.00	0.542
14.00	25.92	0.32	0.08	1050.00	0.542
14.15	25.58	0.31	0.08	1028.00	0.542
14.30	25.24	0.29	0.07	945.30	0.542
14.45	24.92	0.27	0.07	908.50	0.542
15.00	24.53	0.25	0.06	701.40	0.542
15.15	24.16	0.23	0.06	587.60	0.542
15.30	23.82	0.22	0.05	658.10	0.542
15.45	23.48	0.20	0.05	542.90	0.542
16.00	23.18	0.18	0.05	478.20	0.542
16.15	22.83	0.17	0.04	399.10	0.542
16.30	22.51	0.15	0.04	275.30	0.553
16.45	22.09	0.13	0.03	230.20	0.564

ตาราง ก-11 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

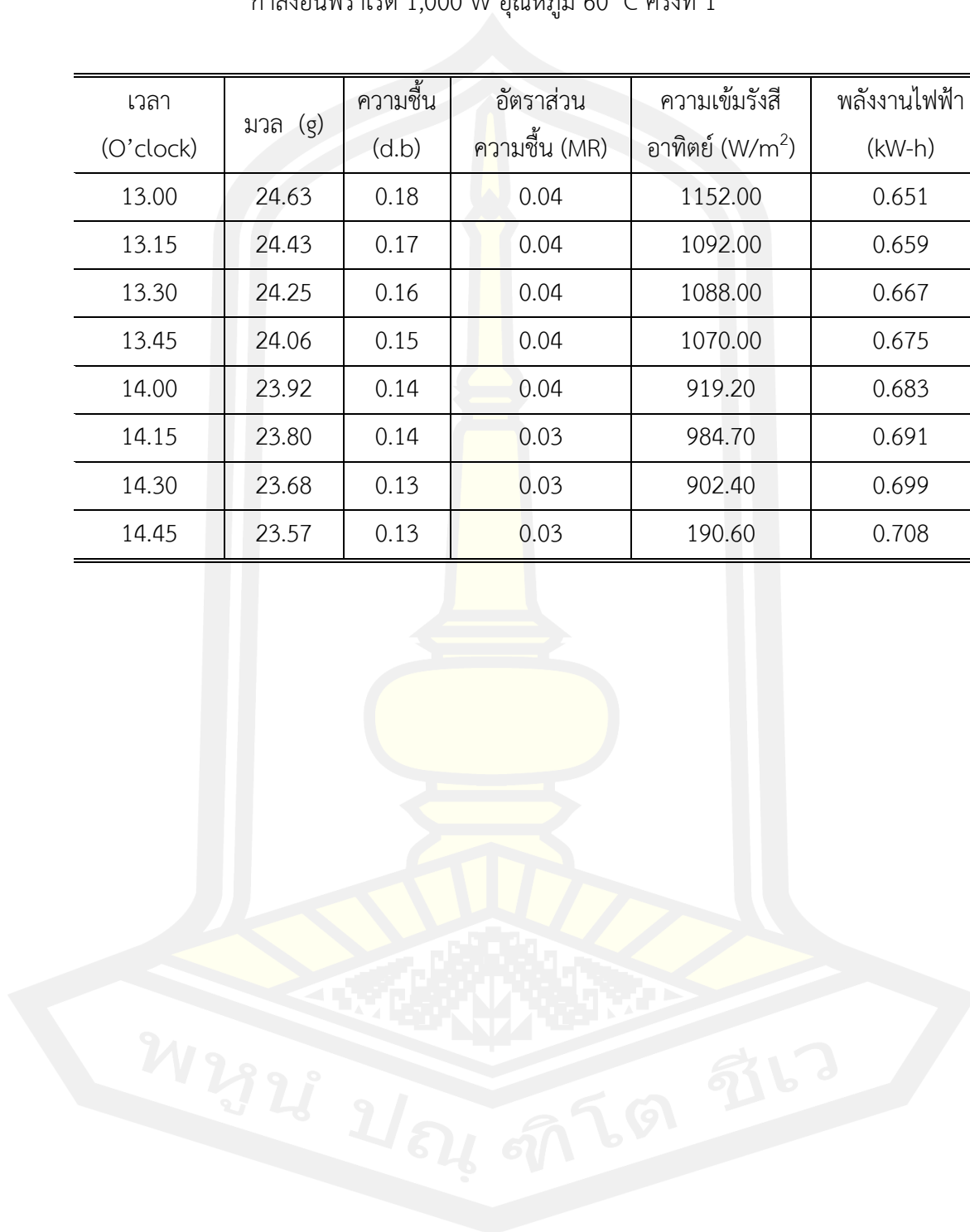
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	106.45	4.09	1.00	629.00	0.000
9.15	90.39	3.32	0.81	537.10	0.142
9.30	75.81	2.63	0.64	533.30	0.180
9.45	68.29	2.27	0.55	455.30	0.216
10.00	62.71	2.00	0.49	988.50	0.249
10.15	58.82	1.81	0.44	552.50	0.276
10.30	55.88	1.67	0.41	1216.00	0.309
10.45	53.42	1.55	0.38	672.40	0.332
11.00	51.35	1.46	0.36	716.50	0.355
11.15	49.33	1.36	0.33	464.40	0.377
11.30	47.55	1.27	0.31	1250.00	0.400
11.45	46.03	1.20	0.29	675.20	0.412
12.00	44.59	1.13	0.28	1218.00	0.443
12.15	43.23	1.07	0.26	1282.00	0.455
12.30	42.08	1.01	0.25	1288.00	0.467
12.45	41.01	0.96	0.24	1281.00	0.489
13.00	40.13	0.92	0.22	1187.00	0.500
13.15	39.32	0.88	0.22	1169.00	0.522
13.30	38.52	0.84	0.21	1060.00	0.532
13.45	37.84	0.81	0.20	300.50	0.551
14.00	37.18	0.78	0.19	948.30	0.563
14.15	36.63	0.75	0.18	836.60	0.582
14.30	35.95	0.72	0.18	845.40	0.593
14.45	35.39	0.69	0.17	106.50	0.609
15.00	34.78	0.66	0.16	104.40	0.363

ตาราง ก-11 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	34.23	0.64	0.16	104.50	0.372
15.30	33.72	0.61	0.15	102.60	0.381
15.45	33.25	0.59	0.14	103.20	0.391
16.00	32.58	0.56	0.14	101.80	0.404
16.15	32.07	0.53	0.13	98.60	0.416
16.30	31.52	0.51	0.12	97.40	0.435
16.45	31.05	0.48	0.12	770.20	0.435
17.00	30.64	0.47	0.11	742.20	0.435
9.00	30.64	0.47	0.11	853.90	0.451
9.15	30.12	0.44	0.11	899.70	0.474
9.30	29.55	0.41	0.10	964.30	0.489
9.45	29.04	0.39	0.10	1002.00	0.506
10.00	28.56	0.37	0.09	1043.00	0.519
10.15	28.13	0.35	0.08	1010.00	0.527
10.30	27.72	0.33	0.08	1163.00	0.543
10.45	27.43	0.31	0.08	1171.00	0.557
11.00	27.06	0.29	0.07	740.40	0.565
11.15	26.77	0.28	0.07	1395.00	0.582
11.30	26.42	0.26	0.06	1328.00	0.587
11.45	26.13	0.25	0.06	1397.00	0.602
12.00	25.76	0.23	0.06	1186.00	0.613
12.15	25.32	0.21	0.05	1257.00	0.623
12.30	25.07	0.20	0.05	1213.00	0.637
12.45	24.85	0.19	0.05	1203.00	0.645

ตาราง ก-11 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	24.63	0.18	0.04	1152.00	0.651
13.15	24.43	0.17	0.04	1092.00	0.659
13.30	24.25	0.16	0.04	1088.00	0.667
13.45	24.06	0.15	0.04	1070.00	0.675
14.00	23.92	0.14	0.04	919.20	0.683
14.15	23.80	0.14	0.03	984.70	0.691
14.30	23.68	0.13	0.03	902.40	0.699
14.45	23.57	0.13	0.03	190.60	0.708



ตาราง ก-12 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	106.36	4.20	1.00	701.10	0.000
9.15	80.66	2.94	0.70	783.80	0.101
9.30	61.28	2.00	0.48	857.50	0.153
9.45	49.90	1.44	0.34	903.30	0.187
10.00	43.43	1.12	0.27	972.60	0.227
10.15	40.07	0.96	0.23	1036.00	0.266
10.30	37.95	0.86	0.20	1072.00	0.291
10.45	36.05	0.76	0.18	1130.00	0.320
11.00	35.03	0.71	0.17	1172.00	0.347
11.15	34.19	0.67	0.16	1208.00	0.374
11.30	33.71	0.65	0.15	1225.00	0.401
11.45	33.22	0.62	0.15	1257.00	0.420
12.00	32.67	0.60	0.14	1230.00	0.442
12.15	32.21	0.58	0.14	1237.00	0.468
12.30	31.82	0.56	0.13	1228.00	0.481
12.45	31.48	0.54	0.13	1226.00	0.508
13.00	31.01	0.52	0.12	1195.00	0.521
13.15	30.64	0.50	0.12	1178.00	0.546
13.30	30.15	0.47	0.11	1131.00	0.556
13.45	29.68	0.45	0.11	1098.00	0.582
14.00	29.14	0.42	0.10	1075.00	0.592
14.15	28.77	0.41	0.10	1045.00	0.617
14.30	28.33	0.39	0.09	980.80	0.630
14.45	27.81	0.36	0.09	955.60	0.642
15.00	27.39	0.34	0.08	887.30	0.655

ตาราง ก-12 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	26.95	0.32	0.08	790.20	0.677
15.30	26.54	0.30	0.07	767.6	0.689
15.45	26.27	0.28	0.07	700.00	0.701
16.00	25.97	0.27	0.06	574.40	0.710
16.15	25.86	0.26	0.06	495.10	0.735
16.30	25.62	0.25	0.06	394.40	0.744
16.45	25.50	0.25	0.06	246.10	0.769
17.00	25.21	0.23	0.05	148.60	0.781
9.00	25.21	0.23	0.05	633.10	0.781
9.15	25.06	0.23	0.05	671.20	0.850
9.30	24.87	0.22	0.05	815.20	0.875
9.45	24.76	0.21	0.05	863.50	0.891
10.00	24.72	0.21	0.05	923.40	0.907
10.15	24.59	0.20	0.05	980.60	0.931
10.30	24.31	0.19	0.04	1033.00	0.945
10.45	24.06	0.18	0.04	1088.00	0.956
11.00	23.80	0.16	0.04	1120.00	0.972
11.15	23.55	0.15	0.04	11251.00	0.988
11.30	23.35	0.14	0.03	1185.00	1.004
11.45	23.13	0.13	0.031203	1208.00	1.012

ตาราง ก-13 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	121.62	6.47	1.00	740.2	0.000
9.15	102.82	5.31	0.82	784.5	0.039
9.30	84.74	4.20	0.65	868.6	0.067
9.45	70.38	3.32	0.51	898.2	0.091
10.00	59.8	2.67	0.41	985.8	0.107
10.15	52.76	2.24	0.35	1012	0.120
10.30	47.83	1.94	0.30	1062	0.135
10.45	43.67	1.68	0.26	1142	0.135
11.00	40.44	1.48	0.23	1244	0.148
11.15	37.88	1.33	0.20	1230	0.148
11.30	36	1.21	0.19	1226	0.148
11.45	34.26	1.10	0.17	1235	0.148
12.00	32.96	1.02	0.16	1298	0.148
12.15	31.53	0.94	0.14	1209	0.148
12.30	30.42	0.87	0.13	546.9	0.148
12.45	29.47	0.81	0.13	518.1	0.148
13.00	28.66	0.76	0.12	1192	0.148
13.15	28.04	0.72	0.11	350.8	0.148
13.30	27.46	0.69	0.11	400.3	0.156
13.45	26.92	0.65	0.10	326.6	0.156
14.00	26.47	0.62	0.10	426.6	0.166
14.15	26.11	0.60	0.09	305.1	0.176
14.30	25.76	0.58	0.09	217	0.186
14.45	25.45	0.56	0.09	310.6	0.195
15.00	25.21	0.55	0.08	614.2	0.195

ตาราง ก-13 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	25.04	0.54	0.08	771.1	0.195
15.30	24.67	0.51	0.08	689.5	0.195
15.45	24.31	0.49	0.08	299.6	0.195
16.00	24.09	0.48	0.07	505.3	0.195
16.15	23.91	0.47	0.07	420.2	0.195
16.30	23.73	0.46	0.07	159.2	0.205
16.45	23.53	0.44	0.07	144.9	0.215
17.00	23.43	0.44	0.07	123.3	0.225
9.00	23.43	0.44	0.07	751.3	0.225
9.15	23.09	0.42	0.06	773.9	0.229
9.30	22.93	0.41	0.06	845.5	0.234
9.45	22.77	0.40	0.06	896.9	0.236
10.00	22.55	0.38	0.06	812.8	0.242
10.15	22.36	0.37	0.06	912.7	0.242
10.30	22.21	0.36	0.06	829.5	0.242
10.45	22.05	0.35	0.05	1206	0.242
11.00	21.9	0.34	0.05	1076	0.242
11.15	21.7	0.33	0.05	1134	0.242
11.30	21.57	0.32	0.05	1152	0.242
11.45	21.39	0.31	0.05	1171	0.242
12.00	21.21	0.30	0.05	1200	0.242
12.15	21	0.29	0.04	1168	0.242
12.30	20.86	0.28	0.04	409.7	0.242
12.45	20.73	0.27	0.04	1188	0.242

ตาราง ก-13 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	20.53	0.26	0.04	1139	0.242
13.15	20.38	0.25	0.04	1156	0.242
13.30	20.22	0.24	0.04	1143	0.242
13.45	20.08	0.23	0.04	1130	0.242
14.00	19.91	0.22	0.03	1060	0.242
14.15	19.7	0.21	0.03	959.4	0.242
14.30	19.5	0.20	0.03	884.8	0.242
14.45	19.28	0.18	0.03	817.3	0.242
15.00	19.08	0.17	0.03	763.4	0.242
15.15	18.91	0.16	0.02	702.9	0.242
15.30	18.76	0.15	0.02	647.6	0.242
15.45	18.63	0.14	0.02	571.2	0.242
16.00	18.5	0.14	0.02	452.2	0.242
16.15	18.4	0.1295	0.02	82.9	0.242

ตาราง ก-14 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

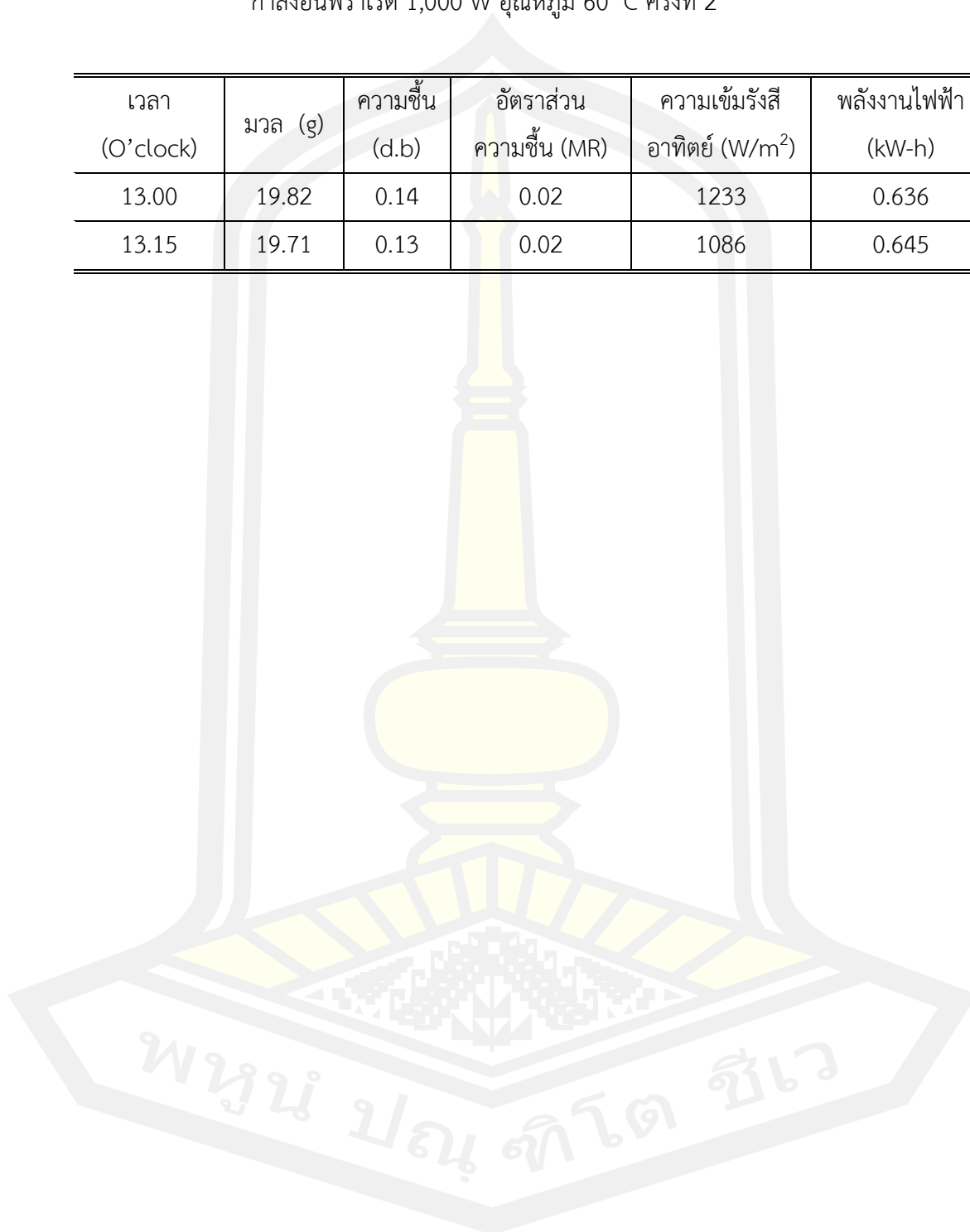
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	125.88	6.22	1.00	754.1	0.000
9.15	106.31	5.10	0.82	737.1	0.070
9.30	86.98	3.99	0.64	836.8	0.099
9.45	67.75	2.88	0.46	875.3	0.126
10.00	51.88	1.97	0.32	906.8	0.153
10.15	42.17	1.42	0.23	1001	0.178
10.30	36.69	1.10	0.18	1040	0.202
10.45	31.99	0.83	0.13	1072	0.213
11.00	29.72	0.70	0.11	1111	0.233
11.15	27.77	0.59	0.10	1073	0.244
11.30	27.07	0.55	0.09	1128	0.256
11.45	26.5	0.52	0.08	1125	0.264
12.00	26.12	0.50	0.08	1153	0.274
12.15	25.65	0.47	0.08	1135	0.285
12.30	25.3	0.45	0.07	1117	0.291
12.45	24.95	0.43	0.07	1108	0.295
13.00	24.71	0.42	0.07	1093	0.305
13.15	24.54	0.41	0.07	1093	0.305
13.30	24.33	0.40	0.06	1076	0.306
13.45	24.09	0.38	0.06	1043	0.315
14.00	23.8	0.36	0.06	966.8	0.315
14.15	23.69	0.36	0.06	877.4	0.324
14.30	23.4	0.34	0.05	846.4	0.334
14.45	23.21	0.33	0.05	371.2	0.344
15.00	23.03	0.32	0.05	756.7	0.354

ตาราง ก-14 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	22.9	0.31	0.05	279.6	0.363
15.30	22.72	0.30	0.05	637.8	0.363
15.45	22.53	0.29	0.05	527.2	0.372
16.00	22.39	0.28	0.05	477.4	0.381
16.15	22.22	0.27	0.04	374.1	0.391
16.30	22.05	0.26	0.04	287.2	0.404
16.45	21.89	0.26	0.04	258.2	0.416
17.00	21.78	0.25	0.04	143.5	0.435
9.00	21.78	0.25	0.04	670.9	0.435
9.15	21.68	0.24	0.04	731.4	0.460
9.30	21.58	0.24	0.04	562.9	0.486
9.45	21.49	0.23	0.04	862.4	0.504
10.00	21.35	0.22	0.04	934.7	0.514
10.15	21.21	0.22	0.03	541.8	0.538
10.30	21.09	0.21	0.03	719.9	0.549
10.45	20.93	0.20	0.03	1119	0.567
11.00	20.81	0.19	0.03	657.5	0.585
11.15	20.69	0.19	0.03	1226	0.594
11.30	20.57	0.18	0.03	1183	0.601
11.45	20.43	0.17	0.03	1185	0.610
12.00	20.32	0.17	0.03	1207	0.619
12.15	20.18	0.16	0.03	1226	0.619
12.30	20.04	0.15	0.02	915.1	0.628
12.45	19.97	0.15	0.02	1144	0.636

ตาราง ก-14 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	19.82	0.14	0.02	1233	0.636
13.15	19.71	0.13	0.02	1086	0.645



ตาราง ก-15 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	96.47	6.69	1.00	645.1	0.000
9.15	74.49	4.94	0.74	760.8	0.102
9.30	56.15	3.48	0.52	845.6	0.149
9.45	41.31	2.29	0.34	909.6	0.182
10.00	33.54	1.67	0.25	973.4	0.224
10.15	29.14	1.32	0.20	1023	0.228
10.30	25.73	1.05	0.16	1066	0.289
10.45	23.97	0.91	0.14	1102	0.318
11.00	22.25	0.77	0.12	1112	0.345
11.15	21.26	0.70	0.10	1164	0.371
11.30	20.36	0.62	0.09	1184	0.402
11.45	19.20	0.53	0.08	1178	0.423
12.00	18.43	0.47	0.07	1181	0.445
12.15	17.68	0.41	0.06	1158	0.458
12.30	17.23	0.37	0.06	1172	0.478
12.45	16.77	0.34	0.05	1158	0.504
13.00	16.60	0.32	0.05	1137	0.517
13.15	16.42	0.31	0.05	1115	0.543
13.30	16.33	0.30	0.05	1114	0.552
13.45	16.16	0.29	0.04	1042	0.578
14.00	16.04	0.28	0.04	984.8	0.589
14.15	15.91	0.27	0.04	984.9	0.618
14.30	15.71	0.25	0.04	920.2	0.627
14.45	15.55	0.24	0.04	863.9	0.645
15.00	15.44	0.23	0.03	752.9	0.658

ตาราง ก-15 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	15.30	0.22	0.03	699.8	0.671
15.30	15.14	0.21	0.03	602.3	0.687
15.45	14.94	0.19	0.03	553.5	0.692
16.00	14.87	0.19	0.03	305.3	0.712
16.15	14.77	0.18	0.03	110.9	0.732
16.30	14.73	0.17	0.03	113.6	0.739
16.45	14.72	0.17	0.03	134.6	0.758
17.00	14.71	0.17	0.03	63.9	0.778
9.00	14.71	0.17	0.03	716.5	0.778
9.15	14.62	0.17	0.02	319.2	0.799
9.30	14.54	0.16	0.02	404	0.820
9.45	14.46	0.15	0.02	405.6	0.846
10.00	14.37	0.15	0.02	872	0.868
10.15	14.3	0.14	0.02	922.5	0.883
10.30	14.14	0.128	0.02	984.2	0.906

ตาราง ก- 16 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	102.87	4.01	1.00	784.5	0.000
9.15	89.55	3.36	0.84	799.3	0.041
9.30	78.69	2.83	0.71	884.2	0.071
9.45	69.91	2.40	0.60	914.2	0.098
10.00	62.9	2.06	0.51	992.1	0.114
10.15	57.18	1.78	0.44	1017	0.124
10.30	52.36	1.55	0.39	1078	0.138
10.45	48.62	1.37	0.34	1258	0.142
11.00	45.66	1.22	0.30	1321	0.151
11.15	43.48	1.12	0.28	1319	0.154
11.30	41.46	1.02	0.25	1268	0.157
11.45	39.95	0.94	0.24	1282	0.157
12.00	38.29	0.86	0.22	1284	0.157
12.15	37.01	0.80	0.20	1163	0.160
12.30	35.91	0.75	0.19	1087	0.163
12.45	34.97	0.70	0.17	1172	0.163
13.00	34.24	0.67	0.17	1218	0.163
13.15	33.57	0.63	0.16	1089	0.163
13.30	32.95	0.60	0.15	1012	0.163
13.45	32.43	0.58	0.14	973.9	0.163
14.00	32.01	0.56	0.14	1132	0.163
14.15	31.6	0.54	0.13	1031	0.163
14.30	31.25	0.52	0.13	1004	0.178
14.45	30.96	0.51	0.13	1121	0.178
15.00	30.77	0.50	0.12	1003	0.178

ตาราง ก-16 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	30.34	0.48	0.12	893.6	0.184
15.30	29.93	0.46	0.11	873.2	0.184
15.45	29.66	0.44	0.11	732.1	0.184
16.00	29.46	0.43	0.11	704.7	0.184
16.15	29.24	0.42	0.11	698.2	0.197
16.30	29.02	0.41	0.10	592.5	0.208
16.45	28.9	0.41	0.10	432.8	0.217
17.00	28.84	0.40	0.10	227.6	0.229
9.00	28.51	0.39	0.10	886.4	0.229
9.15	28.32	0.38	0.09	923.7	0.236
9.30	28.14	0.37	0.09	984.5	0.239
9.45	27.89	0.36	0.09	1013	0.244
10.00	27.66	0.35	0.09	1032	0.247
10.15	27.48	0.34	0.08	1126	0.252
10.30	27.29	0.33	0.08	1158	0.252
10.45	27.14	0.32	0.08	1218	0.252
11.00	26.9	0.31	0.08	1259	0.252
11.15	26.76	0.30	0.08	1278	0.252
11.30	26.53	0.29	0.07	1284	0.252
11.45	26.33	0.28	0.07	1292	0.252
12.00	26.09	0.27	0.07	1221	0.252
12.15	25.92	0.26	0.07	1263	0.252
12.30	25.77	0.25	0.06	1174	0.252
12.45	25.54	0.24	0.06	1263	0.252

ตาราง ก-16 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	25.36	0.23	0.06	1278	0.252
13.15	25.18	0.23	0.06	1185	0.257
13.30	25.02	0.22	0.05	1172	0.257
13.45	24.82	0.21	0.05	1283	0.257
14.00	24.58	0.20	0.05	1304	0.257
14.15	24.34	0.18	0.05	1318	0.257
14.30	24.09	0.17	0.04	1285	0.257
14.45	23.86	0.16	0.04	1178	0.257
15.00	23.66	0.15	0.04	1192	0.257
15.15	23.48	0.14	0.04	1027	0.257
15.30	23.33	0.14	0.03	1172	0.257
15.45	23.18	0.128	0.03	1052	0.257

ตาราง ก-17 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

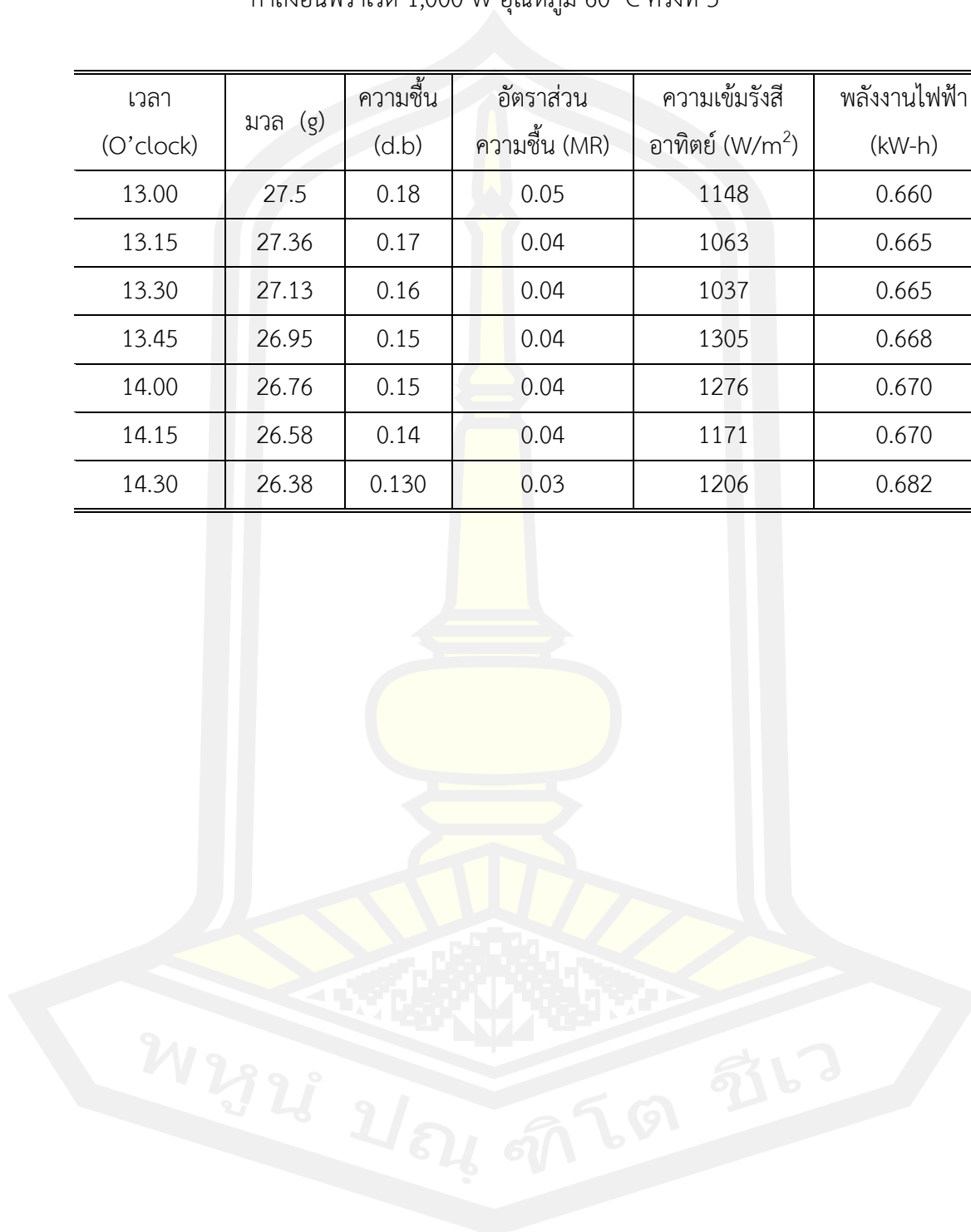
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	115.73	3.96	1.00	772.8	0.000
9.15	85.67	2.67	0.67	783.2	0.093
9.30	72.19	2.09	0.53	845.7	0.115
9.45	60.91	1.61	0.41	893.2	0.132
10.00	54.18	1.32	0.33	994.6	0.164
10.15	49.52	1.12	0.28	1076	0.183
10.30	46.54	0.99	0.25	1098	0.216
10.45	43.37	0.86	0.22	1182	0.228
11.00	41.69	0.79	0.20	1134	0.239
11.15	40.36	0.73	0.18	1178	0.248
11.30	38.79	0.66	0.17	1218	0.259
11.45	37.51	0.61	0.15	1238	0.268
12.00	36.36	0.56	0.14	1236	0.278
12.15	35.11	0.50	0.13	1263	0.292
12.30	34.65	0.48	0.12	1296	0.298
12.45	33.26	0.43	0.11	1205	0.305
13.00	32.95	0.41	0.10	1173	0.307
13.15	32.27	0.38	0.10	1231	0.308
13.30	32.00	0.37	0.09	1194	0.308
13.45	31.77	0.36	0.09	1006	0.308
14.00	30.84	0.32	0.08	1008	0.308
14.15	30.7	0.32	0.08	1121	0.318
14.30	30.33	0.30	0.08	1125	0.327
14.45	30.08	0.29	0.07	1219	0.332
15.00	29.85	0.28	0.07	1183	0.358

ตาราง ก-17 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	29.67	0.27	0.07	1176	0.367
15.30	29.44	0.26	0.07	1016	0.372
15.45	29.19	0.25	0.06	1032	0.384
16.00	29.01	0.24	0.06	961.3	0.392
16.15	28.78	0.23	0.06	852.6	0.399
16.30	28.57	0.22	0.06	592.4	0.412
16.45	28.36	0.22	0.05	226.5	0.431
17.00	28.3	0.21	0.05	186.4	0.447
9.00	28.3	0.21	0.05	725.4	0.447
9.15	28.27	0.21	0.05	884.7	0.464
9.30	28.24	0.21	0.05	932.4	0.495
9.45	28.19	0.21	0.05	972.1	0.519
10.00	28.15	0.21	0.05	998.4	0.528
10.15	28.38	0.22	0.05	1017	0.566
10.30	28.34	0.21	0.05	1074	0.571
10.45	28.3	0.21	0.05	1037	0.585
11.00	28.28	0.21	0.05	1149	0.600
11.15	28.17	0.21	0.05	1193	0.609
11.30	28.19	0.21	0.05	1192	0.615
11.45	28.19	0.21	0.05	1240	0.624
12.00	28.17	0.21	0.05	1243	0.636
12.15	27.97	0.20	0.05	1276	0.639
12.30	27.79	0.19	0.05	1321	0.642
12.45	27.69	0.19	0.05	1317	0.646

ตาราง ก-17 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	27.5	0.18	0.05	1148	0.660
13.15	27.36	0.17	0.04	1063	0.665
13.30	27.13	0.16	0.04	1037	0.665
13.45	26.95	0.15	0.04	1305	0.668
14.00	26.76	0.15	0.04	1276	0.670
14.15	26.58	0.14	0.04	1171	0.670
14.30	26.38	0.130	0.03	1206	0.682



ตาราง ก-18 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	101.93	4.08	1.00	676.5	0.000
9.15	79.64	2.97	0.73	889.3	0.114
9.30	64.70	2.22	0.55	998.2	0.153
9.45	55.76	1.78	0.44	1013	0.179
10.00	49.60	1.47	0.36	1024	0.217
10.15	45.44	1.26	0.31	1047	0.227
10.30	42.13	1.10	0.27	1087	0.295
10.45	39.70	0.98	0.24	1123	0.326
11.00	38.44	0.92	0.22	1217	0.352
11.15	36.98	0.84	0.21	1145	0.385
11.30	35.95	0.79	0.19	1185	0.418
11.45	35.10	0.75	0.18	1198	0.436
12.00	34.00	0.69	0.17	1175	0.451
12.15	33.16	0.65	0.16	1146	0.463
12.30	32.48	0.62	0.15	1187	0.481
12.45	31.20	0.55	0.14	1193	0.511
13.00	30.79	0.53	0.13	1198	0.521
13.15	30.26	0.51	0.12	1136	0.548
13.30	29.41	0.47	0.11	1138	0.559
13.45	29.53	0.47	0.12	1132	0.584
14.00	28.35	0.41	0.10	1143	0.593
14.15	28.00	0.40	0.10	1154	0.627
14.30	27.48	0.37	0.09	1121	0.636
14.45	26.89	0.34	0.08	1191	0.652
15.00	26.68	0.33	0.08	1175	0.663

ตาราง ก-18 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,000 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	26.12	0.30	0.07	972.4	0.678
15.30	25.78	0.28	0.07	906.5	0.691
15.45	25.62	0.28	0.07	723.4	0.698
16.00	25.33	0.26	0.06	442.3	0.717
16.15	25.23	0.26	0.06	226.7	0.736
16.30	25.00	0.25	0.06	213.7	0.745
16.45	24.88	0.24	0.06	178.5	0.767
17.00	24.61	0.23	0.06	173.2	0.782
9.00	24.61	0.23	0.06	886.4	0.782
9.15	24.46	0.22	0.05	903.2	0.808
9.30	24.28	0.21	0.05	931.5	0.834
9.45	24.18	0.20	0.05	976.3	0.855
10.00	24.14	0.20	0.05	994.7	0.894
10.15	24.02	0.20	0.05	1023	0.909
10.30	23.75	0.18	0.04	1038	0.920
10.45	23.51	0.17	0.04	1087	0.935
11.00	23.26	0.16	0.04	1142	0.946
11.15	23.02	0.15	0.04	1173	0.960
11.30	22.83	0.14	0.03	1159	0.965
11.45	22.62	0.13	0.03	1241	0.965

ตาราง ก-19 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

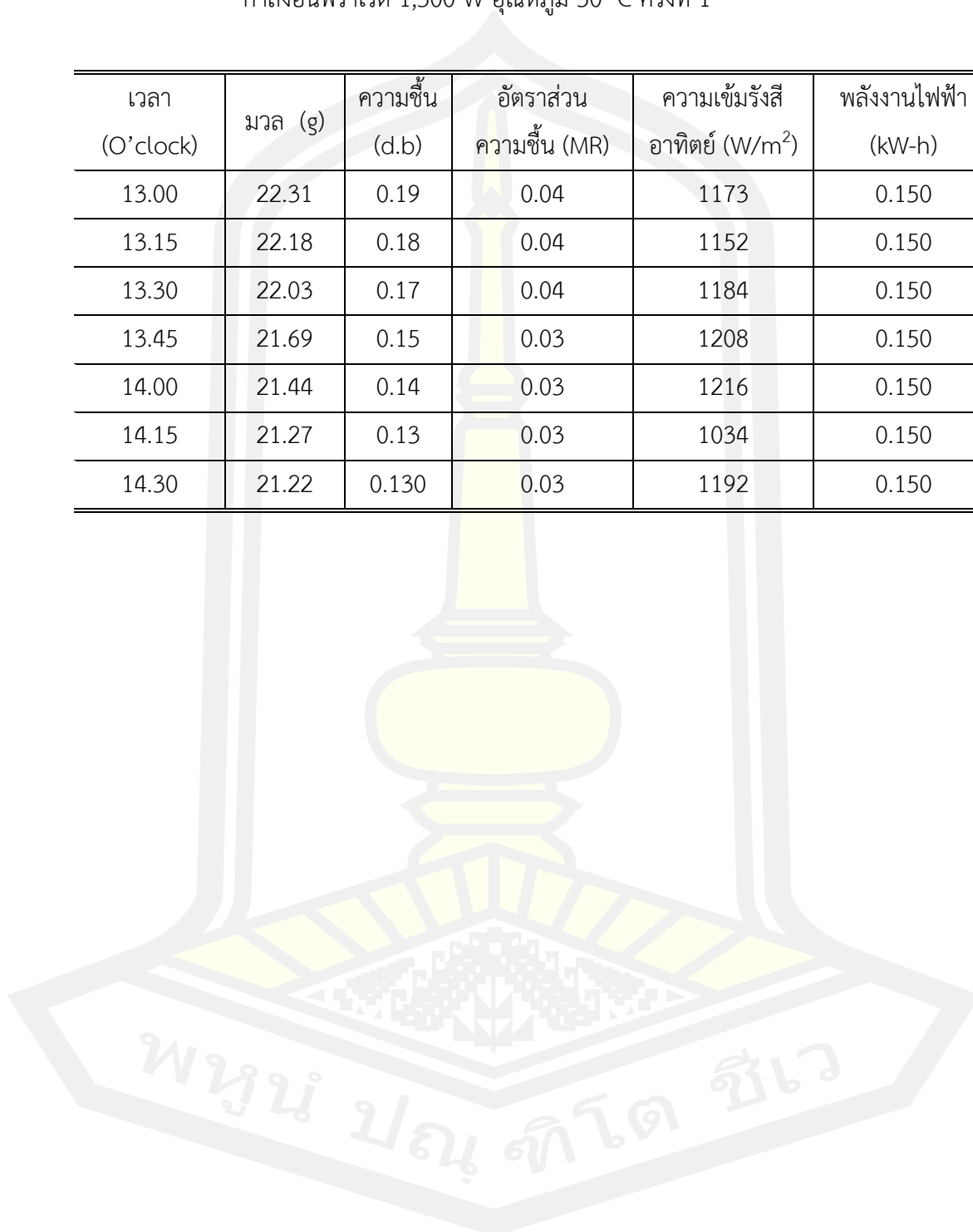
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	103.63	4.52	1.00	805.4	0.000
9.15	94.19	4.02	0.89	895.3	0.007
9.30	84.98	3.53	0.78	942.6	0.029
9.45	77.91	3.15	0.70	988.4	0.039
10.00	71.03	2.78	0.62	1032	0.056
10.15	65.21	2.47	0.55	1075	0.066
10.30	59.47	2.17	0.48	1098	0.076
10.45	54.95	1.93	0.43	1124	0.076
11.00	51.2	1.73	0.38	1187	0.086
11.15	47.41	1.52	0.34	1193	0.086
11.30	44.14	1.35	0.30	1232	0.086
11.45	41.38	1.20	0.27	1254	0.086
12.00	39.41	1.10	0.24	1278	0.086
12.15	37.85	1.02	0.22	1186	0.086
12.30	36.73	0.96	0.21	1197	0.086
12.45	35.49	0.89	0.20	1173	0.086
13.00	33.93	0.81	0.18	637	0.086
13.15	32.95	0.75	0.17	1031	0.086
13.30	32.05	0.71	0.16	1093	0.086
13.45	31.11	0.66	0.15	1085	0.086
14.00	30.34	0.62	0.14	1034	0.086
14.15	29.59	0.58	0.13	1021	0.086
14.30	28.84	0.54	0.12	1076	0.108
14.45	28.18	0.50	0.11	1203	0.111
15.00	27.75	0.48	0.11	963.2	0.128

ตาราง ก-19 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	27.41	0.46	0.10	1021	0.108
15.30	27.1	0.44	0.10	972.7	0.108
15.45	26.85	0.4297	0.10	863.7	0.108
16.00	26.74	0.4239	0.09	845.9	0.108
16.15	26.61	0.42	0.09	872.8	0.108
16.30	26.49	0.41	0.09	597.4	0.108
16.45	26.33	0.40	0.09	325.4	0.108
17.00	26.01	0.38	0.09	227.6	0.108
9.00	25.76	0.37	0.08	784.2	0.108
9.15	25.48	0.36	0.08	784.2	0.132
9.30	25.29	0.35	0.08	894.6	0.139
9.45	25.01	0.33	0.07	993.7	0.150
10.00	24.79	0.32	0.07	1098	0.150
10.15	24.52	0.31	0.07	1125	0.150
10.30	24.3	0.29	0.07	1176	0.150
10.45	24.07	0.28	0.06	1189	0.150
11.00	23.87	0.27	0.06	1204	0.150
11.15	23.66	0.26	0.06	1217	0.150
11.30	23.47	0.25	0.06	1148	0.150
11.45	23.28	0.24	0.05	1163	0.150
12.00	23.04	0.23	0.05	1172	0.150
12.15	22.8	0.21	0.05	1197	0.150
12.30	22.63	0.21	0.05	1215	0.150
12.45	22.53	0.20	0.04	1279	0.150

ตาราง ก-19 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	22.31	0.19	0.04	1173	0.150
13.15	22.18	0.18	0.04	1152	0.150
13.30	22.03	0.17	0.04	1184	0.150
13.45	21.69	0.15	0.03	1208	0.150
14.00	21.44	0.14	0.03	1216	0.150
14.15	21.27	0.13	0.03	1034	0.150
14.30	21.22	0.130	0.03	1192	0.150



ตาราง ก- 20 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	98.73	4.39	1.00	903.5	0.000
9.15	77.88	3.25	0.74	954.4	0.120
9.30	63.29	2.45	0.56	1005	0.156
9.45	53.14	1.90	0.43	1142	0.192
10.00	47.36	1.59	0.36	1176	0.210
10.15	43.14	1.35	0.31	1198	0.244
10.30	39.95	1.18	0.27	1211	0.260
10.45	38.03	1.08	0.25	1273	0.275
11.00	36.29	0.98	0.22	1292	0.305
11.15	34.81	0.90	0.21	1287	0.312
11.30	33.41	0.82	0.19	1278	0.319
11.45	32.37	0.77	0.17	1289	0.329
12.00	31.31	0.71	0.16	1289	0.343
12.15	30.33	0.66	0.15	1295	0.356
12.30	29.22	0.59	0.14	1256	0.356
12.45	28.45	0.55	0.13	1264	0.366
13.00	27.73	0.51	0.12	1232	0.380
13.15	26.98	0.47	0.11	1207	0.392
13.30	26.29	0.44	0.10	1194	0.404
13.45	25.96	0.42	0.09	1176	0.415
14.00	25.51	0.39	0.09	984.3	0.428
14.15	25.17	0.37	0.09	1125	0.440
14.30	24.92	0.36	0.08	1143	0.440
14.45	24.44	0.33	0.08	945.7	0.440
15.00	24.16	0.32	0.07	996.8	0.440

ตาราง ก-20 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 1

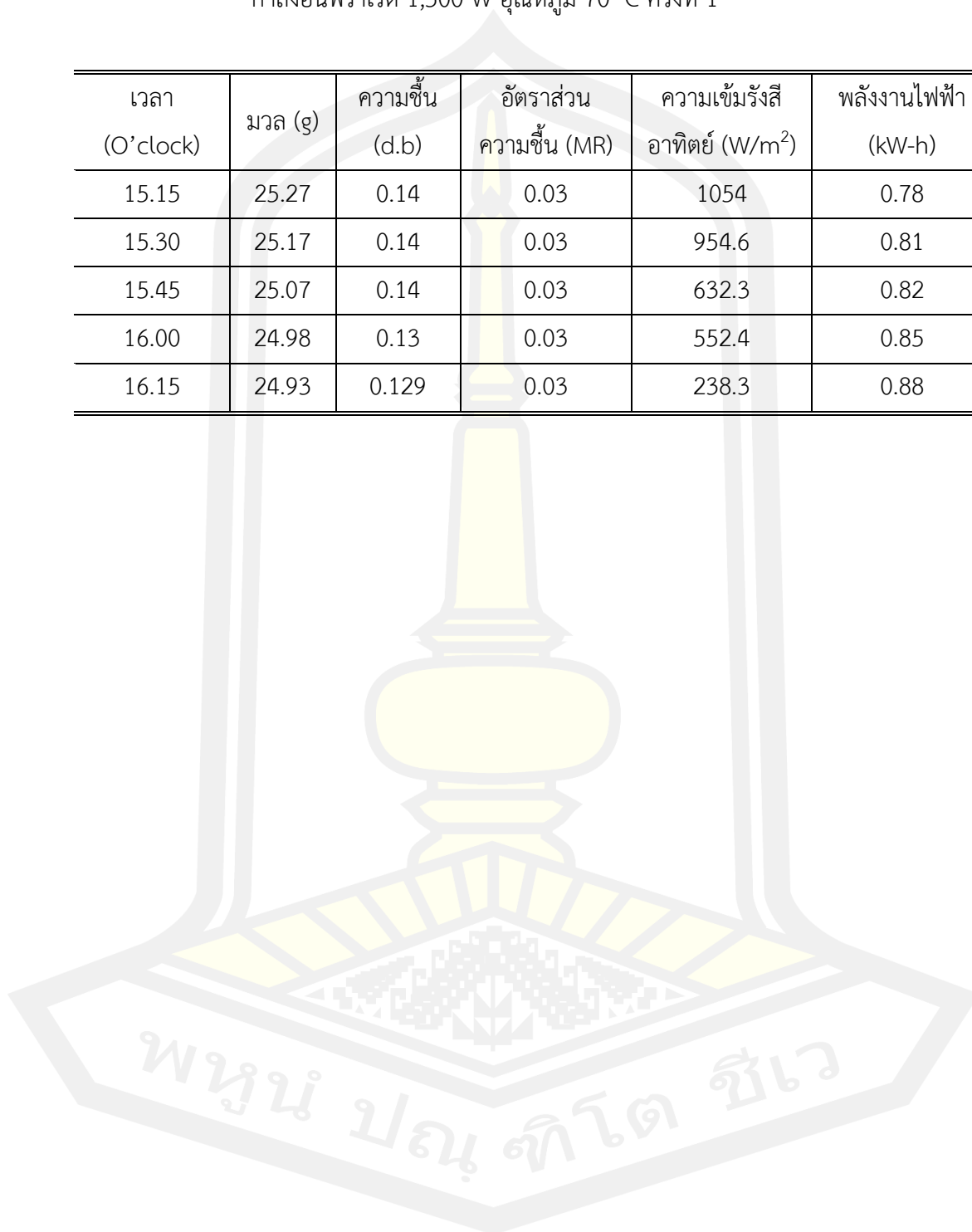
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	23.96	0.31	0.07	1032	0.440
15.30	23.74	0.30	0.07	1043	0.453
15.45	23.69	0.29	0.07	973.8	0.474
16.00	23.42	0.28	0.06	673.7	0.487
16.15	23.27	0.27	0.06	436.8	0.505
16.30	22.95	0.25	0.06	425.3	0.529
16.45	22.62	0.23	0.05	227.8	0.542
17.00	22.45	0.23	0.05	201.5	0.559
9.00	22.45	0.23	0.05	778.4	0.559
9.15	22.12	0.21	0.05	873.2	0.575
9.30	21.81	0.19	0.04	893.20	0.598
9.45	21.56	0.18	0.04	951.00	0.610
10.00	21.37	0.17	0.04	1058.00	0.622
10.15	21.14	0.15	0.04	1083.00	0.636
10.30	20.61	0.125	0.03	1113.00	0.650

ตาราง ก-21 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	114.1	4.17	1.00	873.6	0.00
9.15	78.74	2.57	0.62	997.2	0.18
9.30	60.1	1.72	0.41	1012	0.24
9.45	48.71	1.21	0.29	1034	0.30
10.00	40.83	0.85	0.20	1045	0.33
10.15	35.97	0.63	0.15	1084	0.38
10.30	32.9	0.49	0.12	1098	0.41
10.45	31.09	0.41	0.10	1126	0.44
11.00	29.93	0.36	0.09	1176	0.46
11.15	29.11	0.32	0.08	1197	0.49
11.30	28.55	0.29	0.07	1208	0.52
11.45	28.15	0.27	0.07	1269	0.53
12.00	27.79	0.26	0.06	1275	0.56
12.15	27.43	0.24	0.06	1298	0.57
12.30	27.18	0.23	0.06	1248	0.60
12.45	26.93	0.22	0.05	1219	0.61
13.00	26.71	0.21	0.05	1289	0.64
13.15	26.52	0.20	0.05	1132	0.66
13.30	26.36	0.19	0.05	1143	0.67
13.45	26.22	0.19	0.04	1164	0.69
14.00	26.05	0.18	0.04	1123	0.70
14.15	25.86	0.17	0.04	1154	0.72
14.30	25.67	0.16	0.04	1121	0.74
14.45	25.52	0.16	0.04	1087	0.71
15.00	25.43	0.15	0.04	1098	0.77

ตาราง ก-21 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 1

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	25.27	0.14	0.03	1054	0.78
15.30	25.17	0.14	0.03	954.6	0.81
15.45	25.07	0.14	0.03	632.3	0.82
16.00	24.98	0.13	0.03	552.4	0.85
16.15	24.93	0.129	0.03	238.3	0.88



ตาราง ก-22 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

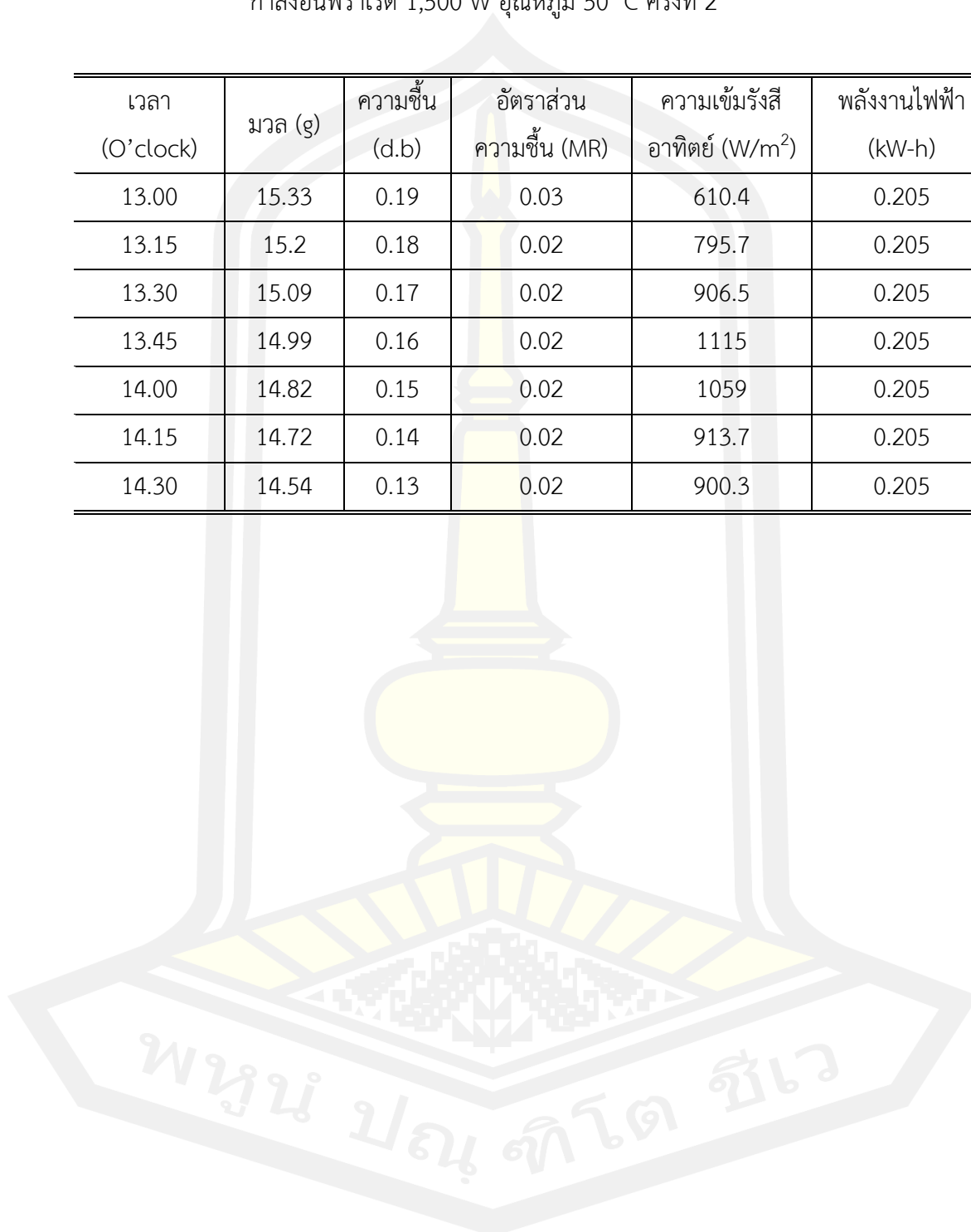
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	111.26	7.64	1.00	768.2	0
9.15	93.34	6.25	0.82	825.3	0.007
9.30	77.68	5.04	0.66	869.5	0.029
9.45	67.89	4.28	0.56	932.6	0.039
10.00	61.19	3.75	0.49	968.2	0.056
10.15	55.96	3.35	0.44	1030	0.066
10.30	50.87	2.95	0.39	1066	0.076
10.45	46.34	2.60	0.34	1101	0.076
11.00	42.62	2.31	0.30	1155	0.086
11.15	38.83	2.02	0.26	1154	0.086
11.30	36.27	1.82	0.24	1128	0.086
11.45	33.81	1.63	0.21	1176	0.086
12.00	31.9	1.48	0.19	1180	0.086
12.15	29.52	1.29	0.17	1162	0.086
12.30	27.8	1.16	0.15	1223	0.086
12.45	26.28	1.04	0.14	325.3	0.086
13.00	25	0.94	0.12	1200	0.086
13.15	23.88	0.86	0.11	1010	0.086
13.30	22.9	0.78	0.10	1087	0.086
13.45	22.07	0.71	0.09	1087	0.086
14.00	21.33	0.66	0.09	1050	0.086
14.15	20.8	0.62	0.08	975.3	0.086
14.30	20.31	0.58	0.08	915.0	0.108
14.45	19.73	0.53	0.07	869.1	0.111
15.00	19.31	0.50	0.07	792.1	0.128

ตาราง ก-22 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	18.94	0.47	0.06	720.9	0.108
15.30	18.66	0.45	0.06	648.2	0.108
15.45	18.4	0.43	0.06	579.5	0.108
16.00	18.17	0.41	0.05	510.2	0.108
16.15	17.98	0.40	0.05	424.3	0.108
16.30	17.82	0.38	0.05	363.2	0.108
16.45	17.68	0.37	0.05	283.6	0.108
17.00	17.58	0.37	0.05	195.4	0.108
9.00	17.59	0.37	0.05	721.8	0.108
9.15	17.25	0.34	0.04	767.8	0.108
9.30	17.16	0.33	0.04	945.6	0.132
9.45	17.02	0.32	0.04	929.2	0.163
10.00	16.87	0.31	0.04	1036	0.205
10.15	16.71	0.30	0.04	1013	0.205
10.30	16.59	0.29	0.04	1115	0.205
10.45	16.44	0.28	0.04	1075	0.205
11.00	16.32	0.27	0.04	1116	0.205
11.15	16.17	0.26	0.03	1132	0.205
11.30	16.07	0.25	0.03	1146	0.205
11.45	15.92	0.24	0.03	1146	0.205
12.00	15.78	0.23	0.03	1129	0.205
12.15	15.65	0.22	0.03	1183	0.205
12.30	15.53	0.21	0.03	1190	0.205
12.45	15.45	0.20	0.03	1256	0.205

ตาราง ก-22 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	15.33	0.19	0.03	610.4	0.205
13.15	15.2	0.18	0.02	795.7	0.205
13.30	15.09	0.17	0.02	906.5	0.205
13.45	14.99	0.16	0.02	1115	0.205
14.00	14.82	0.15	0.02	1059	0.205
14.15	14.72	0.14	0.02	913.7	0.205
14.30	14.54	0.13	0.02	900.3	0.205

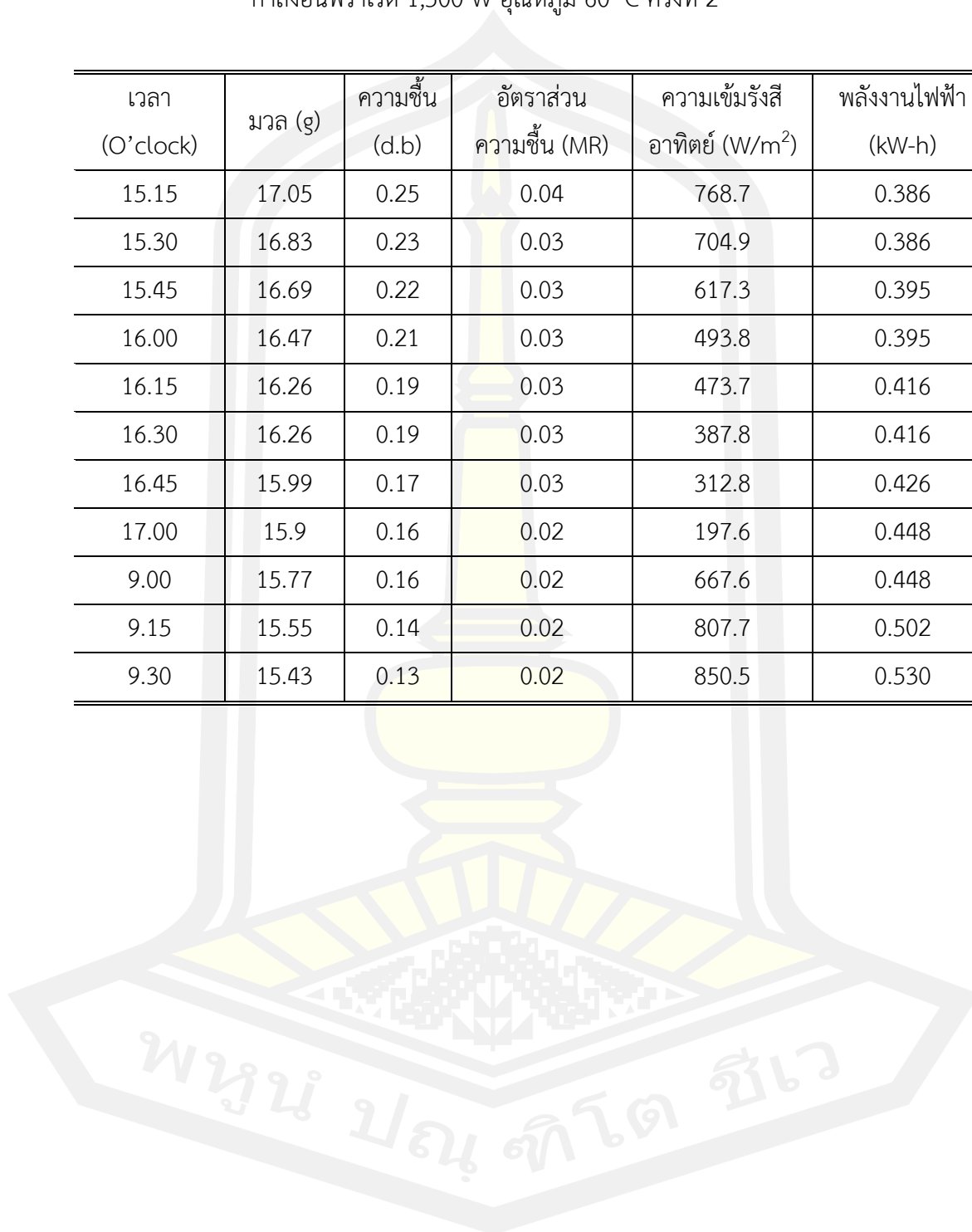


ตาราง ก- 23 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	104.68	6.67	1.00	827.2	0.000
9.15	83.76	5.14	0.77	872.7	0.075
9.30	66.88	3.90	0.58	943.9	0.097
9.45	56.14	3.11	0.47	1007	0.135
10.00	49.07	2.59	0.39	1020	0.158
10.15	42.94	2.15	0.32	1101	0.192
10.30	37.83	1.77	0.27	1160	0.212
10.45	33.68	1.47	0.22	1198	0.227
11.00	30.49	1.23	0.18	1206	0.244
11.15	27.89	1.04	0.16	1208	0.262
11.30	25.98	0.90	0.14	1242	0.275
11.45	24.43	0.79	0.12	1252	0.295
12.00	23.24	0.70	0.11	1254	0.306
12.15	22.28	0.63	0.09	1247	0.316
12.30	21.47	0.57	0.09	1257	0.322
12.45	21.00	0.54	0.08	1234	0.334
13.00	20.42	0.50	0.07	1220	0.344
13.15	19.99	0.46	0.07	1072	0.353
13.30	19.63	0.44	0.07	1174	0.353
13.45	19.11	0.40	0.06	1120	0.364
14.00	18.82	0.38	0.06	1075	0.375
14.15	18.42	0.35	0.05	1028	0.375
14.30	18.13	0.33	0.05	960.1	0.386
14.45	17.79	0.30	0.05	896.2	0.386
15.00	17.46	0.28	0.04	829.9	0.386

ตาราง ก-23 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	17.05	0.25	0.04	768.7	0.386
15.30	16.83	0.23	0.03	704.9	0.386
15.45	16.69	0.22	0.03	617.3	0.395
16.00	16.47	0.21	0.03	493.8	0.395
16.15	16.26	0.19	0.03	473.7	0.416
16.30	16.26	0.19	0.03	387.8	0.416
16.45	15.99	0.17	0.03	312.8	0.426
17.00	15.9	0.16	0.02	197.6	0.448
9.00	15.77	0.16	0.02	667.6	0.448
9.15	15.55	0.14	0.02	807.7	0.502
9.30	15.43	0.13	0.02	850.5	0.530

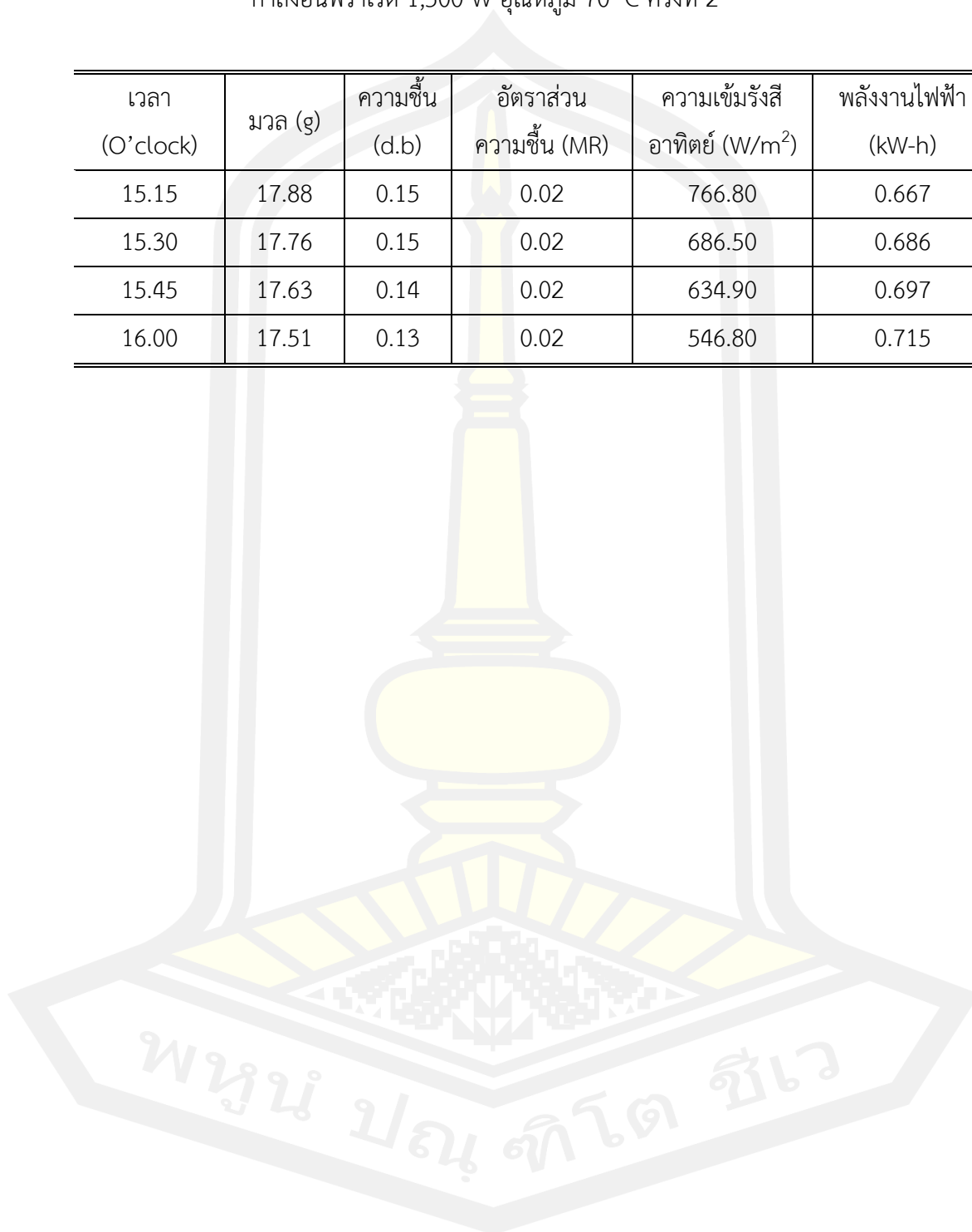


ตาราง ก-24 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	115.68	6.46	1.00	783.2	0.000
9.15	85.62	4.52	0.70	1012	0.131
9.30	58.99	2.81	0.43	746.50	0.195
9.45	45.93	1.96	0.30	1041.00	0.246
10.00	36.69	1.37	0.21	1068.00	0.258
10.15	30.93	1.00	0.15	1060.00	0.328
10.30	27.32	0.76	0.12	1148.00	0.351
10.45	25.13	0.62	0.10	1220.00	0.377
11.00	23.72	0.53	0.08	1205.00	0.401
11.15	22.74	0.47	0.07	1231.00	0.425
11.30	22.06	0.42	0.07	1241.00	0.434
11.45	21.52	0.39	0.06	1248.00	0.457
12.00	21.08	0.36	0.06	1226.00	0.469
12.15	20.7	0.34	0.05	1250.00	0.491
12.30	20.39	0.32	0.05	1216.00	0.503
12.45	20.14	0.30	0.05	1229.00	0.526
13.00	19.91	0.28	0.04	1201.00	0.538
13.15	19.69	0.27	0.04	1172.00	0.548
13.30	19.45	0.25	0.04	1144.00	0.567
13.45	19.28	0.24	0.04	1114.00	0.578
14.00	19.05	0.23	0.04	1077.00	0.595
14.15	18.83	0.21	0.03	1020.00	0.612
14.30	18.52	0.19	0.03	957.60	0.623
14.45	18.31	0.18	0.03	904.80	0.634
15.00	18.05	0.16	0.03	835.20	0.656

ตาราง ก-24 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 2

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	17.88	0.15	0.02	766.80	0.667
15.30	17.76	0.15	0.02	686.50	0.686
15.45	17.63	0.14	0.02	634.90	0.697
16.00	17.51	0.13	0.02	546.80	0.715



ตาราง ก- 25 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

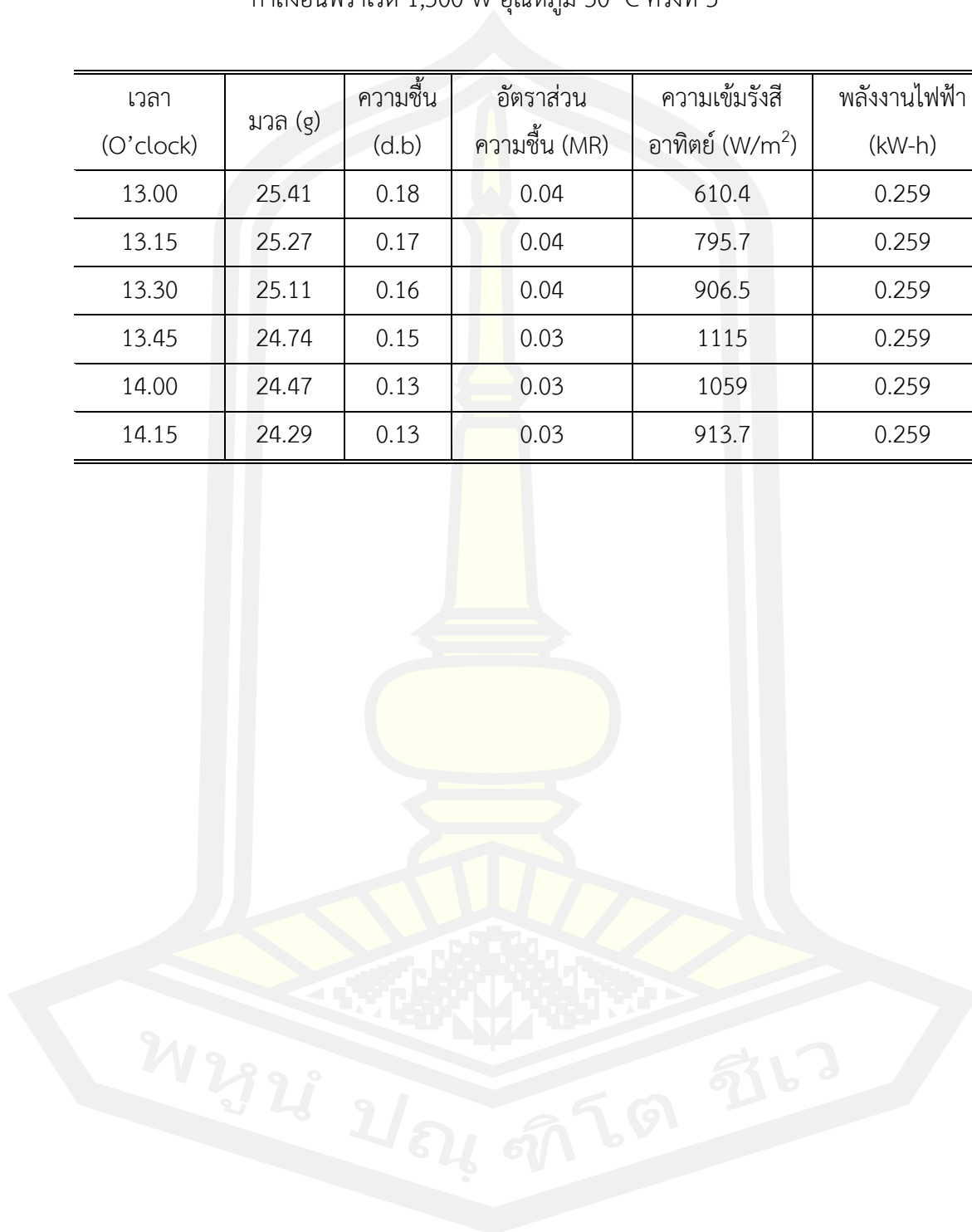
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	113.42	4.25	1.00	768.2	0.000
9.15	103.22	3.78	0.89	825.3	0.007
9.30	93.25	3.32	0.78	869.5	0.029
9.45	85.59	2.96	0.70	932.6	0.039
10.00	78.15	2.62	0.62	968.2	0.056
10.15	71.85	2.33	0.55	1030	0.066
10.30	65.63	2.04	0.48	1066	0.076
10.45	60.74	1.81	0.43	1101	0.076
11.00	56.68	1.63	0.38	1155	0.086
11.15	52.58	1.44	0.34	1154	0.086
11.30	49.04	1.27	0.30	1128	0.086
11.45	46.05	1.13	0.27	1176	0.086
12.00	43.92	1.03	0.24	1180	0.086
12.15	42.23	0.96	0.22	1162	0.086
12.30	41.02	0.90	0.21	1223	0.086
12.45	39.68	0.84	0.20	325.3	0.086
13.00	37.99	0.76	0.18	1200	0.086
13.15	36.93	0.71	0.17	1010	0.086
13.30	35.95	0.67	0.16	1087	0.086
13.45	34.94	0.62	0.15	1087	0.086
14.00	34.1	0.58	0.14	1050	0.086
14.15	33.29	0.54	0.13	975.3	0.086
14.30	32.48	0.50	0.12	915.0	0.108
14.45	31.76	0.47	0.11	869.1	0.111
15.00	31.3	0.45	0.11	792.1	0.128

ตาราง ก-25 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	30.93	0.43	0.10	720.9	0.231
15.30	30.6	0.42	0.10	648.2	0.231
15.45	30.33	0.40	0.10	579.5	0.231
16.00	30.21	0.40	0.09	510.2	0.231
16.15	30.07	0.39	0.09	424.3	0.231
16.30	29.94	0.39	0.09	363.2	0.231
16.45	29.76	0.38	0.09	283.6	0.231
17.00	29.42	0.36	0.09	195.4	0.231
9.00	29.15	0.35	0.08	721.8	0.231
9.15	28.84	0.34	0.08	767.8	0.248
9.30	28.64	0.33	0.08	945.6	0.248
9.45	28.33	0.31	0.07	929.2	0.259
10.00	28.10	0.30	0.07	1036	0.259
10.15	27.80	0.29	0.07	1013	0.259
10.30	27.57	0.28	0.07	1115	0.259
10.45	27.32	0.27	0.06	1075	0.259
11.00	27.10	0.26	0.06	1116	0.259
11.15	26.87	0.24	0.06	1132	0.259
11.30	26.67	0.24	0.06	1146	0.259
11.45	26.46	0.23	0.05	1146	0.259
12.00	26.20	0.21	0.05	1129	0.259
12.15	25.94	0.20	0.05	1183	0.259
12.30	25.76	0.19	0.05	1190	0.259
12.45	25.65	0.19	0.04	1256	0.259

ตาราง ก-25 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 50 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
13.00	25.41	0.18	0.04	610.4	0.259
13.15	25.27	0.17	0.04	795.7	0.259
13.30	25.11	0.16	0.04	906.5	0.259
13.45	24.74	0.15	0.03	1115	0.259
14.00	24.47	0.13	0.03	1059	0.259
14.15	24.29	0.13	0.03	913.7	0.259



ตาราง ก-26 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	101.92	4.17	1.00	903.5	0.000
9.15	80.59	3.08	0.74	954.4	0.083
9.30	65.68	2.33	0.56	1005	0.122
9.45	55.31	1.80	0.43	1142	0.148
10.00	49.4	1.50	0.36	1176	0.174
10.15	45.09	1.29	0.31	1198	0.198
10.30	41.83	1.12	0.27	1211	0.223
10.45	39.87	1.02	0.24	1273	0.235
11.00	38.09	0.93	0.22	1292	0.264
11.15	36.98	0.87	0.21	1287	0.285
11.30	36.07	0.83	0.20	1278	0.296
11.45	35.25	0.79	0.19	1289	0.312
12.00	34.33	0.74	0.18	1289	0.327
12.15	33.74	0.71	0.17	1295	0.327
12.30	33.22	0.68	0.16	1256	0.327
12.45	32.43	0.64	0.15	1264	0.327
13.00	32.21	0.63	0.15	1232	0.354
13.15	31.54	0.60	0.14	1207	0.354
13.30	30.94	0.57	0.14	1194	0.367
13.45	30.43	0.54	0.13	1176	0.367
14.00	29.63	0.50	0.12	984.3	0.367
14.15	29.28	0.48	0.12	1125	0.367
14.30	28.52	0.45	0.11	1143	0.367
14.45	28.03	0.42	0.10	945.7	0.374
15.00	27.54	0.40	0.09	996.8	0.374

ตาราง ก-26 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 60 °C ครั้งที่ 3

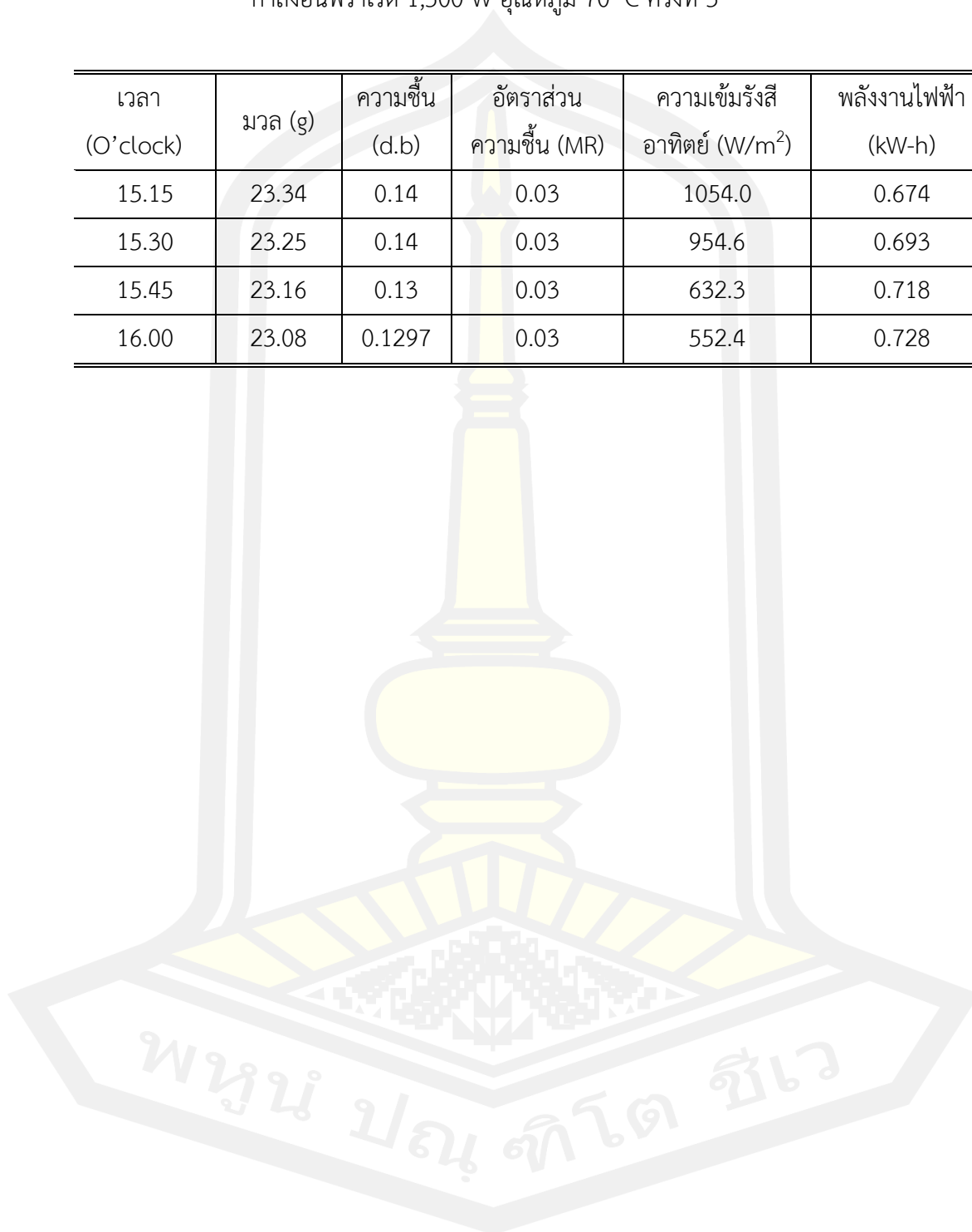
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	27.16	0.38	0.09	1032	0.387
15.30	26.8	0.36	0.09	1043	0.387
15.45	26.65	0.35	0.08	973.8	0.396
16.00	26.17	0.33	0.08	673.7	0.412
16.15	26.12	0.32	0.08	436.8	0.419
16.30	25.96	0.32	0.08	425.3	0.427
16.45	25.55	0.29	0.07	227.8	0.435
17.00	25.41	0.29	0.07	201.5	0.452
9.00	25.41	0.29	0.07	562.6	0.452
9.15	24.94	0.26	0.06	778.4	0.544
9.30	24.32	0.23	0.06	873.2	0.567
9.45	23.76	0.20	0.05	931.6	0.571
10.00	23.08	0.17	0.04	994.5	0.593
10.15	22.61	0.15	0.04	1034.2	0.593
10.30	22.27	0.129	0.03	1127.6	0.593

ตาราง ก-27 เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m ²)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
9.00	104.39	4.11	1.00	873.6	0.000
9.15	72.12	2.53	0.62	997.2	0.092
9.30	55.11	1.70	0.41	1012.0	0.163
9.45	44.72	1.19	0.29	1034.0	0.232
10.00	37.53	0.84	0.20	1045.0	0.284
10.15	33.1	0.62	0.15	1084.0	0.336
10.30	30.3	0.48	0.12	1098.0	0.365
10.45	28.65	0.40	0.10	1126.0	0.387
11.00	27.59	0.35	0.09	1176.0	0.398
11.15	26.84	0.31	0.08	1197.0	0.412
11.30	26.33	0.29	0.07	1208.0	0.428
11.45	25.97	0.27	0.07	1269.0	0.439
12.00	25.64	0.26	0.06	1275.0	0.446
12.15	25.31	0.24	0.06	1298.0	0.462
12.30	25.08	0.23	0.06	1248.0	0.487
12.45	24.85	0.22	0.05	1219.0	0.515
13.00	24.65	0.21	0.05	1289.0	0.528
13.15	24.48	0.20	0.05	1132.0	0.537
13.30	24.33	0.19	0.05	1143.0	0.548
13.45	24.21	0.19	0.05	1164.0	0.567
14.00	24.05	0.18	0.04	1123.0	0.578
14.15	23.88	0.17	0.04	1154.0	0.594
14.30	23.7	0.16	0.04	1121.0	0.632
14.45	23.57	0.15	0.04	1087.0	0.648
15.00	23.49	0.15	0.04	1098.0	0.659

ตาราง ก-27 (ต่อ) เวลา มวล ความชื้น อัตราส่วนความชื้น ความเข้มรังสีอาทิตย์ และพลังงานไฟฟ้าที่
กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3

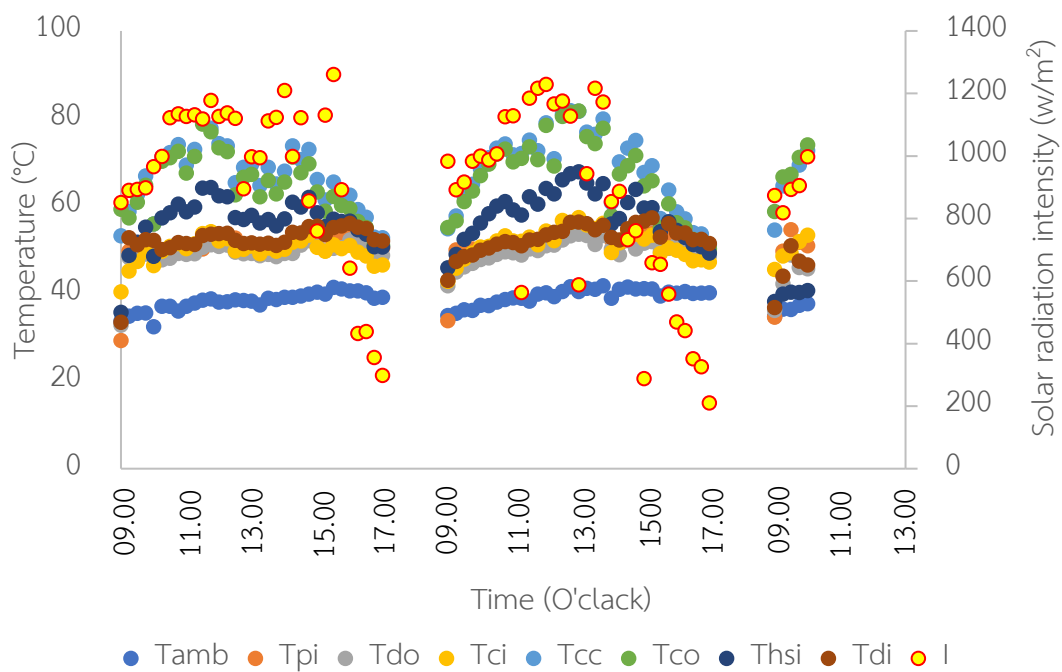
เวลา (O'clock)	มวล (g)	ความชื้น (d.b)	อัตราส่วน ความชื้น (MR)	ความเข้มรังสี อาทิตย์ (W/m^2)	พลังงานไฟฟ้า (kW-h)
15.15	23.34	0.14	0.03	1054.0	0.674
15.30	23.25	0.14	0.03	954.6	0.693
15.45	23.16	0.13	0.03	632.3	0.718
16.00	23.08	0.1297	0.03	552.4	0.728



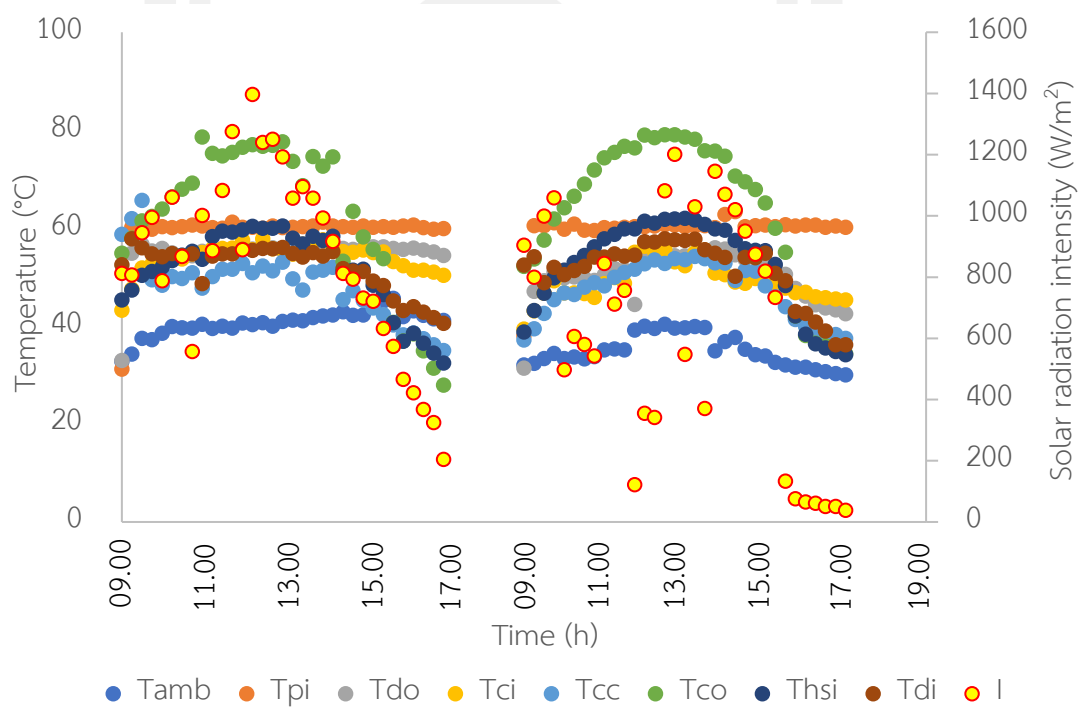
ภาคผนวก ข

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่จุดต่าง ๆ ที่สภาวะการอบแห้งแตกต่างกัน

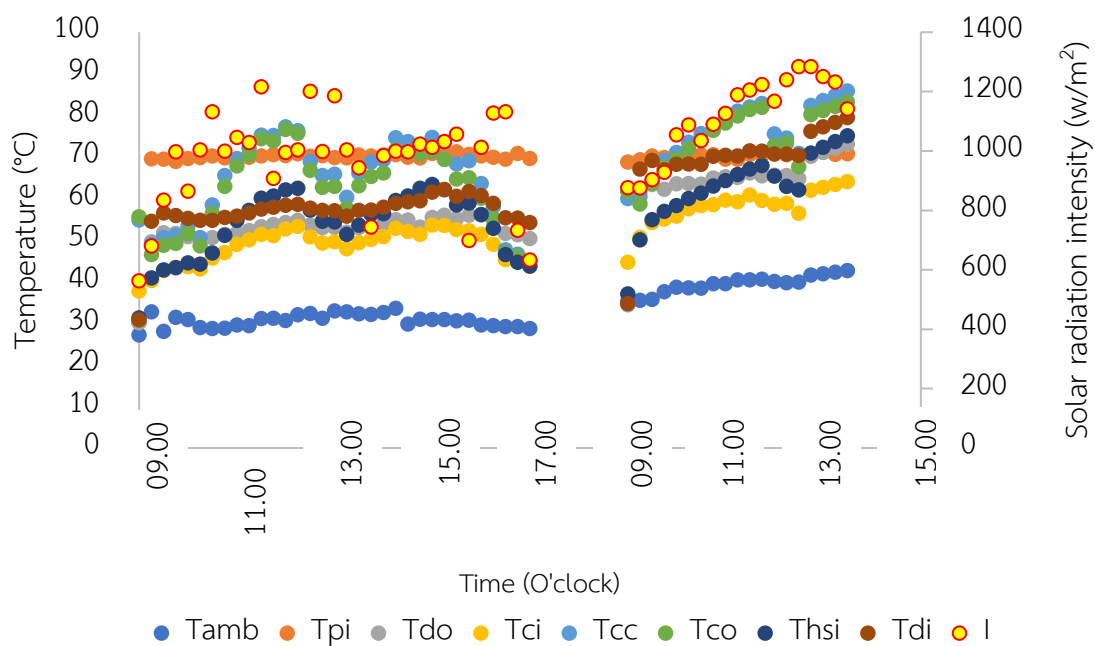




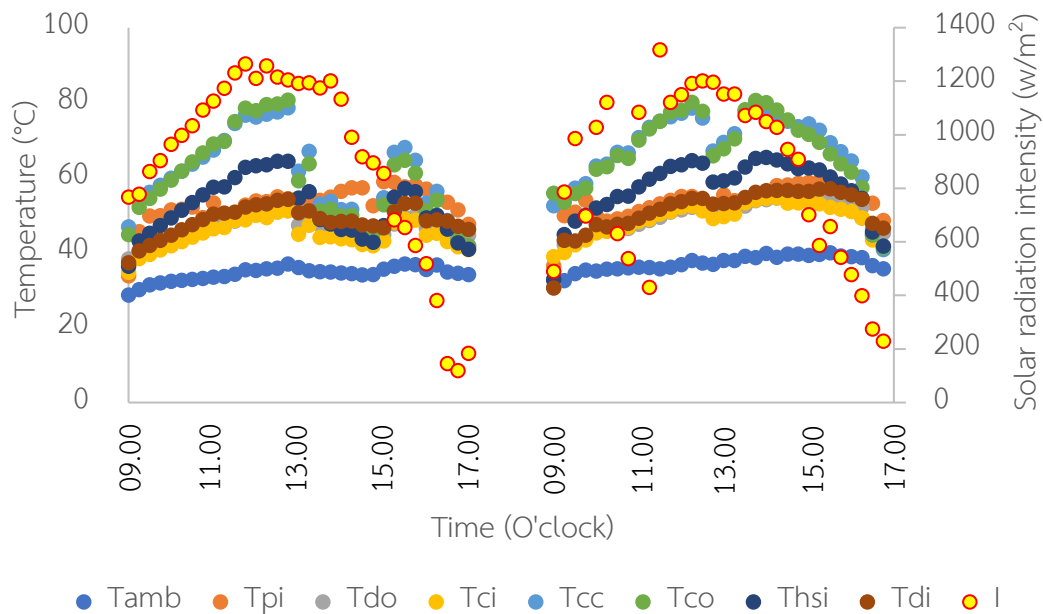
ภาพประกอบ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 50 °C
กำลังอินฟราเรด 500 W



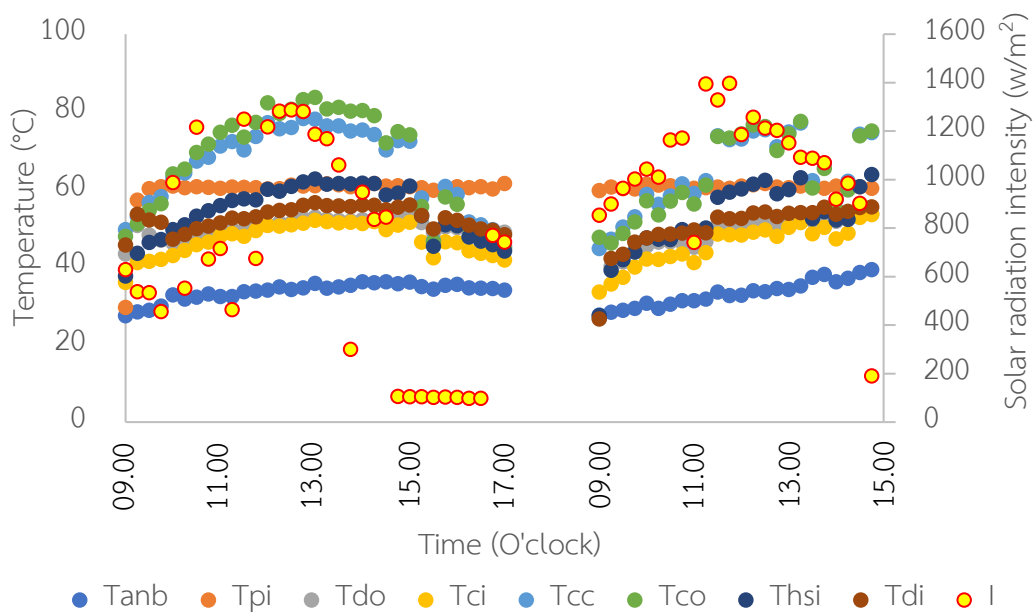
ภาพประกอบ ข-2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 60 °C
กำลังอินฟราเรด 500 W



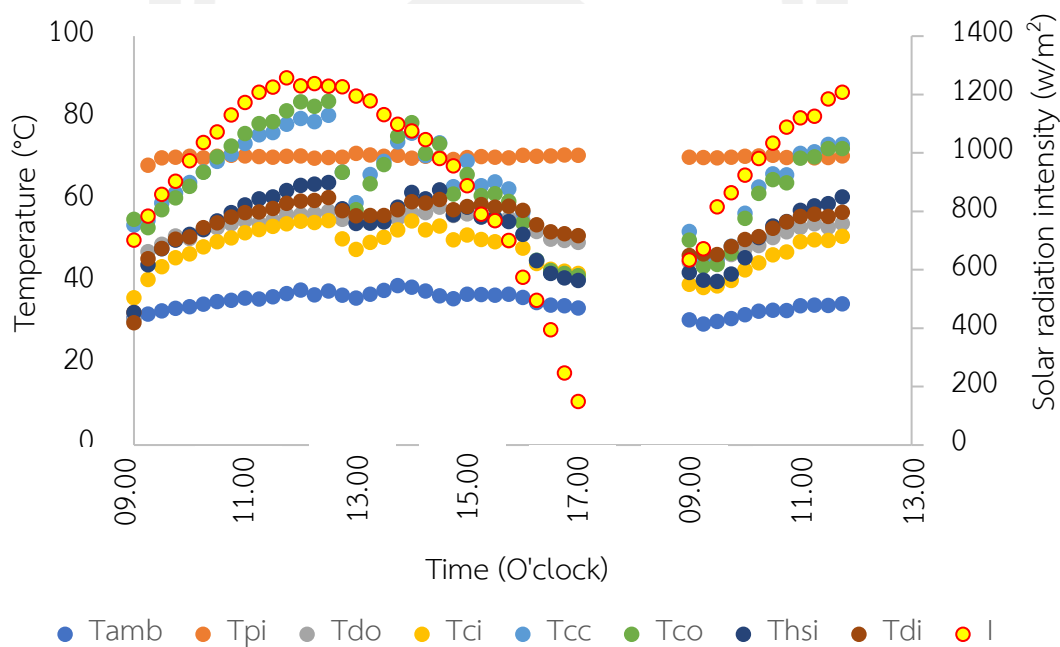
ภาพประกอบ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 70 °C
กำลังอินฟราเรด 500 W



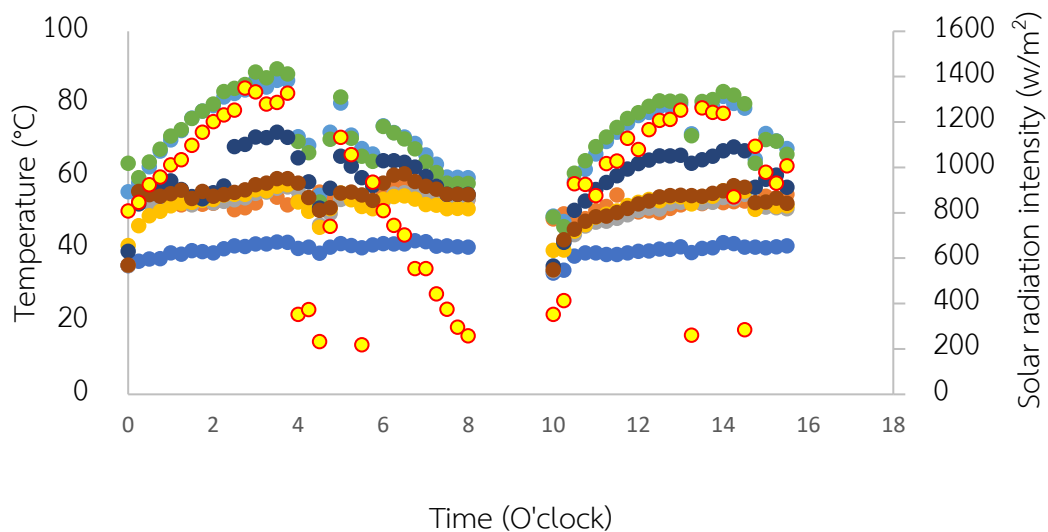
ภาพประกอบ ข-4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 50 °C
กำลังอินฟราเรด 1,000 W



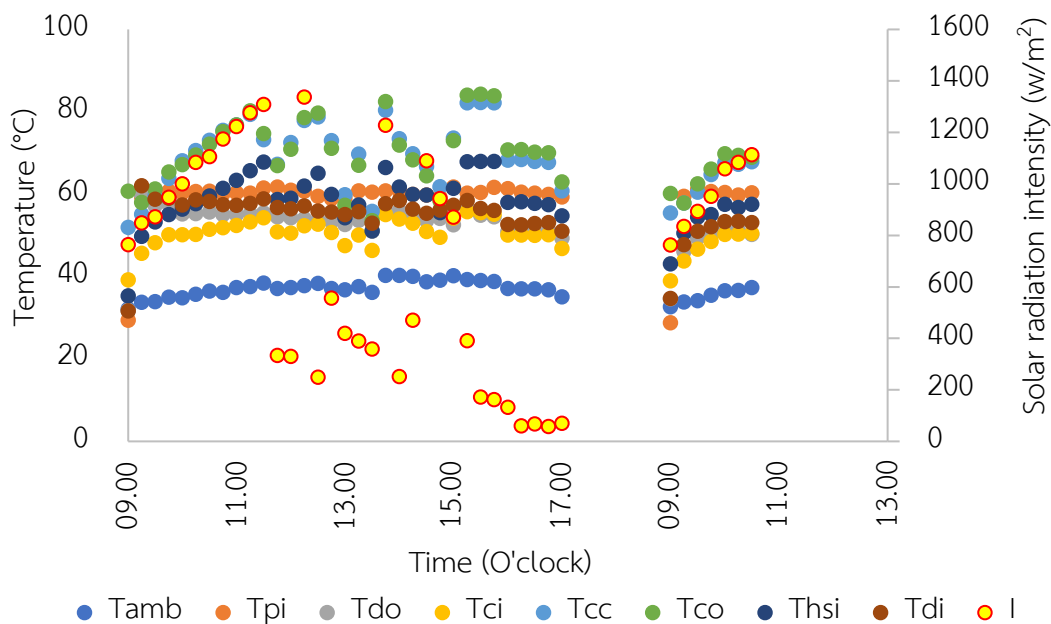
ภาพประกอบ ข-5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 60 °C กำลังอินฟราเรด 1,000 W



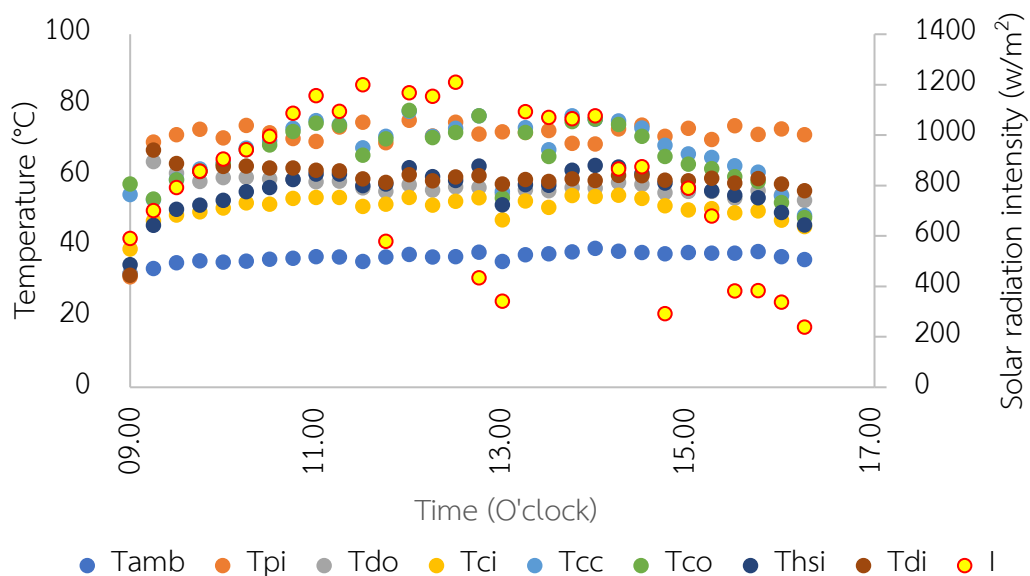
ภาพประกอบ ข-6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 70 °C กำลังอินฟราเรด 1,000 W



ภาพประกอบ ข-7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 50 °C
กำลังอินฟราเรด 1,500 W



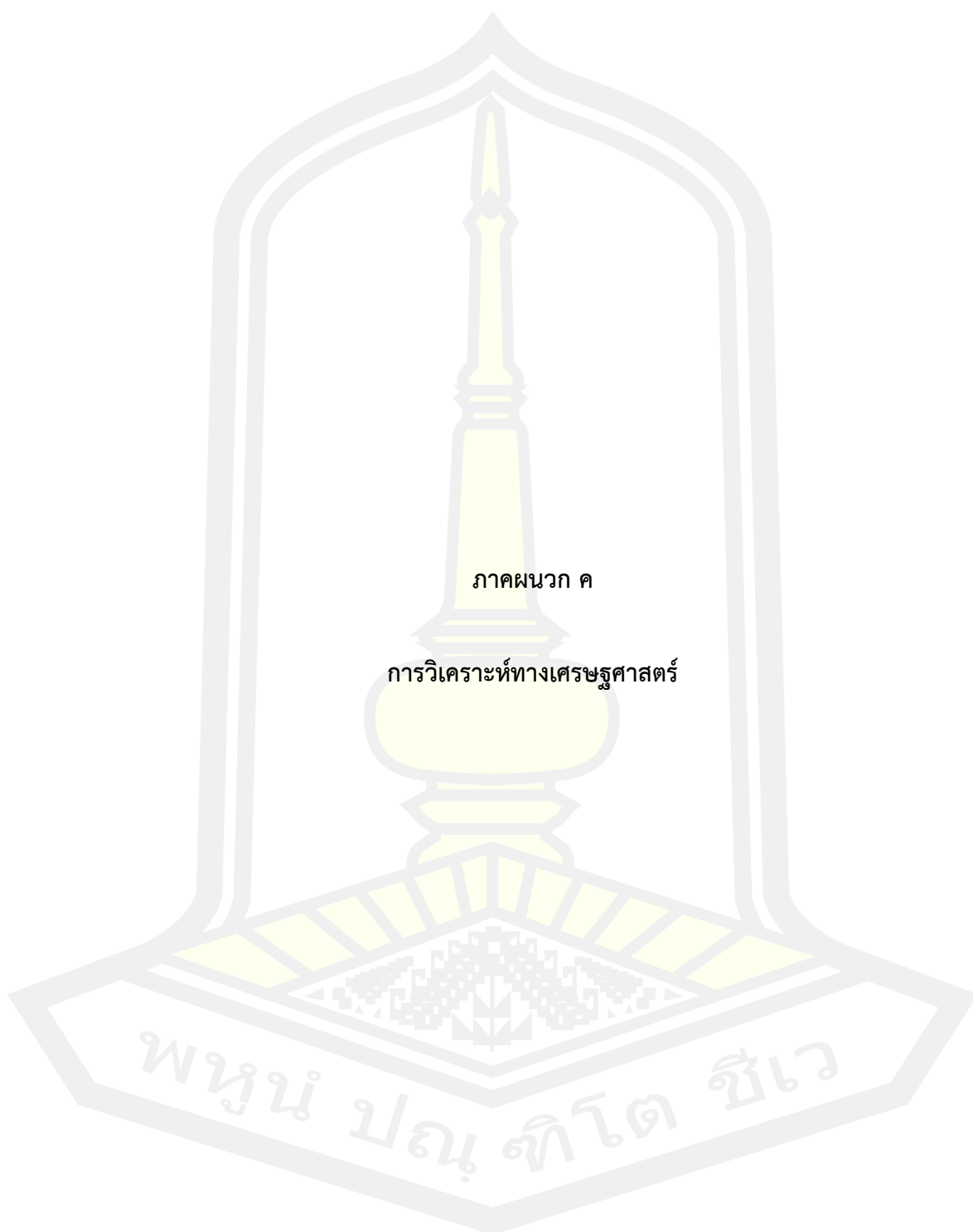
ภาพประกอบ ข-8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 60 °C
กำลังอินฟราเรด 1,500 W



ภาพประกอบ ข-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิตัวกลางที่จุดต่าง ๆ กับเวลาเมื่ออบแห้งที่ 70 °C
กำลังอินฟราเรด 1,500 W

หมายเหตุ : T_{amb} คือ อุณหภูมิแวดล้อม (°C)
 T_{pi} คือ อุณหภูมิภายในชั้นไพล (°C)
 T_{do} คือ อุณหภูมิตัวกลางอบแห้งขาออกห้องอบแห้ง (°C)
 T_{ci} คือ อุณหภูมิตัวกลางอบแห้งขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
 T_{cc} คือ อุณหภูมิตัวกลางอบแห้งตรงกลางตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
 T_{co} คือ อุณหภูมิตัวกลางอบแห้งขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)
 T_{hsi} คือ อุณหภูมิขาเข้าตัวกักเก็บความร้อน (°C)
 T_{di} คือ อุณหภูมิขาเข้าห้องอบแห้ง (°C)
 I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m²)

พหุ ประสิทธิภาพ



ตาราง ค-1 งบประมาณสำหรับสร้างของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด

รายการวัสดุ อุปกรณ์	จำนวน	ราคาต่อหน่วย (บาท)	จำนวนเงิน (บาท)
1. เหล็กกล่องขนาด 1x1 in	4	149	596
2. เหล็กกล่องขนาด 1x2 in	2	242	484
3. เหล็กฉากขนาด 1x1 in	2	193	386
4. ฉนวนยางดำหนา 10 mm	4	396	1584
5. ฉนวนใยแก้ว	5	10	50
6. แผ่นอะลูมิเนียม	4	102	408
7. อะลูมิเนียมฟอยล์	1	75	75
8. พัดลมกระแสตรงขนาด 12 V	5	70	350
9. แผ่นโพลีคาร์บอเนตชนิดโปร่งแสง	1	689	689
10. แบตเตอรี่ 12 V	1	1,290	1,290
11. เซลล์แสงอาทิตย์	1	806	806
12. สังกะสีแผ่นเรียบ	3	299	897
13. หลอดอินฟราเรด 500 W	1	500	500
14. หลอดอินฟราเรด 1,000 W	1	1,750	1750
15. โคมหลอดอินฟราเรด	1	410	410
16. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	1	1,920	1920
17. เทอร์โมสตัท	1	150	150
18. ค่าจ้างสร้างเครื่องอบแห้ง	1	3,000	3,000
รวม			15,345

พูน ปณ จิต ชีวะ

ตาราง ค-2 พลังงานไฟฟ้า และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งโพลที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

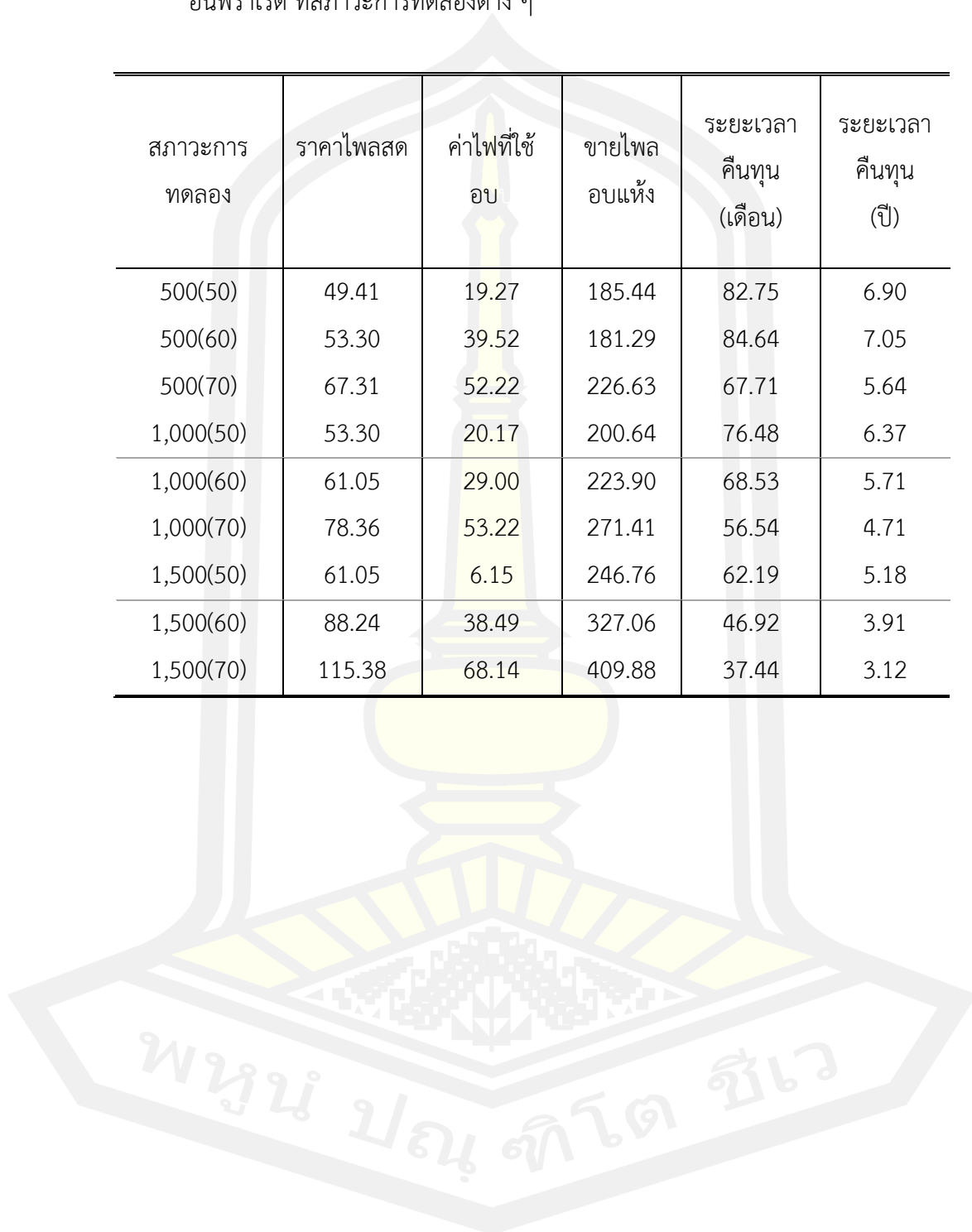
ค่าไฟฟ้าต่อการอบแห้งโพล 100 g 1 ครั้ง			ค่าไฟฟ้าอบแห้งโพล 1 kg 1 ครั้ง
สภาวะการทดลอง	ไฟฟ้า (kW-h)	ค่าไฟ (บาท)	
500(50)	0.581	1.36	13.65
500(60)	1.105	2.60	25.95
500(70)	1.156	2.72	27.15
1,000(50)	0.564	1.32	13.25
1,000(60)	0.708	1.66	16.63
1,000(70)	1.012	2.38	23.77
1,500(50)	0.150	0.35	3.52
1,500(60)	0.650	1.53	15.27
1,500(70)	0.880	2.07	20.67

ตาราง ค-3 ระยะเวลาและค่าไฟฟ้าของการอบแห้งโพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ
รังสีอินฟราเรด ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง	ค่าไฟอบ 100 g (บาท)	ระยะเวลาอบ 100 g (วัน)	ค่าไฟอบ 1 Kg (บาท)	ระยะเวลาในการอบโพล 1 Kg (วัน)	1 เดือนอบ 1 Kg ได้ (รอบ)	อบโพลได้สูงสุด (kg/เดือน)
500(50)	1.36	2.13	13.65	21.25	1.4	1.41
500(60)	2.60	1.97	25.95	19.7	1.5	1.52
500(70)	2.72	1.56	27.15	15.6	1.9	1.92
1,000(50)	1.32	1.97	13.25	19.7	1.5	1.52
1,000(60)	1.66	1.72	16.63	17.2	1.7	1.74
1,000(70)	2.38	1.34	23.77	13.4	2.2	2.24
1,500(50)	0.35	1.72	3.52	17.2	1.7	1.74
1,500(60)	1.53	1.19	15.27	11.9	2.5	2.52
1,500(70)	2.07	0.91	20.67	9.1	3.3	3.30

ตาราง ค- 4 ระยะเวลาคืนทุนของการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด ที่สภาวะการทดลองต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง	ราคาไพลสด	ค่าไฟที่ใช้อบ	ขายไพลอบแห้ง	ระยะเวลาคืนทุน (เดือน)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
500(50)	49.41	19.27	185.44	82.75	6.90
500(60)	53.30	39.52	181.29	84.64	7.05
500(70)	67.31	52.22	226.63	67.71	5.64
1,000(50)	53.30	20.17	200.64	76.48	6.37
1,000(60)	61.05	29.00	223.90	68.53	5.71
1,000(70)	78.36	53.22	271.41	56.54	4.71
1,500(50)	61.05	6.15	246.76	62.19	5.18
1,500(60)	88.24	38.49	327.06	46.92	3.91
1,500(70)	115.38	68.14	409.88	37.44	3.12



ภาคผนวก ง

การหาค่าความชื้น อัตราส่วนความชื้น ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้ง
และการวิเคราะห์คุณภาพด้านสี



ง-1 การหาความชื้นของไพล

วัสดุและอุปกรณ์

1. ครอบอะลูมิเนียม
2. ตู้อบไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งมวลความละเอียด 0.001 g
4. ชิ้นไพลสำหรับหาค่าความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ชั่งมวลครอบอะลูมิเนียม บนทีก



ภาพประกอบ ง-1 เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.001 g

2. นำชิ้นแล้วนำชิ้นไพลใส่ในครอบอะลูมิเนียม
3. ชั่งมวลของครอบ+ไพล บนทีกเป็นน้ำหนักก่อนอบ
4. นำครอบอะลูมิเนียมที่มีชิ้นไพลใส่ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. หลังจากนั้นนำครอบอะลูมิเนียมออกจากตู้อบไฟฟ้า แล้วนำไปเก็บไว้ในโถ

ดูดความชื้น



ภาพประกอบ ง-2 ตู้อบไฟฟ้าที่ใช้สำหรับหาความชื้น

6. พกกระป๋องอะลูมิเนียมเย็นลง นำไปชั่งมวล บันทึกเป็นมวลหลังอบ
7. คำนวณหามวลจริงของชิ้นโพลีเอทิลีนก่อนอบและหลังอบ
8. คำนวณหาค่าความชื้น (d.b) จากสมการ

$$MC = \frac{m_{before} - m_{after}}{m_{after}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (50)$$

เมื่อ MC = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b)
 m_{before} = มวลจริงของชิ้นโพลีเอทิลีนก่อนอบแห้ง (g)
 m_{after} = มวลจริงของชิ้นโพลีเอทิลีนหลังอบแห้ง (g)

ง-2 การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (MR)

สำหรับตัวอย่างการคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น (MR) จะใช้ข้อมูลสถานะการอบแห้งที่ กำลังอินพุต 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C ครั้งที่ 3 ในตาราง ก-27 ณ เวลา 10.00 น

ตัวอย่าง การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{M_t}{M_i}$$

$$MR = \frac{1.36}{6.44}$$

$$MR = 0.21$$

ดังนั้น อัตราส่วนความชื้น มีค่าเท่ากับ 0.21

ง-3 การคำนวณประสิทธิภาพการอบแห้ง

การศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งจะพิจารณาจากค่าอัตราการอบแห้ง (DR) ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (SEEC) และประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η_c) ซึ่งตัวอย่างในการคำนวณจะใช้ข้อมูลสภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C อบแห้งครั้งที่ 3 ในตาราง ก-27 ณ เวลา 10.00 น ซึ่งตัวอย่างการคำนวณค่าต่างๆ จะแสดงดังนี้

1. อัตราการอบแห้ง

$$\begin{aligned} DR &= \frac{m_i - m_o}{t} \\ &= \frac{0.04269 - 0.03412}{0.25} \\ &= 0.034 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

ดังนั้น อัตราการอบแห้ง มีค่าเท่ากับ 0.034 kg/h

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEEC)

$$\begin{aligned} SEEC &= \frac{E_o - E_i}{m_i - m_o} \\ &= \frac{0.284 - 0.232}{0.00857} \\ &= 6.067 \text{ kWh/kg} \end{aligned}$$

3. ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η_c)

$$\begin{aligned} \eta_{collector} &= \frac{\dot{m}c_a(T_{outC} - T_{inC})}{A_c G_t} \times 100\% \\ &= \frac{0.076 \times 1.02(63.56 - 46.70)}{2 \times 1045} \times 100\% \\ &= 62.50 \% \end{aligned}$$

ง-4 การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของไฟ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความแตกต่างสีรวม (ΔE^*) ค่าความเข้ม (C^*) และค่าบอกกลุ่มสี (h^*) จะใช้ข้อมูลสภาวะการอบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W อุณหภูมิ 70 °C สามารถคำนวณได้จากสมการ (41), (42) และ (43)

การคำนวณหาค่าความแตกต่างสีรวม

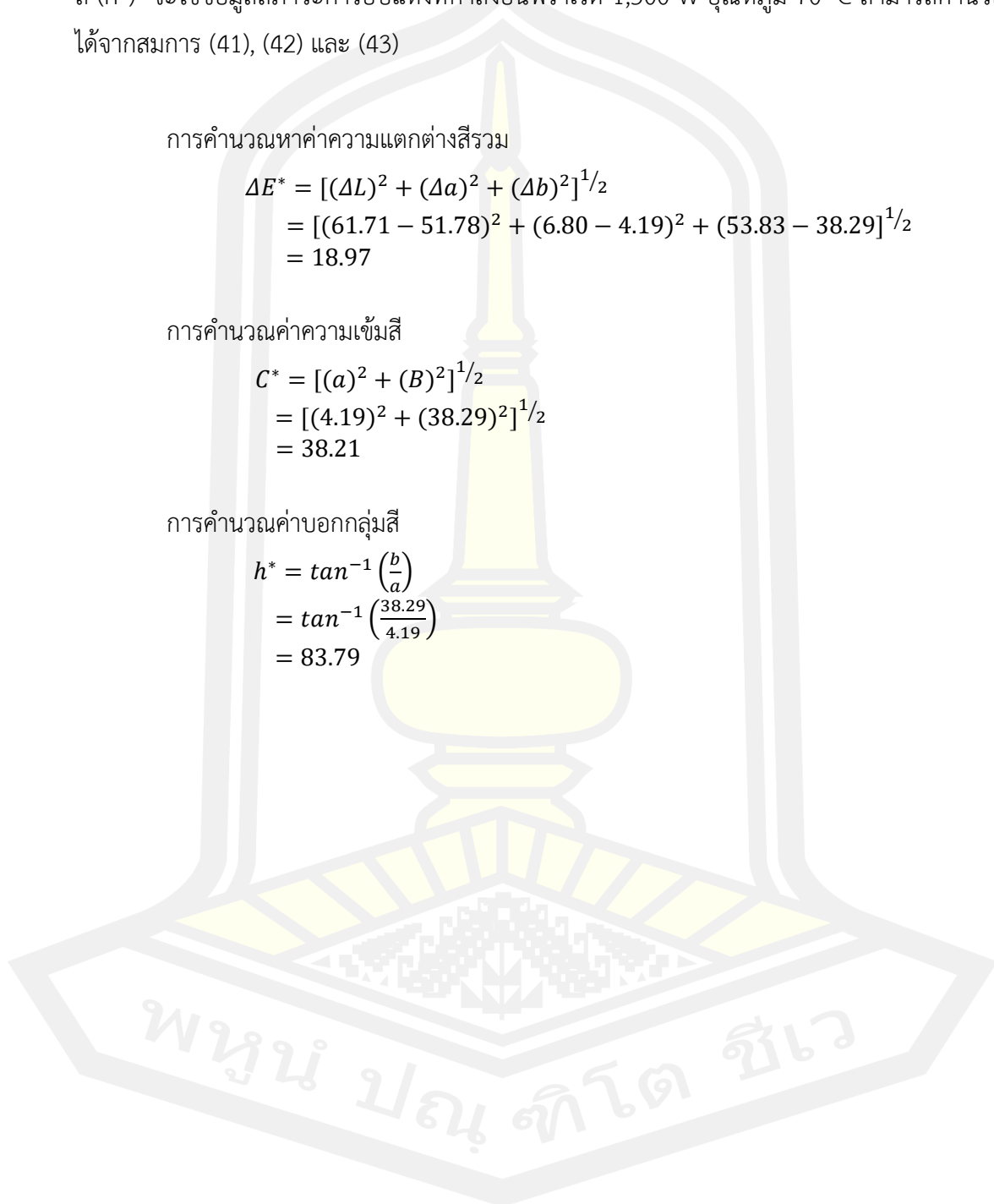
$$\begin{aligned}\Delta E^* &= [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \\ &= [(61.71 - 51.78)^2 + (6.80 - 4.19)^2 + (53.83 - 38.29)^2]^{1/2} \\ &= 18.97\end{aligned}$$

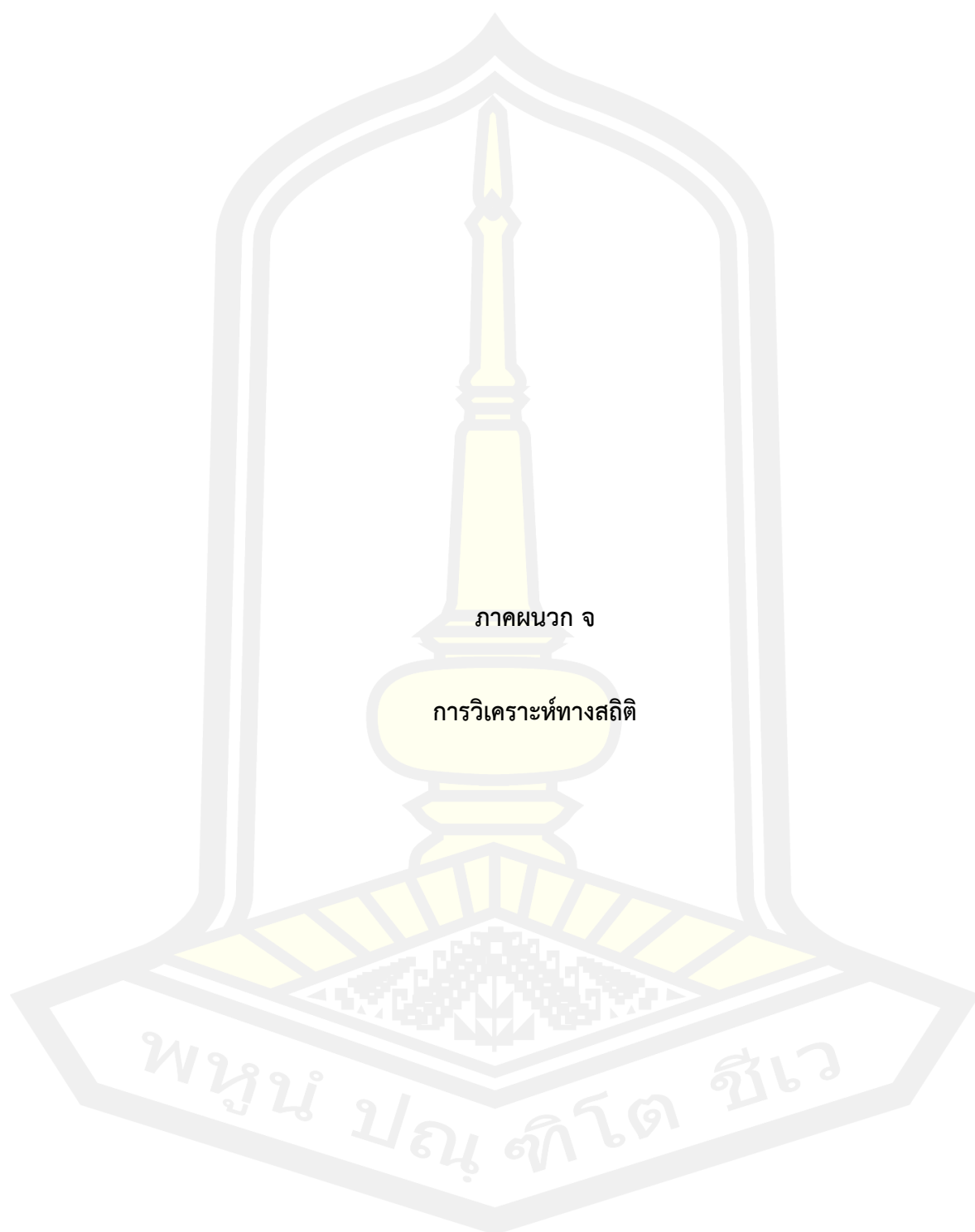
การคำนวณค่าความเข้มสี

$$\begin{aligned}C^* &= [(a)^2 + (B)^2]^{1/2} \\ &= [(4.19)^2 + (38.29)^2]^{1/2} \\ &= 38.21\end{aligned}$$

การคำนวณค่าบอกกลุ่มสี

$$\begin{aligned}h^* &= \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{38.29}{4.19} \right) \\ &= 83.79\end{aligned}$$





การวิเคราะห์ทางสถิติค่าสีของไฟลหลังอบแห้ง

ตาราง จ-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสว่าง (L*)

สภาวะการ ทดลอง	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
1500(60)	30	49.8357					
1500(70)	30	51.9200	51.9200				
500(70)	30		53.1850	53.1850			
500(50)	30		54.0643	54.0643			
500(60)	30			55.4877	55.4877		
1500(50)	30				57.5500		
1000(70)	30				58.1130		
1000(60)	30					62.3083	
1000(50)	30						65.7327
Sig.		.164	.178	.148	.098	1.000	1.000

ตาราง จ-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีแดง (a*)

n	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
1000(50)	30	3.0093				
1500(60)	30		3.5170			
1000(60)	30		3.6017			
1500(50)	30		3.6653			
1500(70)	30			4.0830		
1000(70)	30			4.4237		
500(50)	30			4.4893		
500(60)	30				4.9667	
500(70)	30					5.6727
Sig.		1.000	.494	.058	1.000	1.000

ตาราง จ-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีเหลือง (b*)

n	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
1500(60)	30	33.4027					
1000(50)	30	35.5193	35.5193				
1500(70)	30		37.9803	37.9803			
1500(50)	30			39.1380			
500(70)	30				42.1920		
500(50)	30				43.2853	43.2853	
1000(70)	30				44.3143	44.3143	44.3143
1000(60)	30					45.3420	45.3420
500(60)	30						46.5097
Sig.		.136	.083	.414	.159	.173	.145

ตาราง จ-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแตกต่างสีรวม (ΔE^*)

n	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
500(60)	30	10.3763			
1000(60)	30	10.6263			
1000(70)	30	10.9842			
500(50)	30		14.2547		
500(70)	30		15.3757		
1500(50)	30		15.8553		
1500(70)	30			18.9673	
1000(50)	30			21.3913	21.3913
1500(60)	30				24.2533
Sig.		.720	.343	.125	.071

ตาราง จ-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเข้มสี (C*)

n	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
1500(60)	30	33.6060				
1000(50)	30	35.6483	35.6483			
1500(70)	30		38.2083	38.2083		
1500(50)	30			39.3140		
500(70)	30				42.5947	
500(50)	30				43.5620	
1000(70)	30				44.5406	44.5406
1000(60)	30				45.4863	45.4863
500(60)	30					46.7810
Sig.		.147	.069	.431	.060	.133

ตาราง จ-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยสี (h*)

n	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
1000(60)	30	85.48			
1000(50)	30	85.16	85.16		
1500(50)	30	84.66	84.66		
1000(70)	30	84.24	84.24	84.24	
1500(60)	30		83.93	83.93	
500(60)	30		83.88	83.88	
1500(70)	30		83.79	83.79	
500(50)	30			82.99	82.99
500(70)	30				82.09
Sig.		.077	.060	.086	.163

ภาคผนวก ฉ

ค่าคงที่ในสมการออบแท้ง และการวิเคราะห์ความสามารถในการทำนายของสมการ



ตาราง ฉ.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดยใช้
หลอดอินฟราเรดขนาด 500 W

Equation		Drying Constant		
		50°C	60°C	70°C
page	k	0.474	1.023	1.208
	n	0.648	0.584	0.510
Modified page 1	k	0.527	0.969	1.106
	n	0.527	0.969	1.106
Modified page 2	k	0.316	1.039	1.448
	n	0.648	0.584	0.510
Newton	k	0.277	0.938	1.224
Henderson and Pabis	a	0.805	0.939	0.936
	k	0.213	0.864	1.123
Modified Henderson and Pabis	a	-0.057	0.313	0.312
	k	-0.016	0.864	1.123
	b	0.569	0.313	0.312
	g	0.852	0.864	1.123
	c	0.488	0.313	0.312
	h	0.089	0.864	1.123
Logarithmic	a	0.811	0.947	0.931
	k	0.320	1.158	1.536
	c	0.077	0.055	0.063
Midilli	a	1.034	1.041	1.022
	k	0.509	1.067	1.270
	n	0.613	0.707	0.674
	b	-0.001	0.004	0.005
Wang and Singh	a	-0.167	-0.224	-0.283
	b	0.007	0.011	0.018

ตาราง ณ-1 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดย
ใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 500 W

Equation		Drying Constant		
		50°C	60°C	70°C
Two term	a	0.402	0.469	0.468
	w	0.213	0.864	1.123
	b	0.402	0.469	0.468
	z	0.213	0.864	1.123
Two term exponential	a	1.000	1.000	1.000
	k	0.277	0.938	1.224
Diffusion approximation	a	1.000	1.000	1.000
	k	0.277	0.938	1.224
	b	1.000	1.000	1.000
Verma et al.	a	0.516	0.121	0.879
	k	0.140	0.088	1.780
	g	0.992	1.357	0.092

ตาราง ณ.2 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดยใช้
กำลังอินฟราเรดขนาด 1,000 W

Equation		Drying Constant		
		50°C	60°C	70°C
page	k	0.699	0.818	0.949
	n	0.617	0.558	0.565
Modified page 1	k	0.707	0.775	0.885
	n	0.707	0.775	0.885
Modified page 2	k	0.560	0.697	0.917
	n	0.617	0.558	0.540
Newton	k	0.500	0.601	0.783
Henderson and Pabis	a	0.845	0.813	0.812
	k	0.399	0.448	0.570
Modified Henderson and Pabis	a	0.282	0.532	0.271
	k	0.399	0.156	0.570
	b	0.282	0.778	0.271
	g	0.399	1.154	0.570
	c	0.282	-0.315	0.271
	h	0.399	0.202	0.570
Logarithmic	a	0.880	0.862	0.852
	k	0.617	0.774	0.936
	c	0.070	0.080	0.072
Midilli	a	1.036	1.027	1.029
	k	0.716	0.833	0.991
	n	0.679	0.640	0.590
	b	0.003	0.004	0.003
Wang and Singh	a	-0.206	-0.233	-0.299
	b	0.010	0.013	0.021

ตาราง ฉ-2 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้ง
โดยใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,000 W

Equation		Drying Constant		
		50°C	60°C	70°C
Two term	a	0.423	0.406	0.408
	w	0.399	0.448	0.577
	b	0.423	0.406	0.408
	z	0.399	0.448	0.577
Two term exponential	a	1.000	1.000	1.000
	k	0.500	0.601	0.767
Diffusion approximation	a	1.000	1.000	1.000
	k	0.500	0.601	0.767
	b	1.000	1.000	1.000
Verma et al.	a	0.252	0.240	0.320
	k	0.124	0.123	0.223
	g	0.952	1.197	1.868

ตาราง ณ.3 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดยใช้
กำลังอินฟราเรดขนาด 1,500 W

Equation		Drying Constant		
		50°C	60°C	70°C
page	k	0.532	0.936	1.438
	n	0.792	0.541	0.652
Modified page 1	k	-0.656	0.858	1.252
	n	-0.656	0.858	1.252
Modified page 2	k	0.451	0.885	1.745
	n	0.792	0.541	0.652
Newton	k	0.430	0.736	1.568
Henderson and Pabis	a	0.939	0.790	0.953
	k	0.400	0.523	1.484
Modified Henderson and Pabis	a	-0.313	0.263	0.318
	k	0.299	0.523	1.483
	b	1.001	0.263	0.318
	g	0.578	0.523	1.483
	c	0.324	0.263	0.318
	h	0.152	0.523	1.483
Logarithmic	a	0.940	0.847	0.938
	k	0.512	1.021	1.817
	c	0.054	0.094	0.047
Midilli	a	1.025	1.018	1.006
	k	0.537	0.963	1.541
	n	0.867	0.589	0.772
	b	0.003	0.004	0.006
Wang and Singh	a	-0.230	-0.328	-0.482
	b	0.013	0.026	0.052

ตาราง ฉ-3 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงที่ของสมการอบแห้งโดย
ใช้กำลังอินฟราเรดขนาด 1,500 W

Equation		Drying Constant		
		50°C	60°C	70°C
Two term	a	0.470	0.395	0.477
	w	0.400	0.523	1.483
	b	0.470	0.395	0.477
	z	0.400	0.523	1.483
Two term exponential	a	1.000	1.000	1.000
	k	0.430	0.736	1.568
Diffusion approximation	a	1.000	1.000	1.000
	k	0.430	0.736	1.568
	b	1.000	1.000	1.000
Verma et al.	a	0.169	0.317	0.889
	k	0.110	0.198	2.110
	g	0.604	1.888	0.193

ตาราง ณ.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2 อบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 500 W

Equation	R^2			χ^2		
	50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C
page	0.99339	0.94654	0.95248	0.00028	0.00156	0.00140
Modified page 1	0.93348	0.91925	0.91161	0.00451	0.00297	0.00343
Modified page 2	0.99339	0.94655	0.95249	0.00028	0.00156	0.00140
Newton	0.93354	0.91930	0.91158	0.00445	0.00292	0.00336
Henderson and Pabis	0.95192	0.91552	0.90690	0.00222	0.00289	0.00333
Modified Henderson and Pabis	0.96693	0.91552	0.90690	0.00176	0.00308	0.00363
Logarithmic	0.97340	0.97940	0.99050	0.00115	0.00061	0.00029
Midilli	0.99372	0.97477	0.98034	0.00029	0.00076	0.00062
Wang and Singh	0.82788	0.53910	0.50964	0.01439	0.04637	0.04748
Two term	0.95180	0.91534	0.90690	0.00229	0.00298	0.00347
Two term exponential	0.93354	0.91930	0.91158	0.00451	0.00297	0.00343
Diffusion approximation	0.93354	0.91933	0.91158	0.00458	0.00302	0.00350
Verma et al.	0.99850	0.98716	0.99910	0.00007	0.00037	0.00003

ตาราง ณ.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2 อบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,000 W

Eqation	R^2			χ^2		
	50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C
page	0.98253	0.97852	0.99150	0.00065	0.00075	0.00032
Modified page 1	0.93179	0.90966	0.91493	0.00373	0.00491	0.00480
Modified page 2	0.90564	0.93323	0.98571	0.00378	0.00243	0.00053
Newton	0.93178	0.90963	0.91495	0.00367	0.00482	0.00468
Henderson and Pabis	0.93472	0.90753	0.91937	0.00292	0.00385	0.00348
Modified Henderson and Pabis	0.93366	0.99922	0.91956	0.00311	0.00003	0.00385
Logarithmic	0.98373	0.98288	0.97074	0.00062	0.00061	0.00112
Midilli	0.99014	0.98978	0.99353	0.00038	0.00037	0.00026
Wang and Singh	0.70974	0.66275	0.70119	0.02593	0.02879	0.02813
Two term	0.93366	0.90730	0.91974	0.00301	0.00399	0.00365
Two term exponential	0.93178	0.90963	0.91600	0.00373	0.00491	0.00479
Diffusion approximation	0.93178	0.82347	0.91600	0.00379	0.00777	0.00490
Verma et al.	0.99956	0.99926	0.99959	0.00002	0.00003	0.00002

ตาราง ณ.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ค่า R^2 และ χ^2 ออบแห้งที่กำลังอินฟราเรด 1,500 W

Equation	R^2			χ^2		
	50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C
page	0.99008	0.98473	0.98535	0.00052	0.00060	0.00067
Modified page 1	0.97814	0.89697	0.96773	0.00141	0.00652	0.00176
Modified page 2	0.95914	0.97901	0.95826	0.00226	0.00083	0.00179
Newton	0.97814	0.89698	0.96773	0.00139	0.00635	0.00170
Henderson and Pabis	0.97904	0.89536	0.96708	0.00123	0.00469	0.00166
<i>Modified Henderson and Pabis</i>	0.65458	0.89509	0.96726	0.01815	0.00526	0.00194
Logarithmic	0.99729	0.96724	0.99702	0.00015	0.00130	0.00014
Midilli	0.99662	0.98731	0.99674	0.00019	0.00053	0.00016
Wang and Singh	0.82750	0.70852	0.65612	0.01437	0.02635	0.03644
Two term	0.97907	0.89536	0.96726	0.00128	0.00496	0.00179
Two term exponential	0.97814	0.89698	0.96773	0.00141	0.00652	0.00176
Diffusion approximation	0.97814	0.89698	0.96773	0.00144	0.00670	0.00182
Verma et al.	0.99919	0.99900	0.99964	0.00004	0.00004	0.00002

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธานินทร์ รัชโพธิ์
วันเกิด	วันที่ 27 มกราคม พ.ศ 2524
สถานที่เกิด	อำเภอ กันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 66 หมู่ 22 ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	นักศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ต.ตลาด อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ 2550 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ) สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม พ.ศ 2553 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิชาเทคโนโลยี พลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ได้รับทุนวิจัยจาก มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

