การพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

นางสาวจันทนา สีลาน้ำเที่ยง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

DEVELOPMENT OF HYBRID HEAT SOURCE FROM INFRARED RAY AND SOLAR ENERGY

JANTANA SEELANAMTIANG

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงาน แสงอาทิตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....

(ผศ. ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการ

....

(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

....

(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนรรค)

กรรมการ

....

(อ. ดร.สามารถ บุญอาจ)

กรรมการ

....

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง : การพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ (DEVELOPMENT OF HYBRID HEAT SOURCE FROM INFRARED RAY AND SOLAR ENERGY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, 111 หน้า.

คำสำคัญ : ตัวเก็บรังสีอาทิตย์/การอบแห้ง/มะม่วงอบแห้ง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบราบร่องรูปตัววีขนาดพื้นที่ 2x1 m^2 จำนวน 3 ชุด ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบขนาด 1500 W จำนวน 2 ตัว ห้องอบแห้งขนาด 0.6x0.6x0.6 m^3 ฮีตเตอร์อินฟราเรด 220 W จำนวน 4 ตัว ทำการทดสอบอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 81.56%(w.b) ครั้งละ 4 kg ด้วยพลังงานความร้อนร่วม 3 รูปแบบคือ แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบและรังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบและรังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) โดยกำหนดอุณหภูมิอบแห้งไว้ 3 ระดับคือ 60 70 และ 80°C ประเมินสมรรถนะการอบแห้งจากค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ อัตราการอบแห้ง และประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งจากค่าความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ ค่าความต่างของสี และเนื้อสัมผัส ผลการทดลองพบว่า รูปแบบพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าอุณหภูมิ 60°C และรังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง เป็นรูปแบบการให้พลังงานความร้อนที่เหมาะสมต่อการอบแห้งมะม่วงมากที่สุดเนื่องจาก มีค่าความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง และให้คุณภาพของมะม่วงอบแห้งด้านสี สารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกดีที่สุด ด้านสมรรถนะของเครื่องพบว่ามีค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี 72.92% ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 13.06 MJ/kg อัตราการอบแห้ง 0.25 kg/h

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร | ลายมือชื่อนักศึกษา จันทนา สีลาน้ำเที่ยง
ปีการศึกษา 2565 | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [signature]

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

JANTANA SEELANAMTIANG : DEVELOPMENT OF HYBRID HEAT SOURCE FROM INFRARED RAY AND SOLAR ENERGY. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TAWARAT TREEAMNUK, D.Eng, 111 PP.

Keyword : SOLAR COLLECTOR/DRYING/DRIED MANGO

The objective of this research was to design, develop, and evaluate the performance of a dryer with hybrid heat source from infrared ray and solar energy. The dryer consists of: 3 sets of 2x1 m^2 solar collector, 2 sets of 1500 W of the finned heater, 4 sets of 220 W of the infrared heater, and a drying chamber size of 0.6x0.6x0.6 m^3. Nam Dok Mai mango weight 4 kg with an initial moisture content of 81.56%(w.b) was used to drying with 3 types of hybrid energy source namely solar ray plus electrical fin-heater, solar ray plus electrical fin-heater and continuous infrared radiation, and solar ray plus electrical fin-heater and infrared ray intermittently (5 minutes on, 3 minutes off) with 3 levels of drying air temperature of 60 70 and 80°C. The performance of drying was evaluated by the efficiency of the solar collector, specific electrical energy consumption (SEEC), and drying rate. The qualities of dried mango were evaluated by moisture content, color difference, and texture profile analysis. The results showed the hybrid type of energy source of solar ray plus electrical fin-heater and infrared ray intermittent at drying temperature of 60°C is the most suitable for mango drying due to the dried mango has the moisture content and water activity accordance with the product standards of dried fruit industry. And the quality of dried mango in terms of color, antioxidants, and phenolic compounds are the best. The performance of the dryer, it was found that the solar collector efficiency was 72.92%, the specific energy consumption was 13.06 MJ/kg, and the drying rate was 0.25 kg/h.

School of Agricultural Engineering — Student's Signature ______________

Academic Year 2022 — Advisor's Signature ______________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้ คำแนะนำปรึกษาในการทำงานวิจัย ชี้แนะแนวคิดของงานวิจัย อีกทั้งยังสนับสนุนเงินทุนสำหรับการทำงานวิจัยและการเดินทางไปร่วมงานประชุมวิชาการ รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนในการศึกษาระดับมหาบัณฑิต และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่สำหรับงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้วิจัยตลอดมา และที่สำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ส่งเสริมการศึกษา ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยเป็นอย่างดี และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้องและเพื่อนสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจ ความช่วยเหลือและคำปรึกษาแก่ผู้วิจัยตลอดการทำงานวิจัย

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ข
กิตติกรรมประกาศ .... ค
สารบัญ .... ง
สารบัญตาราง .... ฌ
สารบัญรูป .... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฐ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ความชื้นในวัสดุ 4
2.1.1 ความชื้นสมดุลของวัสดุ 5
2.1.2 การหาความชื้นในวัสดุทางการเกษตร 8
2.2 การอบแห้ง 9
2.2.1 ช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น (preheating drying) 9
2.2.2 ช่วงการอบแห้งคงที่ (constant rate drying) 9
2.2.3 ช่วงการอบแห้งลดลง (Falling rate drying) 9
2.3 รังสีอินฟราเรด (Infrared, IR) 10
2.3.1 การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด 11
2.3.2 การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในงานอบแห้ง 11
2.4 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying) 13
2.4.1 การตากแดดกลางแจ้ง (Open sun drying, OSD) 14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรง (Direct solar dryer) 15
2.4.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Indirect solar dryer) 16
2.4.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม (Mixed-mode solar dryer) 17
2.4.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ (Passive mode solar dryer)........ 18
2.4.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับ (Active mode solar dryer)........ 18
2.5 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector)........ 18
2.5.1 ตัวเก็บรังสีแบบไม่รวมรังสี (Non-concentrating collectors)........ 18
2.5.2 ตัวเก็บรังสีแบบรวมรังสี (Concentrating collectors)........ 19
2.6 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง........ 20
2.6.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง........ 20
2.6.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง 21
2.7 การประเมินคุณภาพของวัสดุอบแห้ง........ 21
2.7.1 การทดสอบคุณภาพด้านสี........ 21
2.7.2 การทดสอบคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส........ 22
2.7.3 คุณภาพทางด้านเคมี........ 23
2.8 มะม่วง........ 24
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 25
3 วิธีดำเนินการวิจัย 29
3.1 ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง........ 29
3.2 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์........ 29
3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ........ 30
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ........ 30
3.2.3 เกณฑ์การออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบ........ 30

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4 การออกแบบและสร้างอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรด และพลังงานแสงอาทิตย์ 30

3.3 การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีเมื่อจัดวางแบบขนานและอนุกรม........ 35

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 35

3.3.2 วิธีการทดสอบ........ 35

3.3.3 การประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์........ 36

3.4 การทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์........ 37

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ 37

3.4.2 วิธีการทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์........ 41

3.4.3 การประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้ง........ 42

3.4.4 การประเมินคุณภาพมะม่วงอบแห้ง 43

3.5 การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอกลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้........ 44

3.5.1 การเตรียมสารสกัดจากมะม่วงน้ำดอกไม้........ 44

3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้วิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)........ 46

3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้วิธี Folin Ciocalteu 48

3.6 การหาความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้........ 50

3.6.1 วัสดุและอุปกรณ์........ 50

3.6.2 วิธีการทดสอบ........ 51

3.7 สมการการอบแห้งแบบชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์........ 53

3.7.1 วิธีการศึกษาสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง 53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล..55
4.1 ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรด
และพลังงานแสงอาทิตย์...55
4.1.1 ผลของการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์...55
4.1.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสี
อินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์...56
4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววี
เมื่อจัดวางแบบขนานและอนุกรม..56
4.3 ผลการทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้..61
4.4 ผลของการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง..65
4.4.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ...65
4.4.2 อัตราการอบแห้ง..67
4.5 สมบัติทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง...68
4.5.1 ความชื้นสุดท้ายและค่า water activity..68
4.5.2 คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์..69
4.5.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส..70
4.6 การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอกลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้...72
4.7 ผลการเปรียบเทียบที่สภาวะการอบแห้ง..73
4.8 สมการความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้...73
4.9 สมการการอบแห้งชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้..76
4.10 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์...77
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 81
5.1 สรุปผลการทดลอง...81
5.2 ข้อเสนอแนะ..82
รายการอ้างอิง 83

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก......89
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลอง......89
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ......100
ภาคผนวก ค แบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์......107
ภาคผนวก ง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่......109
ประวัติผู้เขียน......111

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของสารละลายอิ่มตัวบางชนิด 6
3.1 ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของสารละลายอิ่มตัว 50
3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล 53
4.1 ผลการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 57
4.2 ค่าความชื้นสุดท้าย ค่า water activity ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ และอัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ 66
4.3 ผลของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ 69
4.4 ผลของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้ 71
4.5 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้ของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ 72
4.6 ค่าความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ 74
4.7 ค่าประมาณของค่าคงที่ในสมการความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ 75
4.8 ค่าคงที่การอบแห้งแบบชั้นบางและค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ 76
4.9 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ 79
ก.1 ความชื้นเริ่มต้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ 90
ก.2 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรขนาน ที่อัตราการไหล 0.02 (kg/s) 90
ก.3 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรขนาน ที่อัตราการไหล 0.06 (kg/s) 91
ก.4 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรขนาน ที่อัตราการไหล 0.09 (kg/s) 91
ก.5 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.02 (kg/s) 92
ก.6 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.06 (kg/s) 92

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ก.5 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.02 (kg/s) 92
ก.6 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.06 (kg/s) 92
ก.7 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.09 (kg/s) 93
ก.8 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว (SC) 93
ก.9 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดอย่างเดียว (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) (IR-OC) 93
ก.10 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์และฮีตเตอร์ครีบ (60 70 และ 80 °C) (SC+H) 94
ก.11 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ ฮีตเตอร์อินฟราเรด (เปิดตลอด) และฮีตเตอร์ครีบ (60 70 และ 80 °C) (SC+H+IR-A) 94
ก.12 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ ฮีตเตอร์อินฟราเรด (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ครีบ (60 70 และ 80 °C) (SC+H+IR-OC) 95
ก.13 ปริมาณสารละลายมาตรฐาน Trolox ในการวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH 95
ก.14 ผลการหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของมะม่วงน้ำดอกไม้ 96
ก.15 ปริมาณสารละลายมาตรฐาน Gallic acid ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยใช้วิธี Folin Ciocalteu 97
ก.16 ผลการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้ 98

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ซอร์พชันไอโซเทอม 5
2.2 ความสัมพันธ์ความชื้นกับเวลา และอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้ง 10
2.3 การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างการให้ความร้อนแบบลมร้อนทั่วไป และแบบอินฟราเรด 12
2.4 หลักการทำงานของการตากแดดกลางแจ้ง 15
2.5 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรง 16
2.6 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม 17
2.7 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม 17
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลา 23
3.1 มะม่วงน้ำดอกไม้ 29
3.2 กระบวนการบนไซโครเมตริกซ์เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 32
3.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ 36
3.4 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์ 36
3.5 เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ 38
3.6 ตำแหน่งติดตั้งรังสีอินฟราเรด 39
3.7 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 39
3.8 ตู้อบลมร้อน 40
3.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง 40
3.10 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ 40
3.11 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส 41
3.12 การจัดวางมะม่วงสำหรับอบแห้ง 42
3.13 เครื่องวัดค่าสี HunterLab รุ่น UltraScan 44
3.14 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Memert รุ่น WNB14 45
3.15 เครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Centrifuge) ยี่ห้อ Thermo SCIENTIFIC รุ่น SORVALLLEGEND XRT Centrifuge 45

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.16 กรองสารสกัดส่วนใส 46
3.17 เก็บตัวอย่างไว้ใน polypropylene tubes ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ 46
3.18 ตัวอย่างหลังผ่านการบ่ม 30 นาที 47
3.19 การเตรียมตัวอย่างก่อนการวัดการดูดกลืนแสง 48
3.20 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrometer) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U2900 48
3.21 ตัวอย่างหลังผ่านการบ่ม 90 นาที 49
3.22 เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง 51
3.23 การวางตัวอย่างหาความชื้นสมดุล 52
4.1 เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ 56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar power) อุณหภูมิอากาศขาเข้า และออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับช่วงเวลาในการทดสอบ 60
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และอัตราการไหล 61
4.4 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นมะม่วงกับเวลาในการอบแห้งที่สภาวะต่างกัน 64
4.5 ลักษณะรอยไหม้ของมะม่วงอบแห้งเมื่อใช้รังสีอินฟราเรด 65
4.6 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ 67
4.7 อัตราการอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ 68
4.8 การให้คะแนนตามสมรรถนะการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ 73
4.9 ความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้จากการทดลอง 75
ข.1 กราฟมาตรฐานของ Trolox 104
ข.2 กราฟมาตรฐานของ Gallic acid 105
ค.1 แบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 108

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

M_d	=	ความชื้นมาตรฐานแห้ง (% d.b)
M_w	=	ความชื้นมาตรฐานเปียก (% w.b)
w	=	มวลของวัสดุที่เวลาใด ๆ (kg)
d	=	มวลแห้งของวัสดุ (kg)
Rh	=	ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)
M_{eq}	=	ความชื้นสมดุล (% d.b)
T	=	อุณหภูมิ (°C)
m_w	=	ปริมาณน้ำระเหย (kg_{water})
m_d	=	ปริมาณมวลแห้งปราศจากน้ำ ($kg_{dry\ solid}$)
M_i	=	ความชื้นเริ่มต้น (decimal, $kg_{water}/kg_{dry\ solid}$)
M_f	=	ความชื้นสุดท้าย (decimal, $kg_{water}/kg_{dry\ solid}$)
Q_u	=	ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (kW)
$\dot{m}$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
C_a	=	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg°C)
T_{CO}	=	อุณหภูมิของอากาศขาออกจากตัวเก็บรังสี (°C)
T_{CI}	=	อุณหภูมิของอากาศขาเข้าจากตัวเก็บรังสี (°C)
η_c	=	ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%)
A_c	=	พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)
I	=	ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2)
DR	=	อัตราการอบแห้ง (kg/h)
m_{water}	=	ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)
t	=	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)
SEEC	=	ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (MJ/kg)
E	=	พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kW-h)
w_i	=	น้ำหนักมะม่วงเริ่มต้น (kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

w_f	=	น้ำหนักมะม่วงหลังอบแห้ง (kg)
ΔE	=	ความต่างของสีระหว่างตัวอย่างที่ทำการเปรียบเทียบ
L^*_0	=	ค่าความสว่างของมะม่วงผลสด
a^*_0	=	ค่าความเป็นสีเขียวของมะม่วงผลสด
b^*_0	=	ค่าความเป็นสีเหลืองของมะม่วงผลสด
L^*	=	ค่าความสว่างของมะม่วงอบแห้ง
a^*	=	ค่าความเป็นสีเขียวของมะม่วงอบแห้ง
b^*	=	ค่าความเป็นสีเหลืองของมะม่วงอบแห้ง
MR	=	อัตราส่วนความชื้น
M_t	=	ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% d.b)
M_e	=	ความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้ (% d.b)
M_0	=	ความชื้นเริ่มต้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ (% d.b)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตสินค้าเกษตรอีกแห่งหนึ่งของโลกในแต่ละปีมีผลิตผลทางการเกษตรมากมายหลายประเภท ซึ่งปัจจุบันไม่ได้เน้นการปลูกเพื่อบริโภคภายในประเทศเพียงอย่างเดียว ยังส่งออกไปตลาดต่างประเทศ ทำรายได้ไม่น้อยกว่าแสนล้านบาท ผลไม้ที่นิยมส่งออกทั้งแบบสดและแปรรูป เช่น สับปะรด ลำไย ทุเรียน มะม่วง ลิ้นจี่ มะขาม กล้วย แอปเปิ้ล องุ่น มะละกอ เป็นต้น ปริมาณการส่งออกผักและผลไม้ในปี 2562-2563 ลดลงร้อยละ 2.21 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) สาเหตุประการหนึ่งที่ผักและผลไม้มีการส่งออกที่ลดลงเนื่องจากมีปัญหาด้านการเก็บรักษาและการขนส่งที่จะทำให้สินค้าคงความสดไม่เน่าเสียหรือเสื่อมคุณภาพเมื่อไปถึงผู้บริโภค นอกจากนี้ยังมีปัญหาผลิตผลทางการเกษตรล้นตลาดส่งผลให้เกิดการสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและผลิตผลจำนวนมาก การลดการสูญเสียอาหารเป็นปัญหาสำหรับเกษตรกรรายย่อยในประเทศ ซึ่งการอบแห้งวัสดุทางการเกษตรช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ลดการสูญเสียระหว่างการจัดเก็บ และประหยัดต้นทุนการขนส่ง (Augustus, Kumar, and Bhattacharya, 2002) วิธีดั้งเดิมที่นิยมใช้คือการตากแดดกลางแจ้งในประเทศเขตร้อน นิยมนำมาใช้กับผลไม้อบแห้ง เช่น กล้วย สับปะรด องุ่น ลูกพรุน มะม่วง มะละกอ ขนุน ทุเรียน ลำไย เป็นต้น การอบแห้งประเภทนี้ต้นทุนต่ำมาก เนื่องจากแหล่งพลังงานที่ใช้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายและสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตามวิธีการตากแดดกลางแจ้งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ และมีปัญหาเรื่องการปนเปื้อนจากฝุ่นหรือมลภาวะและมีแมลง สัตว์ฟันแทะมารบกวน นอกจากนี้ใช้เวลาในการอบแห้งนานและต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ ทำให้มีการสูญเสียระหว่างการเก็บรักษาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง จึงมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งทางกล พลังงานที่ใช้ผลิตความร้อนหรือขับเคลื่อนพัดลมจะใช้พลังงานเชื้อเพลิง เช่น ฟอสซิล น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และไฟฟ้า ในปัจจุบันทรัพยากรเชื้อเพลิงธรรมชาติลดลงอย่างรวดเร็วและต้นทุนเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และยังสร้างความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับพลังงานทดแทนโดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา (VijayaVenkataRaman, Iniyan, and Goic, 20122)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการเกษตรเพื่อการอบแห้งอาหารและพืชผลเป็นการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากจะประหยัดพลังงานแล้วยังช่วยประหยัดเวลา ใช้พื้นที่น้อยลง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นและกระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับการตากแดดกลางแจ้ง

การทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับพลังงานแหล่งความร้อนอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ลงได้และยังเป็นการอนุรักษ์พลังงานช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตและใช้พลังงานเชื้อเพลิงด้วย ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกพืชผลทางการเกษตรทั้งในรูปแบบของผลสดและผลิตภัณฑ์แปรรูป ในอุตสาหกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์อบแห้งมีการใช้พลังงานผลิตความร้อนหรือขับเคลื่อนพัดลมโดยใช้พลังงานเชื้อเพลิง ปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงมีปริมาณที่จำกัดและราคาแพงทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นและยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของประเทศ ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกอย่างหนึ่งเพื่อลดต้นทุนในการใช้พลังงานและยังเป็นการอนุรักษ์พลังงานช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตและใช้พลังงานเชื้อเพลิงด้วย ซึ่งประเทศไทยมีศักยภาพในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.1 MJ/m^2-day เหมาะสำหรับการใช้งานด้านความร้อนหรือไฟฟ้า (เทวรัตน์ และคณะ, 2560) อย่างไรก็ตามในช่วงที่มีเมฆมาก ฝนตกหรือในตอนกลางคืนทำให้ไม่สามารถอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์อย่างเดียวได้ตามที่ต้องการ จึงต้องใช้พลังงานเสริมเพื่อให้การอบแห้งดำเนินอย่างต่อเนื่องและคงที่

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบแบบร่องตัววีเพื่อเพิ่มความร้อนแก่อากาศอบแห้งก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง พร้อมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

1.2.2 เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น

1.2.3 เพื่อประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การพัฒนา ออกแบบ และสร้างเครื่องอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบ

1.3.2 สถานที่ทำการทดลอง ณ อาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

1.3.3 ใช้การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้เพื่อทำการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง

1.3.4 การประเมินสมรรถนะของเครื่องด้วยค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

1.3.5 ประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยค่าสี ความชื้น ปริมาณน้ำอิสระและเนื้อสัมผัส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบ

1.4.2 ทราบถึงสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งต้นแบบที่สร้างขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการอบแห้ง รังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มะม่วง การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง การประเมินคุณภาพของวัสดุอบแห้ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นในวัสดุ (moisture content) คือค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในวัสดุเทียบกับมวลของวัสดุ ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 รูปแบบ คือ

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) ใช้น้ำหนักของวัสดุที่แห้งเป็นฐานเขียนสมการได้ดังนี้

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d}\right)\times 100 \qquad (2.1)$$

ความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w) ใช้น้ำหนักของวัสดุที่ชื้นเป็นฐานเขียนสมการได้ดังนี้

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w}\right)\times 100 \qquad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง % (d.b)

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก % (w.b)

w คือ มวลของวัสดุที่เวลาใด ๆ (kg)

d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

ความชื้นมาตรฐานแห้งและความชื้นมาตรฐานเปียกมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.3)

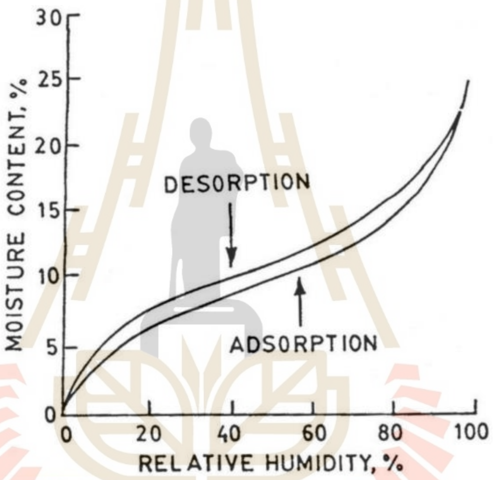
$$M_w = \left(\frac{M_d}{1+M_d}\right)\times 100 \qquad (2.3)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุมีค่าเกือบจะคงที่ในระหว่างการอบแห้ง เพื่อความเข้าใจจึงนิยมใช้ค่าความชื้นมาตรฐานเปียกมากกว่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2552)

2.1.1 ความชื้นสมดุลของวัสดุ

ความชื้นสมดุลเป็นสภาวะที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์คงที่แล้วความชื้นของวัสดุจะลดจนถึงความดันไอภายในวัสดุเท่ากับความดันไอของบรรยากาศ ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม เมื่อการแลกเปลี่ยนความชื้นระหว่างวัสดุและสิ่งแวดล้อมเข้าสู่จุดสมดุลไม่มีการเพิ่มหรือลดความชื้นจะแสดงพฤติกรรมเป็นเส้นโค้งรูปตัว S หรือเรียกว่า เส้นความชื้นสมดุลไอโซเทอม (equilibrium moisture isotherm) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ซอร์พชันไอโซเทอม (Bala, 1997)

ค่าความชื้นสมดุลเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาการอบแห้งและการเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตร เพื่อออกแบบเครื่องอบแห้งและการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอบแห้ง โดยการหาความชื้นสมดุลเป็นการนำวัสดุไว้ในที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศคงที่จนความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา วิธีที่นิยมใช้กันคือ วิธีการทางสถิต ทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศให้คงที่ด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัวดังแสดงในตารางที่ 2.1 และควบคุมอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ด้วยตู้อบ

ตารางที่ 2.1 ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของสารละลายอิ่มตัวบางชนิด (Talla, Jannot, Nkeng, and Puiggali, 2005)

Salt	Equilibrium relative humidity (%)			
	25°C	40°C	50°C	60°C
KOH	8.2	6.3	5.7	5.6
LiCl	11.3	11.2	11.4	11
KCH3CO2	22.5	21.6	21.6	21.6
MgCl2	32.8	31.6	30.5	29.3
K2CO3	43.2	42.2	45.6	45
NaBr	57.6	53.2	50.9	49.7
CuCl2	68.5	68	65.5	63.3
NaCl	75.3	74.7	74.4	74.5
KCl	84.3	82.3	81.2	80.3

Ghodake, Goswami, and Chakraverty (2007) ได้ทำการหาไอโซเทอมความชื้นของใบชาเหี่ยว ชาดำและชาเขียว ที่อุณหภูมิ 20 30 และ 40°C ซึ่งใช้วิธีสถิตในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ 10-90% จากการทดลองนำข้อมูลไปฟิตในแบบจำลองทั้ง 6 รูปแบบ คือ

Modified Henderson
$$M_{eq} = \left[-\frac{\ln(1-rh)}{a(T+c)} \right]^{1/b} \qquad (2.4)$$

Modified Chung-Pfost
$$M_{eq} = -\ln\left[-\frac{(T+c)\ln(rh)}{a} \right]\frac{100}{b} \qquad (2.5)$$

Modified Halsey
$$M_{eq} = \left[-\frac{\exp(a+bT)}{\ln(rh)} \right]^{1/c} \qquad (2.6)$$

Modified Smith
$$M_{eq} = (a+bT) - \left[(c+dT)\ln(1-rh) \right] \qquad (2.7)$$

Modified Oswin
$$M_{eq} = (a+bT)\left(\frac{rh}{1-rh} \right)^{c} \qquad (2.8)$$

GAB $$M_{eq} = \frac{abc \times rh}{(1-c(rh))(1-c(rh)+bc(rh))} \quad (2.9)$$

เมื่อ Rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% d.b)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

a, b, c, d คือ ค่าคงที่

จากข้อมูลแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่มีค่า MRE และ SEE ต่ำที่สุด คือ Modified Halsey ในการทำนายค่าความชื้นของใบชาเหี่ยว ชาดำและชาเขียว

Jayas and Mazza (1993) ได้ทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของข้าวโอ๊ต 3 สายพันธุ์ (Dumont, Newman และ Tibor) ที่อุณหภูมิ 10 25 40 และ 55°C และใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวที่ให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 11-96% โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 รูปแบบ คือ

Modified Henderson $$1-rh = \exp\left[-a(T+c)M_{eq}^{b}\right] \quad (2.10)$$

Modified Chung-Pfost $$rh = \exp\left[-\frac{a}{T+c}\exp\left(-bM_{eq}/100\right)\right] \quad (2.11)$$

Modified Halsey $$rh = \exp\left[-\exp(a+bT)M_{eq}^{-c}\right] \quad (2.12)$$

Modified Oswin $$rh = 1/\left[\left\{(a+bT)/M_{eq}\right\}^{c}+1\right] \quad (2.13)$$

Modified GAB $$M = \frac{a(c/T)brh}{(1-brh)\left[1-brh+(c/T)brh\right]} \quad (2.14)$$

เมื่อ rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% d.b)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

a, b, c คือ ค่าคงที่

จากผลการสร้างแบบจำลองทั้ง 5 แบบข้างต้นพบว่า Modified Chung-Pfost ให้ค่าในการทำนายผลการทดลองได้ดีที่สุดทั้ง 3 สายพันธุ์ และพบว่าค่าความชื้นสมดุลของสายพันธุ์ Tibor ที่ไม่มีเปลือกสูงกว่าอีก 2 สายพันธุ์ การเพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากโปรตีนที่สูงขึ้น (16-18% สำหรับข้าวโอ๊ตที่ไม่มีเปลือก และ 12-14% สำหรับข้าวโอ๊ตทั่วไป) และปริมาณเส้นใยที่ต่ำกว่าข้าวโอ๊ตทั่วไป

การหาค่าสมการเพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุต่าง ๆ จะแตกต่างกันไปตามประเภทของวัสดุ การเลือกรูปแบบสมการจะต้องมีการทดลองใช้ค่าสมการหลาย ๆ แบบเพื่อทำนายค่า แล้วทำการเปรียบเทียบรูปแบบสมการที่เหมาะสมมากที่สุด

2.1.2 การหาความชื้นในวัสดุทางการเกษตร

การหาความชื้นหาได้ 2 วิธี คือ วิธีทางตรงและวิธีทางอ้อม วิธีทางตรงเป็นการวัดด้วยการชั่งน้ำหนักค่อนข้างใช้เวลานาน วิธีทางตรงได้แก่ การหาความชื้นด้วยตู้อบ เช่น ตู้อบลมร้อน ตู้อบแบบสุญญากาศ และการหาความชื้นทางเคมี เช่น วิธีการไทเทรตแบบ Karl Fischer วิธีการไทเทรตสี และวิธีการกลั่น

วิธีทางอ้อมจะวัดความแปรผันของค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้า เช่น อุณหภูมิ ดัชนีการหักเหของแสง ความดัน ความยาวคลื่น กระแสไฟฟ้า เป็นต้น ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้น วิธีนี้อาจเร็วกว่าวิธีทางตรง แต่อาจมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมและสมบัติของวัสดุ ซึ่งจะต้องสอบเทียบกับวิธีทางตรงเสมอ วิธีทางอ้อมได้แก่ วิธีการทางแสง (เช่น Infrared spectroscopy กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด Hyperspectral imaging (HSI)) วิธีการทางไดอิเล็กตริก (เช่น การวัดความชื้นจากการนำไฟฟ้า การวัดความชื้นจากคลื่นไมโครเวฟ การวัดความชื้นจากความถี่วิทยุ (RF)) วิธีการทางนิวเคลียร์และวิธีการทาง Hygrometric วิธีการทางอ้อมส่วนใหญ่ยกเว้นวิธี Hygrometric จะใช้การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้อิทธิพลของน้ำในวัสดุกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อหาปริมาณความชื้น (Zambrano, Dutta, Mercer, MacLean, and Touchie, 2019)

วิธีการทางตรงใช้เวลานานกว่าวิธีการทางอ้อมและเหมาะสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ โดยชั่งน้ำหนักก่อนและหลังอบไล่ความชื้นของวัสดุ ซึ่งปริมาณความชื้นคำนวณได้จากน้ำหนักสูญเสียไป เพื่อความแม่นยำอาจสังเกตจากน้ำหนักของวัสดุ หากพบว่าน้ำหนักของวัสดุเปลี่ยนไป ควรอบต่อจนกว่าน้ำหนักจะไม่เปลี่ยนแปลง วิธีการทางอ้อมมักใช้ตัวอย่างที่น้อยกว่าและสามารถใช้ในงานภาคสนามได้ แต่บางวิธีการก็ต้องใช้กราฟเส้นโค้งของวัสดุในการสอบเทียบ บางวิธีก็เหมาะสำหรับวัดตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำเท่านั้น ซึ่งแต่ละวิธีการที่จะใช้ขึ้นอยู่กับวัสดุตัวอย่างที่จะหาความชื้น (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2552)

2.2 การอบแห้ง

การอบแห้ง (drying) เป็นกระบวนการลดความชื้นโดยการถ่ายเทความร้อนพร้อมกับการถ่ายเทมวล (ความชื้น) โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุ (Ekechukwu, 1999) การอบแห้งใช้อากาศเป็นตัวกลางในการรับความชื้นจากวัสดุไปยังอากาศโดยรอบ ซึ่งอัตราการระเหยหรืออัตราการอบแห้งของวัสดุขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยทั่วไปอัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะลดลง และเป็นศูนย์เมื่อถึงจุดสมดุล

วัสดุทางการเกษตรมีความชื้นค่อนข้างสูงส่งผลให้เกิดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวเนื่องจากเกิดเชื้อราจากความชื้นของวัสดุทำให้สูญเสียคุณภาพและการเสื่อมเสียทางกายภาพได้ การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ลดการสูญเสียระหว่างการจัดเก็บ โดยทำการขจัดความชื้นออกจากวัสดุส่งผลให้ลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เชื้อรา และสะดวกในการขนส่ง (Brennan, 2005) โดยปกติในการอบแห้งวัสดุใด ๆ อัตราการอบแห้งมี 3 ช่วงดังนี้

2.2.1 ช่วงการให้ความร้อนเริ่มต้น (preheating drying)

เป็นช่วงให้ความร้อนแก่วัสดุ โดยที่ผิวของวัสดุจะเข้าสู่สมดุลกับอากาศ เมื่อเริ่มทำการอบแห้งซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่สั้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง A-B

2.2.2 ช่วงการอบแห้งคงที่ (constant rate drying)

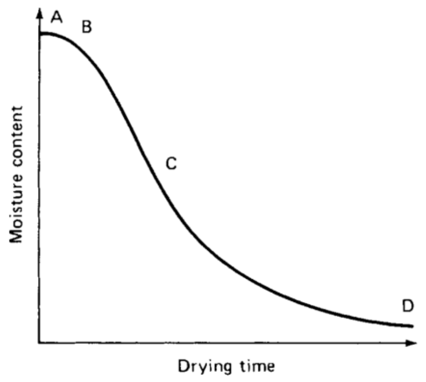
เป็นการอบแห้งในช่วงที่วัสดุมีความชื้นสูง โดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของวัสดุออกมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิววัสดุทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่ ซึ่งผิววัสดุจะยังคงชุ่มไปด้วยน้ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ช่วง B-C

2.2.3 ช่วงการอบแห้งลดลง (Falling rate drying)

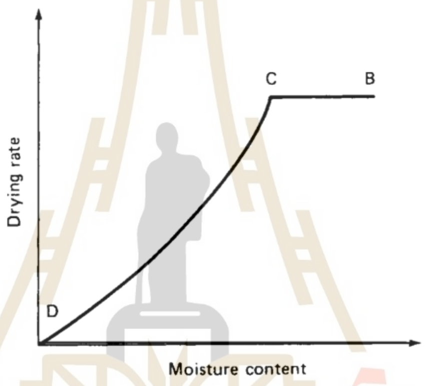
เป็นการอบแห้งในช่วงที่ปริมาณน้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิววัสดุลดลง จนถึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น โดยเรียกอัตราการอบแห้งลดลงความชื้นว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ช่วง C-D

แต่ในทางปฏิบัติผิวของวัสดุจะค่อย ๆ แห้งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกัน และอัตราการอบแห้งโดยรวมจะค่อย ๆ ลดลงในช่วงของอัตราเร็วคงที่ จุดความชื้นวิกฤตของวัสดุแต่ละชนิดจึงไม่เท่ากัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้น

รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ความชื้นกับเวลา และอัตราการอบแห้งและความชื้นของการอบแห้ง (Fellow, 1997)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 รังสีอินฟราเรด (Infrared, IR)

การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทพลังงานโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง โดยปลดปล่อยพลังงานออกจากสสารในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รังสีที่ปลดปล่อยเกิดการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุและอุณหภูมิอากาศแตกต่างกัน รังสีอินฟราเรดแบ่งได้เป็น 3 ระดับ ได้แก่ รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared, NIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.78-1.4 μm รังสีอินฟราเรดกลาง (Mid-infrared, MIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 1.4-3 μm และรังสีอินฟราเรดไกล (Far-infrared, FIR) มีความยาวคลื่นระหว่าง 3-1000 μm การแผ่รังสีมีทั้งการพึ่งพาสเปกตรัมและทิศทางเนื่องจากเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Ranjan, Irudayaraj, and Jun, 2002)

2.3.1 การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

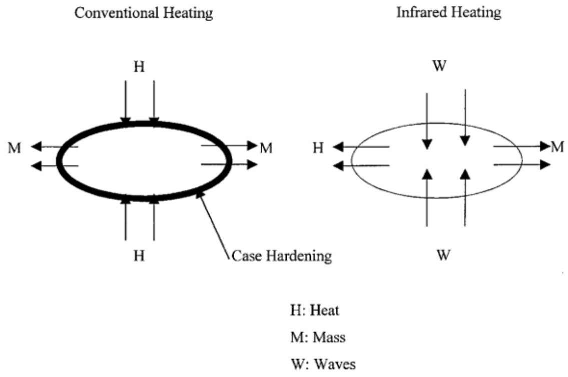
การให้ความร้อนโดยใช้รังสีอินฟราเรดเป็นการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับรังสีอินฟราเรดของวัสดุทำให้โมเลกุลของวัสดุที่เกิดการสั่น ส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นพลังงานความร้อนจะถ่ายเทให้วัตถุโดยตรงด้วยการแผ่รังสีโดยไม่ต้องใช้ตัวกลางจึงมีความร้อนสูญเสียต่ำ และสามารถให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (Khir, Pan, Salim, Hastsough, and Mohamed, 2011) การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่มีผิวมันวาวสะท้อนแสงเนื่องจากรังสีส่วนใหญ่จะถูกสะท้อนกลับออกไปทำให้ประสิทธิภาพการให้ความร้อนต่ำ อุปกรณ์มีขนาดเล็กกว่าฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบอื่นทำให้การออกแบบเครื่องอบแห้งมีขนาดกะทัดรัดช่วยลดต้นทุนในการสร้างเครื่อง

2.3.2 การประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรดในงานอบแห้ง

ในกระบวนการอบแห้งการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนมีความสำคัญเนื่องจากต้นทุนด้านพลังงานสูงขึ้นและสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อม การสรรหาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มอัตราการอบแห้งและประหยัดพลังงาน เช่น การพาความร้อนและการแผ่รังสี (Sandin, Chegini, and Sandin, 2014) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีรังสีอินฟราเรดได้รับความสนใจเผื่อเป็นทางเลือกแทนเทคโนโลยีการแปรรูปอื่น ๆ เนื่องจากการสร้างความร้อนมีประสิทธิภาพสูงสามารถสร้างความร้อนในเวลาที่รวดเร็ว การให้ความร้อนสม่ำเสมอ ช่วยลดเวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการความร้อนแล้วคุณภาพดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป สามารถช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการตลอดจนลักษณะทางกายภาพและรสชาติที่ดีของผลิตผลทางการเกษตร (Hashimoto, and Kameoka, 1999)

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นการปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานความร้อนมาตกกระทบลงบนพื้นผิวของวัสดุ รังสีอินฟราเรดทะลุผ่านวัสดุ โดยที่พลังงานการซึมผ่านของรังสีอินฟราเรดจะลดลงตามระยะความลึกของการทะลุผ่าน เกิดการดูดซับพลังงานรังสีอินฟราเรดในวัสดุ ทำให้โมเลกุลในเนื้อวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวของความชื้นด้านในวัสดุไปยังพื้นผิวของวัสดุและระเหยน้ำออกที่พื้นผิวของวัสดุ ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไป และผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลให้มีคุณภาพดีขึ้น ในการอบแห้งแบบลมร้อนทั่วไปความร้อนจะขึ้นอยู่กับพื้นผิวของวัสดุเป็นหลัก โดยการพาความร้อนจากการหมุนเวียนอากาศร้อนและการถ่ายเทความร้อนไปยังด้านในวัสดุจะเกิดขึ้นโดยการนำความร้อน ซึ่งส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของวัสดุและขัดขวางการถ่ายเทมวล ความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างการให้ความร้อนแบบลมร้อนทั่วไปธรรมดาและแบบอินฟราเรดดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างการให้ความร้อนแบบลมร้อนทั่วไปและแบบอินฟราเรด (Hebbar and Rostagi, 2001)

การแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังวัสดุขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างแหล่งกำเนิด ลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ปริมาณความชื้นของวัสดุ การแผ่รังสีของแหล่งกำเนิด การดูดซับพื้นผิวของวัสดุ การสะท้อนกลับ และความลึกของการซึมผ่านของรังสี (Hebbar and Rostagi, 2001)

จากงานวิจัยของ Nowak and Lewicki (2004) พบว่าเครื่องอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดประสิทธิภาพการใช้พลังงานมากกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน 35-45% เวลาในการอบแห้งลดลง 50% และจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดของชิ้นแอปเปิ้ลขึ้นอยู่กับระยะระหว่างแหล่งกำเนิดกับพื้นผิวที่ฉายรังสีและความเร็วลม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Afzal, Abe, and Hikida (1999) พบว่าการใช้รังสีอินฟราเรดอบแห้งข้าวบาร์เลย์ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งและลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลง เมื่อเพิ่มความเร็วลมส่งผลให้ค่าการใช้พลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นตาม Hall (1962) และ Jenkins and Forth (1965) ได้รายงานเกี่ยวกับข้อจำกัดของการทำความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด เหมาะสำหรับการให้ความร้อนที่พื้นผิวของวัสดุหรือการอบแห้งแบบชั้นบาง เนื่องจากความชื้นของวัสดุลดลงแต่อุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุเพิ่มขึ้น การดูดซับพลังงานจะลดลง ดังนั้นจึงมีการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบอื่น ๆ (Chu and Chou, 2003) โดย Das, Das, and Bal (2009) ได้ทำการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบการสั่นสะเทือนมาช่วยในการกระจายความร้อน พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้นและลดปริมาณการแตกหักของข้าว และ Hebbar, Vishwanathan, and Ramesh (2004) ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งรังสีอินฟราเรด (MIR) ร่วมกับลมร้อนแบบต่อเนื่องสำหรับอบแห้งผัก พบว่าการอบแห้งแบบผสมของมันฝรั่งใช้เวลาในการอบแห้ง 180 นาที และค่าการใช้พลังงานจำเพาะของการอบแห้งแบบผสมของมันฝรั่ง 6.43 MJ/kg ซึ่งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว

2.4 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying)

ในประเทศกำลังพัฒนานิยมใช้วิธีการตากแดดกลางแจ้งแบบดั้งเดิมในการอบแห้งเพื่อเก็บรักษาผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผลไม้ ผัก ธัญพืช เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัด แต่ก็มีข้อเสียที่ไม่สามารถควบคุมสภาพภูมิอากาศ ใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ ระยะเวลาในการทำให้แห้งนานและผลิตภัณฑ์อาจจะไม่ได้คุณภาพเนื่องจากการอบแห้งไม่เพียงพอต่อการลดความชื้นส่งผลให้เกิดการเน่าเสียได้ และยังมีแมลง สัตว์ฟันแทะและนกมารบกวน ฝุ่นและมลภาวะมาปนเปื้อนในวัสดุได้ เพื่อเอาชนะข้อจำกัดนี้จึงได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งทางกลทำให้ลดการสูญเสียพืชผลและลดความชื้นถึงที่เก็บรักษาได้อย่างปลอดภัย ซึ่งใช้เชื้อเพลิงทั่วไป เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล ไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับให้ความร้อนกับอากาศ ในประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่เชื้อเพลิงเหล่านี้มีราคาที่สูง และเครื่องอบแห้งนำเข้ามักจะมีราคาสูงเกินไปที่จะใช้ (Ekechukwu and Norton, 1999; Fudholi, Sopian, Ruslan, Alghoul, and Sulaiman, 2010)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกหนึ่งที่เหมาะสำหรับประเทศกำลังพัฒนาเนื่องจากความผันผวนของราคาเชื้อเพลิง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการลดลงของเชื้อเพลิง ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกการใช้พลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล ประเทศไทยมีศักยภาพในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สูง ปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 18.1 MJ/m^2-day เหมาะสำหรับการใช้งานด้านความร้อนหรือไฟฟ้า (เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และคณะ, 2560) พลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำไปใช้ได้ดีในภาคเกษตรกรรมสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณความชื้นเริ่มต้น ปริมาณความชื้นสุดท้าย อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ (Prakash and Anil, 2013)

การตากแดดกลางแจ้งของผลิตผลทางการเกษตรหากสภาพอากาศอบอุ่นและแห้งแล้ง พืชผลก็สามารถตากให้แห้งได้ ความชื้นสัมพัทธ์แวดล้อมต่ำในช่วงระยะเวลาเก็บเกี่ยวจะทำให้พืชผลแห้งจนถึงความชื้นที่สามารถเก็บไว้ได้อย่างปลอดภัย ถ้าหากสภาพอากาศที่ร้อนและชื้นการตากแดดกลางแจ้งจะใช้ระยะเวลานาน ซึ่งส่งผลให้ความชื้นสูงสุดท้ายของวัสดุสูงทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ ดังนั้นการทำให้แห้งด้วยวิธีการตากแดดจะต้องขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของพื้นที่แต่ละพื้นที่

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้แหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหลักหรือเป็นพลังงานเสริม การไหลของอากาศสามารถเกิดขึ้นได้จากการพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบบังคับ กระบวนการให้ความร้อนเกิดจากอากาศเคลื่อนผ่านทำให้อากาศอุ่นแล้วไหลผ่านวัสดุหรือการให้วัสดุสัมผัสกับรังสีอาทิตย์โดยตรง การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุโดยการพาความร้อนและการนำความร้อนจากมวลอากาศโดยรอบที่อุณหภูมิสูงกว่าวัสดุหรือจากการแผ่รังสี การดูดซับความร้อนของวัสดุทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุเป็นเพียง

การระเหยน้ำจากผิวของวัสดุเมื่อพลังงานที่ดูดซับเพิ่มอุณหภูมิเพียงพอทำให้แรงดันไอน้ำของวัสดุมากกว่าความดันไอน้ำของอากาศโดยรอบ กระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุและปริมาณความชื้นของวัสดุ

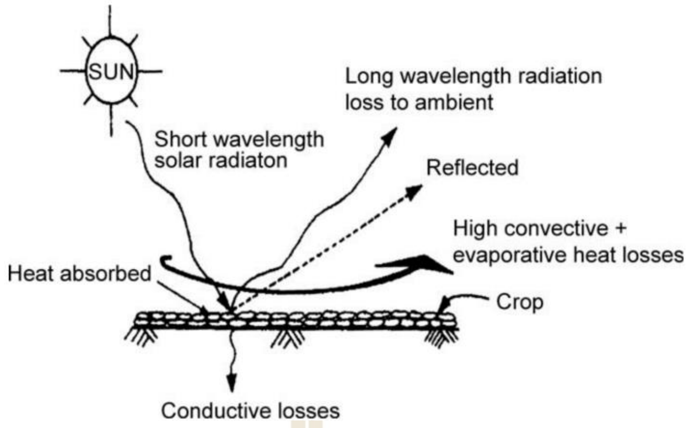
ในการอบแห้งด้วยรังสีโดยตรงนั้นรังสีอาทิตย์ส่วนหนึ่งอาจจะทะลุผ่านวัสดุและอีกส่วนจะถูกดูดซับภายในตัววัสดุ จึงสร้างความร้อนขึ้นภายในและที่ผิวของวัสดุซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน การดูดซับรังสีอาทิตย์ของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญในการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ส่วนใหญ่แล้ววัสดุทางการเกษตรมีการดูดซับค่อนข้างสูงซึ่งอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อทำการอบแห้ง การนำความร้อนของวัสดุทางการเกษตรก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง โดยเฉพาะชั้นอบที่อยู่ลึกจะต้องการการนำความร้อนระหว่างอนุภาค

การจำแนกประเภทของการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกตามลักษณะการให้ความร้อนได้ 4 ประเภท ได้แก่ การตากแดดกลางแจ้ง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรง เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม และสามารถจำแนกตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับ

2.4.1 การตากแดดกลางแจ้ง (Open sun drying, OSD)

ผลิตผลทางการเกษตรที่ตากแห้งถูกกระจายบนพื้นดิน เสื่อ พื้นซีเมนต์ หรือวางบนชั้นที่สัมผัสกับรังสีดวงอาทิตย์และอากาศธรรมชาติ ซึ่งจะต้องพลิกกลับวัสดุอย่างสม่ำเสมอจนแห้งเพียงพอเพื่อให้ทุกส่วนโดนแสงแดดและกระตุ้นให้อากาศอิ่มตัวเร็วขึ้น โดยรังสีคลื่นสั้นกระทบกับผิววัสดุ ส่วนหนึ่งของรังสีจะสะท้อนกลับและอีกส่วนจะถูกดูดกลืนโดยพื้นผิวของวัสดุขึ้นอยู่กับสีของวัสดุ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4 รังสีที่ถูกดูดกลืนจะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้น อากาศร้อนจะเคลื่อนที่พาความชื้นออกจากวัสดุด้วยวิธีธรรมชาติ

วิธีแบบดั้งเดิมนี้ยังคงใช้อย่างแพร่หลาย มีต้นทุนที่ต่ำ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดซึ่งการทำให้แห้งอาจไม่เพียงพอทำให้สูญเสียผลิตผลทางการเกษตร เกิดเชื้อราและมีแมลงหรือสัตว์ฟันแทะมารบกวน อาจเกิดการปนเปื้อนฝุ่นและมลภาวะ และยังได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศจากเมฆครึ้มหรือฝนตก ส่งผลให้ได้ผลผลิตต่ำและอาจมีคุณภาพที่ต่ำ สำหรับภูมิอากาศแบบเขตร้อน การตากแดดจะเกิดปัญหาในช่วงฤดูฝน เนื่องจากผลิตผลที่นำมาตากจะถูกเก็บและเอาออกมาตากสลับกันเพื่อป้องกันความชื้นจากฝน คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อผลิตสินค้าเพื่อการตลาดผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำจะไม่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคและทำให้ราคาตกต่ำ

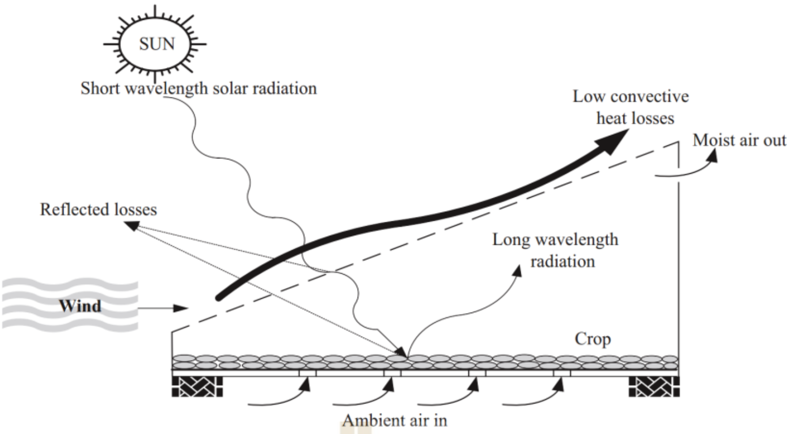


รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของการตากแดดกลางแจ้ง (Sharma, Chen, and Lan, 2009)

2.4.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรง (Direct solar dryer)

ประกอบด้วยกล่องที่มีฝาปิดหรือแผงด้านข้างแบบโปร่งใส พื้นผิวภายในของตัวเครื่องทาสีดำเพื่อดูซับรังสีอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งสูงขึ้น โดยวางวัสดุอบแห้งไว้ในกล่อง มีรูอากาศทั้งทางเข้าและทางออกเพื่อให้อากาศไหลผ่านและระบายอากาศออก วัสดุจะรับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงเกิดการดูดกลืนรังสีอาทิตย์เกิดความร้อนที่ผลิตภัณฑ์และพื้นผิวภายในห้องอบแห้ง เมื่อได้รับความร้อนอากาศภายในห้องอบแห้งเคลื่อนตัวและพาความชื้นออกจากวัสดุ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5 เครื่องอบแห้งประเภทนี้ทำอุณหภูมิภายในค่อนข้างสูงอาจสูงกว่า 60°C ทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นลง ผลิตภัณฑ์ไม่มีสิ่งปนเปื้อนจากมลภาวะและไม่ถูกรบกวนจากแมลงหรือสัตว์ฟันแทะ (Sodha and Chandra, 1994) เมื่อเทียบกับวิธีการตากแดดกลางแจ้งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าและลดความชื้นของวัสดุได้มากกว่า ซึ่งใช้ระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 1-3 ปี เครื่องอบแห้งประเภทนี้ก็ยังมีข้อจำกัด คือ

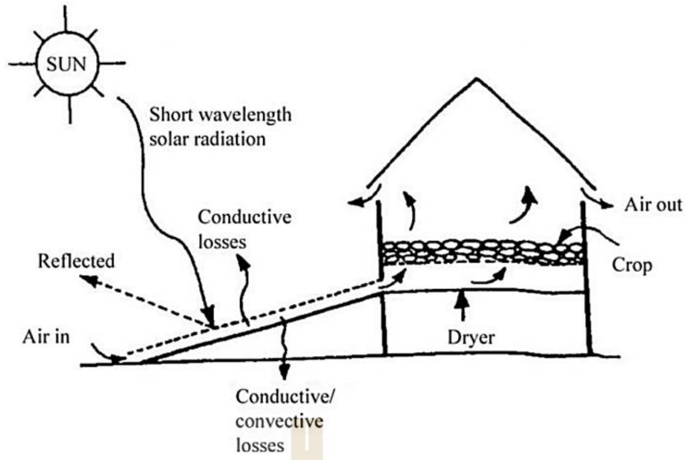
1) ขนาดความจุมีขนาดเล็ก
2) ผลิตผลได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงทำให้คุณภาพด้านสีลดลง
3) การควบแน่นของความชื้นจะไปลดการส่องผ่านของรังสี
4) บางครั้งอุณหภูมิในการอบแห้งไม่พอกับการกำจัดความชื้น
5) ผลิตผลบางชนิดดูดซับรังสีอาทิตย์ได้ไม่ดี เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความจุความร้อนจำเพาะต่ำ



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรง (Tomar, Tiwari, and Norton, 2017)

2.4.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Indirect solar dryer)

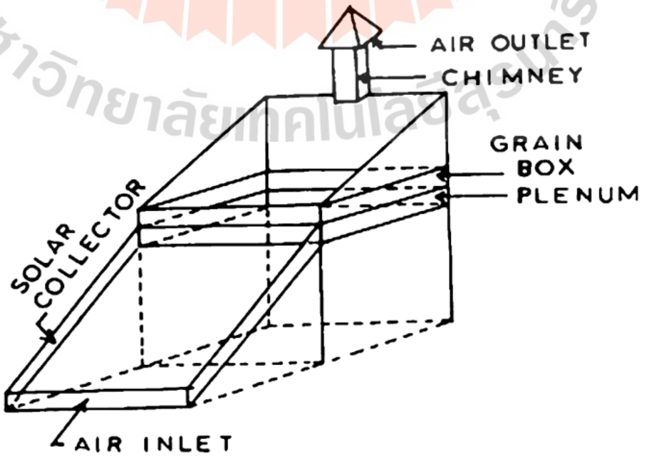
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำหน้าที่ผลิตลมร้อนก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีวัสดุสำหรับดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และถ่ายเทไปยังอากาศส่งผลให้อากาศร้อน ห้องอบแห้งเป็นแบบทึบแสงภายในจะหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน รังสีอาทิตย์จะไม่กระทบกับวัสดุโดยตรงเพื่อลดการเปลี่ยนสีและการแตกร้าวบนผิวของวัสดุ (Kumar, Sansaniwal, and Khatak, 2016) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 ข้อดีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม คือ อัตราการอบแห้งสูงสามารถอบผลิตผลให้แห้งได้ภายใน 15-30 ชั่วโมง สามารถควบคุมสภาวะอากาศอบแห้งทำให้ได้ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการและไม่มีการสูญเสียที่เกิดจากสัตว์หรือแมลง แต่ก็ยังมีข้อเสียคือต้นทุนในการสร้างเครื่องอบแห้งประเภทนี้สูงกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางตรง อย่างไรก็ตามสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาอันสั้น (Belessiotis and Delyannis, 2011)



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม (Sharma et al., 2009)

2.4.4 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม (Mixed-mode solar dryer)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมประกอบด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องอบแห้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ฝาครอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำจากวัสดุโปร่งใสเพื่อให้รังสีผ่านได้และมีตัวดูดซับรังสีภายในทำให้อากาศอุ่นขึ้นก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ซึ่งวัสดุจะได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงเนื่องจากห้องอบแห้งทำจากวัสดุโปร่งใส และอุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลของอากาศและอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทำให้ความชื้นระเหยออกจากวัสดุและทำให้อากาศลอยตัวไปยังช่องระบายอากาศด้านบน



รูปที่ 2.7 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสม (Janjai and Bala, 2012)

2.4.5 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ (Passive mode solar dryer)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติอาศัยการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติในการหมุนเวียนกระแสอากาศ โดยลมร้อนจากรังสีอาทิตย์จะไหลผ่านวัสดุด้วยแรงลอยตัวหรือแรงลม อากาศชื้นจะไหลออกทางช่องระบายอากาศด้านบน ข้อดีของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติเมื่อเทียบกับการตากกลางแจ้งคือใช้พื้นที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ไม่เกิดเชื้อรา หรือแมลง สัตว์ฟันแทะมารบกวนขณะอบแห้ง ผลิตผลได้รับการป้องกันจากฝนหรือมลภาวะต่าง ๆ ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลงทำให้อัตราการอบแห้งยิ่งสูงขึ้น ซึ่งต้นทุนและค่าบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือขนาดครอบครัว

2.4.6 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับ (Active mode solar dryer)

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับอาศัยระบบขับเคลื่อนอากาศเพื่อควบคุมการไหลของอากาศ โดยพัดลมจะดูดอากาศจากภายนอกให้ไหลผ่านแผงรับความร้อนเพื่อดูดซับความร้อนจากแสงแดดและถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ และไหลผ่านวัสดุในห้องอบแห้ง ซึ่งทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ และยังช่วยรักษาอุณหภูมิภายในระบบโดยควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้า สำหรับวัสดุที่มีความชื้นสูง เช่น มะละกอ กีวี และกะหล่ำปลี เหมาะสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับมากกว่าเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ

2.5 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับรับรังสีจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและสะสมพลังงานความร้อน จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายโอนไปยังตัวกลางไม่ว่าจะเป็นน้ำหรืออากาศ จากนั้นจึงส่งผ่านระบบท่อเพื่อใช้ทำความร้อนหรือน้ำร้อน หรือเก็บพลังงานความร้อนไว้ใช้ในภายหลัง ตัวเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ต้องมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการดูดซับความร้อน และยังสามารถจัดเก็บความร้อนหรือมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดี และมีความทนทานสามารถใช้งานได้ยาวนาน Tian and Zhao (2013) ได้จำแนกประเภทของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามลักษณะการรวมแสงเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.5.1 ตัวเก็บรังสีแบบไม่รวมรังสี (Non-concentrating collectors)

เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะดูดซับและสะท้อนรังสีอาทิตย์เพื่อเพิ่มปริมาณความร้อน โดยตัวเก็บรังสีแบบไม่รวมรังสีมีพื้นที่ดูดซับและพื้นที่รังรังสีอาทิตย์เป็นส่วนเดียวกัน

1) ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (Flat-plate collectors)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับรังสีอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ประกอบด้วยตัวดูดซับรังสีทาสีดำเพื่อเพิ่มการดูดกลืน และแผ่นใสปิดด้านบนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน

2) ตัวเก็บรังสีแบบ Hybrid PTV

ตัวเก็บรังสีสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าและความร้อนได้พร้อมกัน ประกอบไปด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ (PV) และแผ่นดูดซับที่ด้านหลังของ PV ทำหน้าที่ลดความร้อนของ PV ให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมรักษาประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าให้สูง และสะสมความร้อนอุณหภูมิต่ำมาใช้ เช่น การต้มน้ำร้อนในครัวเรือน

3) ตัวเก็บรังสีแบบ Enhanced hybrid PVT (Bifacial PVT)

ตัวเก็บรังสีแบบ Enhanced hybrid PVT สามารถจำแนกประเภทการใช้น้ำหรืออากาศเป็นตัวกลางในการรับความร้อน ระบบใช้น้ำเป็นตัวรับรังสีคลื่นยาวเพื่อสร้างความร้อนและใช้ PV ในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า เนื่องจากน้ำถือมีสมบัติเชิงแสงและความจุความร้อนสูง

2.5.2 ตัวเก็บรังสีแบบรวมรังสี (Concentrating collectors)

1) Heliostat field collectors

ตัวเก็บรังสีประเภทนี้สามารถทำอุณหภูมิได้สูงเนื่องจากมีอัตราส่วนการแผ่รังสีรวมสูงกว่าแบบไม่รวมรังสีส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงด้วย หรือที่รู้จักในชื่อ “Central Receiver Collector” ประกอบด้วยกระจกจำนวนหนึ่งที่สะท้อนแสงอาทิตย์เข้าสู่หอคอยได้อย่างแม่นยำ โดยการปรับมุมตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์และด้วยประสิทธิภาพการมองเห็นสูง

2) ตัวเก็บรังสีแบบจานพาราโบลา (Parabolic dish collectors)

ตัวเก็บรังสีแบบจานพาราโบลาใช้กระจกจำนวนหนึ่งสร้างเป็นทรงจานสะท้อนแบบพาราโบลา (รูปร่างคล้ายจานดาวเทียม) โดยรวมแสงไปยังจุดโฟกัสและถ่ายเทความร้อนไปยังตัวพาความร้อนเพื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิ เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในเครื่องยนต์ขนาดเล็ก ผลิตไอน้ำแรงดันปานกลางสำหรับรีดและบีบอัดในโรงงาน และไอน้ำแรงดันต่ำสำหรับระบบปรับอากาศของโรงงานทอผ้า

3) ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลา (Parabolic trough collectors)

ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลาสามารถรวมแสงอาทิตย์เข้าเป็นเส้นตรงและทำอุณหภูมิได้สูงในช่วง 350-400°C องค์ประกอบหลักของตัวเก็บรังสีคือตัวสะท้อนแสงแบบรางพาราโบลา สะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังจุดรวมแสงขนานกับแกนสมมาตรวางตัวรับเป็นท่อเหล็กสีดำเพื่อดูดซับรังสีของดวงอาทิตย์ (หุ้มด้วยท่อแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อน)

2.6 การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

ประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งสามารถพิจารณาได้ 2 ส่วน คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และประสิทธิภาพในการอบแห้ง

2.6.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการอบแห้ง

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อปริมาณความร้อนที่ให้แก่เครื่องอบแห้ง (เทวรัตน์ ทิพยวิมล, 2552)

$$\eta_{dry} = \frac{Q_{evap}}{Q_a} \times 100 \tag{2.15}$$

หรือ

$$\eta'_{dry} = \frac{Q_{evap} + Q_s}{Q_a} \times 100 \tag{2.16}$$

เมื่อ η_{dry} คือ ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (%)

η'_{dry} คือ ประสิทธิภาพของการอบแห้งเมื่อรวมความร้อนสัมผัส (%)

Q_{evap} คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)

Q_a คือ ปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)

Q_s คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)

นอกจากนี้ยังสามารถบอกประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งได้ในรูปของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งเป็นค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

$$SEC = \frac{Q_a}{w_i - w_f} \tag{2.17}$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)

w_i คือ น้ำหนักมะม่วงเริ่มต้น (kg)

w_f คือ น้ำหนักมะม่วงหลังอบแห้ง (kg)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6.2 ประสิทธิภาพในการอบแห้ง

ในการพิจารณาประสิทธิภาพในการอบแห้งจะประเมินจากค่าอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) ซึ่งสามารถคิดได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง คือ

$$DR = \frac{w_i - w_f}{t} \tag{2.18}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

สำหรับประสิทธิภาพในการอบแห้งนอกจากจะพิจารณาได้จากอัตราการอบแห้งแล้ว ยังต้องดูที่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ควบคู่กันไปด้วย นั่นคือความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ ปริมาณน้ำอิสระจะต้องมีค่าไม่เกินมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงเนื้อสัมผัส รส กลิ่น สี คุณค่าทางโภชนาการ ความสะอาด และอายุการเก็บรักษา เป็นต้น

2.7 การประเมินคุณภาพของวัสดุอบแห้ง

ผลิตผลทางการเกษตรเมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังวัดสุ ทำให้ปริมาณความชื้นลดลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระลดลงนอกจากนี้ยังเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับผลสด ดังนี้

2.7.1 การทดสอบคุณภาพด้านสี

ความร้อนในกระบวนการอบแห้งวัสดุทำให้ที่ผิววัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงของสีหรือเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงต้องมีการวัดค่าสีโดยใช้เครื่องมือในการวัดแทนการใช้สายตามนุษย์ เนื่องจากความสามารถในการรับแสงของแต่ละคนต่างกันจึงใช้อุปกรณ์เพื่อลดความไม่เป็นกลางของมนุษย์ การระบุสีเป็นค่าตัวเลขนั้นได้มีการพัฒนาโดยองค์กรนานาชาติเกี่ยวกับแสงและสี คือ International Commission on Illumination (CIE) ระบบสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ CIE L^* a^* b^* เป็นระบบการบรรยายสีแบบสามมิติซึ่งค่า L^* (Lightness) แสดงค่าความสว่างและมืดเมื่อมีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ ค่า a^* (Redness) แสดงค่าความเป็นสีแดงหรือสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ และค่า b^* (Yellowness) แสดงค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินเมื่อมีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ การหาความเปลี่ยนแปลงของสีหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งหรือค่าความแตกต่างของสีผลสดและหลังอบแห้ง พิจารณาจากระยะห่างของพิกัดสีสามารถหาได้จากสมการที่ 2.19

$$\Delta E=\sqrt{\left(L_0^*-L^*\right)^2+\left(a_0^*-a^*\right)^2+\left(b_0^*-b^*\right)^2} \quad (2.19)$$

เมื่อ ΔE คือ ความต่างของสีระหว่างตัวอย่างที่ทำการเปรียบเทียบ

L^*_0, a^*_0, และ b^*_0 คือ ค่าสีของผลสด

L^*, a^*, และ b^* คือ ค่าสีผลิตภัณฑ์อบแห้ง

2.7.2 การทดสอบคุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัส

เมื่อวัสดุผ่านกระบวนการอบแห้งการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในวัสดุจะเปลี่ยน ทำให้เนื้อสัมผัสแข็งและหดตัวขึ้น ซึ่งลักษณะของเนื้อสัมผัสมีความสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์สามารถพิจารณาได้จากการใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์ในการให้คะแนนความชอบทางด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของผู้บริโภค หรือใช้เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสเพื่อประเมินแรงต้านทานของผลิตภัณฑ์แทนพฤติกรรมการเคี้ยวในผู้บริโภคด้วยวิธี Texture Profile Analysis เป็นการวัดค่าพารามิเตอร์เนื้อสัมผัสของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำผ่านการกดของหัววัด 2 ครั้ง จากการใช้เครื่องวัดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะแสดงค่า Hardness เป็นแรงกดที่กระทำครั้งแรก ค่า Cohesiveness เป็นค่าที่วัสดุสามารถรับแรงได้ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ค่า Springiness เป็นอัตราการคืนรูปของวัสดุหลังจากถูกกด และค่า Chewiness เป็นแรงที่ใช้ในการบดตัวอย่างจนเสียรูป สามารถคำนวณหาค่าเนื้อสัมผัสต่างๆ ได้ตามสมการที่ 2.20-2.23 การนำค่าที่วัดได้จากเครื่องมือและค่าที่วัดด้วยประสาทสัมผัสมาเชื่อมโยงกันสามารถช่วยยืนยันความแม่นยำและชัดเจนของข้อมูลได้มากยิ่งขึ้น (Chong, Law, Cloke, Abdullah, and Daud, 2008)

$$Hardness, H = F_1 \quad (2.20)$$

$$Cohesiveness, C = \frac{A_2}{A_1} \quad (2.21)$$

$$Springiness, S = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.22)$$

$$Chewiness, CW = H \times C \times S \quad (2.23)$$

เมื่อ F_1 คือ แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างกดครั้งแรง (N)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A_1 คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นค่าบวกของการกดครั้งที่ 1

A_2 คือ พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นค่าบวกของการกดครั้งที่ 2

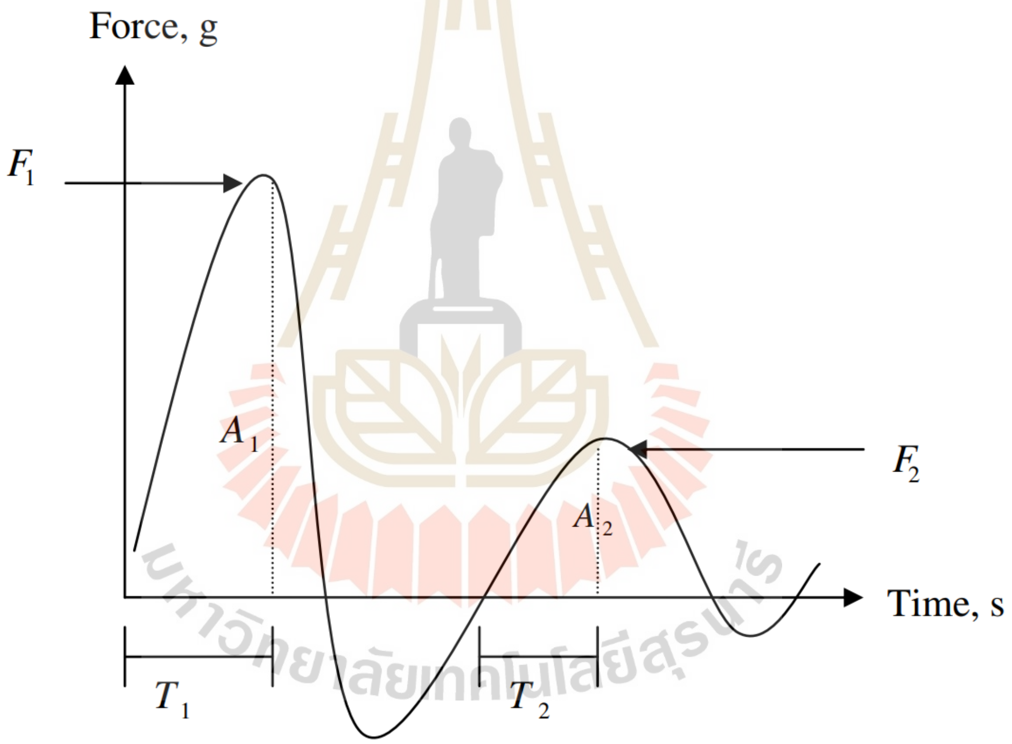
T_1 คือ ระยะเวลาที่วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างที่วัดได้จากการกดถึงแรงสูงสุดครั้งที่ 1 (s)

T_2 คือ ระยะเวลาที่วัสดุเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างที่วัดได้จากการกดถึงแรงสูงสุดครั้งที่ 2 (s)

H คือ ค่า Hardness (N)

C คือ ค่า Cohesiveness

S คือ ค่า Springiness



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลา

2.7.3 คุณภาพทางด้านเคมี

คุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญเช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิก กลุ่มแคโรทีนอยด์ กลุ่มฟลาโวนอยด์ วิตามินและเกลือแร่ เป็นต้น โดยสารประกอบเหล่านี้ไวต่อความร้อนง่ายต่อการสูญเสีย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการหาสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) และสารประกอบฟีนอกลิกโดยใช้วิธี Folin Ciocalteu ของมะม่วง

น้ำดอกไม้ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่นิยมใช้ได้แก่ 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) เป็นวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งใช้ reagent คือ 2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl เป็น stable radical ในตัวทำละลายแอลกอฮอล์ ซึ่งสารละลายนี้มีสีม่วง เมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไปทำให้สีม่วงนั้นจางลง เนื่องมาจากสารต้านอนุมูลอิสระไปให้โปรตอนกับอนุมูล DPPH วิธีนี้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว ข้อเสียคือ DPPH ค่อนข้างเสถียรไม่ไวต่อปฏิกิริยาเหมือนอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกายจริงจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้า ทำให้ค่าการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดได้น้อยกวาความเป็นจริง และต้องวัดในปฏิกิริยาที่เป็นแอลกอฮอล์

วิธีโดยใช้ 2, 2-azobis (3-ethyl-benzothialzoline-6-sulfonic acid) (ABTS) เป็นวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (Antioxidant capacity) ซึ่งใช้ reagent คือ2, 2-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt เป็น stable radical ใน aqueous solution ซึ่ง ABTS radical มีสีเขียวเมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไปทำให้สีเขียวนั้นจางลง เนื่องมาจากสารต้านอนุมูลอิสระไปให้อิเล็กตรอนกับอนุมูล ABTS ข้อดีของวิธีการนี้คือ ABTS ละลายได้ดีในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์จึงทำปฏิกิริยาได้อยางรวดเร็ว และทำปฏิกิริยาได้ดีในช่วง pH กว้างส่วนข้อเสียคือ ABTS ไม่เป็นสารธรรมชาติที่พบในร่างกายหรือในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต และต้องมีการทำปฏิกิริยากับสารอื่นก่อนถึงจะเกิดเป็นอนุมูลอิสระ และวิธีอื่น ๆ ซึ่งมักนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นตัวต้านออกซิเดชันในผักและผลไม้ชนิดต่าง ๆ (บุหรัน พันธุ์สวรรค์, 2556)

2.8 มะม่วง

มะม่วง (*Mangifera Indica* Linn.) เป็นไม้ยืนต้นและผลไม้เขตร้อนร้อนในวงศ์ ANACARDIACEAE (Barreto et al., 2008) ที่ปลูกกันอย่างแพร่หลายทั่วทุกภูมิภาคในประเทศไทย และมีสายพันธุ์ที่หลากหลาย ยังเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ เช่น กลุ่มแคโรทีนอยด์ (carotenoids) กลุ่มฟลาโวนอยด์ (flavonoids) สารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี และวิตามินเอ เป็นต้น (Andrés et al., 2007) มะม่วงเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถสร้างรายได้ให้แก่ประเทศเป็นอย่างมากเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในและต่างประเทศ โดยพันธุ์ที่มีการส่งออกมากที่สุดคือ เขียวเสวย หนังกลางวัน โชคอนันต์ น้ำดอกไม้ แรดและอกร่อง มะม่วงจัดเป็นไม้พุ่มขนาดกลาง ใบโต ยาว ปลายแหลม ขอบใบเรียบ ใบอ่อนสีแดง ออกดอกเป็นช่อตามปลายกิ่ง ดอกขนาดเล็ก สีขาว ผลอ่อนสีเขียว ผลแก่สีเหลือง เมล็ดแบน เปลือกหุ้มเมล็ดแข็ง Corzo and Álvarez (2012) ได้กล่าวถึงรสชาติ ลักษณะทางกายภาพและอายุการเก็บรักษาของมะม่วงขึ้นอยู่กับระดับความสุกในช่วงการเก็บเกี่ยว ฤดูการเก็บเกี่ยวในเดือนมีนาคม-เมษายน จำแนกตามลักษณะการใช้ประโยชน์แบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

1) มะม่วงเพื่อการรับประทานผลดิบ ใช้ประโยชน์ได้ตั้งแต่ระยะยังไม่แก่จนถึงแก่จัด ส่วนมะม่วงที่เนื้อมีรสหวาน มัน กรอบ หรืออบเปรี้ยวเล็กน้อย เรียกว่า มะม่วงมัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ บางพันธุ์ต้องปล่อยให้ผลอยู่ในสภาพแก่จัดเสียก่อนจึงจะอร่อย ส่วนใหญ่ใช้บริโภคภายในประเทศมีส่งออกขายต่างประเทศแต่ไม่มากนัก เช่น เขียวเสวย แรด หนองแซง ทองดำ ฟ้าลั่น และพิมเสนมัน

2) มะม่วงเพื่อการรับประทานผลสุก ผลของมะม่วงประเภทนนี้ขณะที่ดิบอยู่มีรสเปรี้ยวมาก ซึ่งตลาดต่างประเทศส่วนใหญ่รู้จักแต่มะม่วงกินสุกเท่านั้น นอกจากจะรับประทานผลสุกแล้วยังใช้ประกอบอาหารหวานได้ เช่น อกร่อง ทองแดง แรด น้ำดอกไม้ และโชคอนันต์

3) มะม่วงเพื่อการแปรรูป ซึ่งมะม่วงทุกสายพันธุ์ไม่สามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ทุกชนิด ผลิตภัณฑ์บางชนิดต้องการพันธุ์มะม่วงที่มีลักษณะเฉพาะ โดยพันธุ์มะม่วงที่มีบทบาทในการแปรรูปนั้น จะต้องเป็นพันธุ์ที่ปลูกกันมากและราคาไม่แพงจนเกินไป ผลิตภัณฑ์ที่นิยมนำมะม่วงแปรรูป เช่น มะม่วงดอง มะม่วงแช่อิ่ม มะม่วงกระป๋อง แยมมะม่วง น้ำมะม่วง ไอศกรีมมะม่วง และมะม่วงอบแห้ง เป็นต้น พันธุ์มะม่วงที่นำมาแปรรูป เช่น แก้ว มหาชนก โชคอนันต์ สามปีและน้ำดอกไม้ (สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดสุโขทัย, 2561)

เมื่อมะม่วงเริ่มสุกจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้และปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้น ทำให้รสชาติหวาน เนื้อสัมผัสนุ่มและมีกลิ่นเฉพาะตัว ซึ่งในประเทศไทยมะม่วงถือว่าเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานมากชนิดหนึ่ง ถึงแม้บริโภคได้ทั้งผลดิบและผลสุก แต่อย่างไรก็ตามในช่วงผลผลิตมะม่วงล้นตลาดมีปริมาณเกินความต้องการของผู้บริโภค ทำให้เกิดหารสูญเสียทั้งทางเศรษฐกิจและผลิตผลจำนวนมาก การแปรรูมะม่วงเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น มะม่วงกระป๋อง น้ำมะม่วง และมะม่วงอบแห้ง เป็นต้น มะม่วงอบแห้งแบบธรรมชาติที่ไม่มีการเพิ่มน้ำตาลและเติมวัตถุเจือปนอาหารเป็นที่สนใจสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ผลิตภัณฑ์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Madhlopa et al. (2002) ได้ศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้งมะม่วงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมประกอบด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบ (single flat-plate collector) อุปกรณ์ทำความร้อน (Heater) ห้องอบแห้งและปล่องระบายอากาศ โครงสร้างของตัวเก็บรังสีและห้องอบแห้งทำจากไม้และทาสีชมพูด้านนอกเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของไม้ สีชมพูช่วยดูดซับรังสีดวงอาทิตย์และช่วยลดการไล่ระดับอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวภายในและภายนอกห้องอบแห้ง ส่วนภายในห้องอบแห้งทาสีดำเพื่อเพิ่มการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ ฝาครอบตัวเก็บรังสีทำจากกระจก 1 ชั้น และทำมุมเอียง 16° กับระนาบแนวนอน ซึ่งตัวดูดซับรังสีทำจากลวดตาข่าย ส่วนปล่องระบายอากาศติดตั้งด้านบนทำจากเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีและทาสีดำเพื่อเพิ่มการดูดกลืนรังสี ในการอบแห้งมะม่วงความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 85%(w.b.) สามารถลดความชื้นของมะม่วงลงเหลือความชื้นสุดท้าย

เฉลี่ย 13%(w.b.) อัตราการไหลของอากาศเฉลี่ย 0.0083 kg/s ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี 21.3% เพิ่มอุณหภูมิของอากาศแห้งจาก 31.7°C เป็น 40.1°C ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลงเหลือประมาณ 51% ในช่วงเที่ยงวัน และยังคงกรดแอสคอร์บอก (ascorbic acid) ได้ 74%

Mwamba et al. (2017) ได้ทำการศึกษาวิธีการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และตู้อบลมร้อนในการอบแห้งมะม่วง ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณร้อยละผลผลิตของมะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 33% ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 14.17±0.01%(w.b.) และปริมาณร้อยละผลผลิตของมะม่วงที่ผ่านอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนได้ 26% ความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 8.25±0.01%(w.b.) โดยที่อุณหภูมิของอากาศอบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างวันอยู่ที่ 22.4°C ถึง 40.7°C ซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าและตู้อบลมร้อนอยู่ที่ 50°C เมื่อเทียบผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งที่มีปริมาณของวิตามิน B6 C และแร่ธาตุ (Ca Mg และ Fe) พบว่ามะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณที่มากกว่า แต่ก็มีสารอาหารบางชนิดที่มะม่วงที่ผ่านอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีมากกว่า หลังจากเก็บผลิตภัณฑ์ในถุงโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 วัน นำมาเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีกายภาพ จุลชีววิทยา และเนื้อสัมผัส พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะมะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เท่านั้นในเรื่องของการเกิดเชื้อรา ซึ่งการเกิดเชื้อรานั้นสามารถปรับปรุงแก้ไขได้โดยการปรับสภาพก่อนการอบแห้ง ดังนั้นเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นตัวเลือกหนึ่งสำหรับอุตสาหกรรมการเกษตร

Sparrow and Lin (1962) ได้ศึกษาการดูดกลืนรังสีของร่องรูปตัววี พบว่ารังสีตกกระทบที่พื้นผิวทั้งสองข้างของร่องรูปตัววี มีลักษณะพื้นผิวที่มันเรียบขัดมัน (specular surface) หรือไม่เรียบไม่สม่ำเสมอ (diffuse surface) จะดูดซับได้ทั้งรังสีตรงหรือรังสีกระจายในปริมาณที่มากกว่าแบบแผ่นเรียบทั้ง ๆ ที่มีขนาดที่เท่ากัน ซึ่งแบบร่องรูปตัววีชนิด 60° ที่มีลักษณะพื้นผิวที่มันเรียบขัดมัน โดยภาพรวมสามารถดูดซับรังสีได้ 90%

Karim and Hawlader (2006) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบซึ่งทำจากแผ่นสแตนเลส โดยทดลองเปรียบเทียบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบ 3 แบบคือ แบบธรรมดา แบบร่องรูปตัววีชนิด 60° และแบบมีครีบสูง 25 mm (ตัวดูดซับรังสีทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมทาสีดำ) ภายใต้เงื่อนไขสภาพภูมิอากาศของประเทศสิงคโปร์การทดลองอ้างอิงมาตรฐาน ASHRAE 93-77 จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.056 kg/m^{2}s แบบร่องรูปตัววีมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าแบบมีครีบ 2-5% และมากกว่าแบบธรรมดา 5-11% เนื่องจากมีพื้นที่ของแผ่นดูดกลืนมากกว่า และที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ 0.031 0.029 และ 0.030 kg/m^{2}s ให้อุณหภูมิของอากาศขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้ถึง 53 50 และ 48°C ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบร่องรูปตัววี แบบมีครีบและแบบแผ่นราบตามลำดับ ซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรคือ 0.035 kg/m^{2}s

Al-Juamily, Khalifa, and Yassen (2007) ได้สร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมแบบบังคับสำหรับการอบแห้งผักและผลไม้ในประเทศอิรัก เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ พัดลม และห้องอบแห้ง โดยมีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2 ตัว แบบร่องรูปตัววีชนิด 60° ซึ่งทำจากแผ่นสังกะสีทาสีดำเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังของไหล และเพิ่มการดูดซับรังสีอาทิตย์ซึ่งมีช่องอากาศไหลผ่าน 2 ช่อง และฝาครอบกระจกชั้นเดียว เพื่ออบแห้งองุ่นมีความชื้นเริ่มต้น 80%(w.b) ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 18%(w.b) ใช้เวลาในการอบแห้ง 2 วันครึ่ง แอปริคอตมีความชื้นเริ่มต้น 80%(w.b) ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 13%(w.b) ใช้เวลาในการอบแห้ง 1 วันครึ่ง และถั่วความชื้นเริ่มต้น 65%(w.b) ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 18%(w.b) ใช้เวลาในการอบแห้ง 1 วัน

ธีระศักดิ์ หุดากร (2552) ได้ศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบร่องรูปตัววีซึ่งทำจากแผ่นสังกะสีเอียงทำมุม 14° กับแนวระดับ ด้านบนของห้องอบแห้งติดพัดลมสำหรับระบายอากาศชื้นออกจากห้องอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.04 kg/s เพื่ออบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่มซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 91%(w.b) ให้เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 40.30%(w.b) พบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 47.0°C โดยมีประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุดที่ 56.23% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 16.90% และใช้เวลาในการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่อิ่ม 24 ชั่วโมง ในขณะที่ตากแดดกลางแจ้งใช้เวลาถึง 48 ชั่วโมง

Lingayat, Chandramohan, and Raju (2017) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อม ประกอบไปด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบร่องรูปตัววี (ตัวดูดซับรังสีทำจากแผ่นทองแดง) เอียงทำมุม 23.5° กับแนวระดับ ห้องอบแห้งทำจากแผ่นอลูมิเนียมไม่มีตัวหุ้มฉนวน และ chimney สูง 0.25 m เพื่อระบายอากาศ โดยจะทำการอบแห้งกล้วยซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 356% (d.b) ให้เหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 16.3292% 19.4736% 21.1592% 31.1582% และ 42.3748% (d.b) ของถาดชั้นที่ 1 2 3 4 และตากแดดกลางแจ้งตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 31.50% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยเท่ากับ 22.38%

ธีรเดช ใหญ่บก, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, จอมภพ แววศักดิ์, มารีนา มะหนิ, และภรพนา บัวเพชร (2552) ได้ศึกษาการอบแห้งปลาด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้า ที่มีแผงรับรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 ด้านของเครื่องอบแห้ง ภายใต้สภาพภูมิอากาศทางภาคใต้ของประเทศไทย โดยออกแบบเครื่องอบแห้งที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหลักและพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสริม ประกอบด้วยตู้อบชนิดโปร่งแสง ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาด 4.08 m^2 ขดลวดไฟฟ้าสำหรับทำความร้อนขนาด 800 W จำนวน 2 ชุด จากการทดลองอบแห้งปลา 2 ชนิด คือ ปลาช่อนและปลาดุก โดยให้อุณหภูมิในห้องอบแห้ง 40 50 และ 60°C พบว่าการอบแห้งปลาช่อนแบบใช้พลังงานร่วม

แสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดเท่ากับ 42.57 MJ/kgH_2O_{evap} และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 5.54% ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 6 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งปลาดุกด้วยพลังงานความร้อนร่วมแสงอาทิตย์-ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50°C มีการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุดคือเท่ากับ 80.02 MJ/kgH_2O_{evap} และมีประสิทธิภาพในการอบแห้ง 2.98% และใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง

จากรายงานข้างต้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ทางอ้อมแบบบังคับและนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ในระบบอบแห้งเพื่อช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งและยังคงอบต่อเนื่องและคงที่ได้แม้จะมีเมฆมาก ฝนตกหรือในตอนกลางคืน โดยจะใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบราบร่องรูปตัววีชนิด 60° ซึ่งจะเพิ่มพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ได้มากกว่าแบบอื่น ติดตั้งแผงรับรังสีในตำแหน่งที่มีโอกาสรับแสงอาทิตย์มากที่สุดโดยเอียงเป็นมุมเงย 14° เพื่อให้แผงตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์และให้มีการระบายน้ำ และใช้น้ำฝนในการชะล้างสิ่งสกปรกหรือฝุ่นที่อาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบต่ำลงไป และติดตั้งห้องอบแห้งไว้ในที่ร่มโดยห้องอบแห้งเป็นห้องทึบและหุ้มฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึง รายละเอียดของตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการอบแห้ง หาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีกายภาพ เนื้อสัมผัสและคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง ทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ และประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

3.1 ตัวอย่างวัสดุอบแห้ง

มะม่วงน้ำดอกไม้ในการทดลองมาจากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยของมะม่วงอยู่ที่ 81.56%(w.b) และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 20°Brix (รูปที่ 3.1)

รูปที่ 3.1 มะม่วงน้ำดอกไม้

3.2 การพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

วิธีการดำเนินการวิจัยสร้างเครื่องต้นแบบประกอบด้วย วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องต้นแบบและเกณฑ์การออกแบบ ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

3.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้สร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ

1) เหล็กกล่อง ใช้สำหรับสร้างโครงสร้างโดยรวม

2) เหล็กแผ่น ใช้สำหรับสร้างกรอบและแผ่นร่องรูปตัววีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

3) แผ่นอะคริลิคใส ใช้สำหรับปิดด้านตัวเก็บรังสีอาทิตย์

4) ฉนวนกันความร้อน

5) Nut, Bolt, และอุปกรณ์จับยึด

6) ฮีตเตอร์ครีบ และฮีตเตอร์อินฟราเรด ใช้เป็นแหล่งความร้อนของเครื่องอบแห้ง

7) เครื่องเป่าลมไฟฟ้าแบบปรับอัตราการไหลได้ (Blower)

8) อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เบรกเกอร์ ตัวลดแรงดันไฟฟ้า รีเลย์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องอบแห้งต้นแบบ

1) สว่านไฟฟ้า

2) ชุดประแจ

3) ชุดเครื่องมือวัด

4) เครื่องตัดเหล็ก

5) เครื่องมือช่างอื่น ๆ

3.2.3 เกณฑ์การออกแบบเครื่องอบแห้งต้นแบบ

1) เครื่องอบแห้งทำงานในลักษณะเป็นกะ (Batch Type)

2) เครื่องอบแห้งถูกสุขลักษณะของการผลิตอาหาร

3) ระบบการให้ความร้อนแก่อากาศใช้ทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ และฮีตเตอร์อินฟราเรด

3.2.4 การออกแบบและสร้างอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์มีส่วนประกอบหลักอยู่สามส่วนคือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ห้องอบแห้ง และระบบให้ความร้อนแก่อากาศ การออกแบบดำเนินการดังนี้

1) ปริมาณตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดลองการอบแห้ง

งานวิจัยนี้ใช้ห้องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้นจากงานวิจัยของ พชร ว่องไพศาลกิจ (2562) โดยห้องอบแห้งมีขนาดความกว้าง 60 cm ความสูง 60 cm และความลึก 60 cm มีฐานรองถาดทั้งหมด 4 ชั้น ขนาดความกว้าง 50 cm และความลึก 50 cm

พื้นที่ใช้สอยของถาด $50 \times 50 = 2500\ \text{cm}^2$

กำหนดให้ขนาดของมะม่วงเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด $7 \times 3 \times 0.5 = 10.5\ \text{cm}^3$

จากการทดลองหาน้ำหนักเฉลี่ยของมะม่วงตามขนาดที่กำหนดที่ระดับความชื้นเฉลี่ยของมะม่วงผลสด 81.56%(w.b) จะมีน้ำหนักเฉลี่ย 12.89 g

ดังนั้นแต่ละถาดบรรจุมะม่วงได้ $\frac{2500}{7\times3}=119.05$ ชิ้น

เนื่องจากขนาดรูปร่างของมะม่วงตามความเป็นจริงไม่สามารถวางชิดกันได้จึงจำเป็นต้องเผื่อระยะไว้ 25%

ซึ่งแต่ละถาดสามารถจัดเรียงได้ $119.05\times0.75=89$ ชิ้น

ดังนั้นสามารถจัดเรียงทั้ง 4 ถาดได้ $89\times4=356$ ชิ้น

$356\times12.89=4588.84$ g

2) ออกแบบระบบชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า

การออกแบบเลือกใช้มะม่วงเป็นหลักในการคำนวณออกแบบขนาดชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Infrared Heater และ Finned heater) โดยพิจารณาการอบแห้งมะม่วงภายใต้เงื่อนไขดังนี้

ความชื้นเริ่มต้น 81.56%(w.b) หรือ 442.30%(d.b)
ปริมาณเริ่มต้น 5 kg
ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ 17%(w.b) หรือ 20.48%(d.b)
อากาศขาเข้าเริ่มต้น 33°C
ดังนั้นต้องระเหยน้ำออกจากมะม่วง สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$m_w = m_d\left(M_i - M_f\right) \quad (3.1)$$

เมื่อ m_w คือ ปริมาณน้ำระเหย (kg_{water})
m_d คือ ปริมาณมวลแห้งปราศจากน้ำ ($kg_{dry\ solid}$)
M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (decimal, $kg_{water}/kg_{dry\ solid}$)
M_f คือ ความชื้นสุดท้าย (decimal, $kg_{water}/kg_{dry\ solid}$)

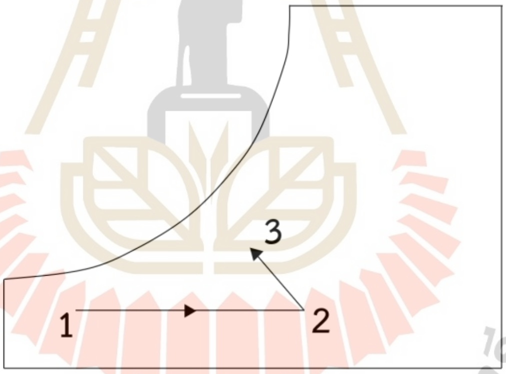
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการ จะได้

$$m_w = \frac{5kg}{1+4.42}(4.42-0.20) = 3.89 \text{ kg}$$

หากใช้เวลาในการระเหยน้ำอิสระ 16 ชั่วโมง จะได้อัตราการอบแห้งคือ 0.24 kg/h ซึ่งอัตราการระเหยน้ำนี้ใช้เพื่อหาอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งโดยวิธีทางไซโครเมตริก โดยมีกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

1. กระบวนการให้ความร้อน จากจุด 1 ไปจุด 2 เป็นการเพิ่มความร้อนให้กับอากาศที่อุณหภูมิ 33°C จนถึงอุณหภูมิอบแห้งที่ต้องการคือ 80°C
2. กระบวนการอบแห้ง จากจุด 2 ไปจุด 3 จะเป็นการใช้อากาศเป็นตัวกลางพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์กำหนดให้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C หลังอบแห้งลดลงเหลือ 70°C



รูปที่ 3.2 กระบวนการบนไซโครเมตริกซ์เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากแผนภาพไซโครเมตริกซ์ รูปที่ 3.2 ที่สภาวะอุณหภูมิ 33°C ความชื้นสัมพัทธ์ 68% จะหาค่าอัตราส่วนความชื้นได้ (H_1) 0.0218 $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

อัตราส่วนความชื้นออกจากห้องอบแห้ง 0.0258 $kg_{water}/kg_{dry\ air}$

หากต้องการอัตราการระเหยน้ำ 0.24 kg_{water}/h จะได้ว่า

$$\dot{m}_a = \frac{0.24\dfrac{kg_{water}}{h}}{(0.0258-0.0218)\dfrac{kg_{water}}{kg_{dryair}}}$$

$$\dot{m}_a = 60\frac{kg_{dryair}}{h}$$

$$\dot{m}_a = 0.017\frac{kg_{dryair}}{s}$$

ปริมาณความร้อนที่ต้องการให้กับอากาศ โดยกำหนดให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (C_a) คือ 1.0069 kJ/($kg_{dry\ air}$°C) และค่าความจุความร้อนของไอน้ำ (C_v) คือ 1.5524 kJ/(kg_{water}°C) คำนวณหาปริมาณความร้อนได้จากสมการที่ 3.2

$$Q_c = \dot{m}_a\left(C_a + C_v H_1\right)\left(T_2 - T_1\right) \tag{3.2}$$

$$Q_c = 0.017\frac{kg_{dryair}}{s}\left[1.0069\frac{kJ}{kg_{dryair}\ °C} + \left(1.5524\frac{kJ}{kg_{water}\ °C}\right)\left(0.0218\frac{kg_{water}}{kg_{dryair}}\right)\right]\left(80-33\right)°C$$

$$Q_c = 0.832 \text{ kW}$$

หากเครื่องอบแห้งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.60 ดังนั้นเครื่องอบแห้งต้องใช้พลังงานความร้อนที่

$$Q_c = \frac{0.832}{0.6} = 1.39 \text{ kW}$$

เนื่องจากมีชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (finned heater) อยู่แล้วซึ่งมีขนาด 1,500 W จำนวน 2 ตัว สามารถใช้ในงานนี้ได้ โดยใช้เทอร์โมสตัตในการควบคุมเพื่อให้ได้อากาศอบแห้งตามอุณหภูมิที่ต้องการ นอกจากนี้ติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ขนาด 220 W จำนวน 4 ตัว ภายในห้องอบแห้งเพื่อใช้สำหรับศึกษาการอบแห้งมะม่วงโดยใช้รังสีอินฟราเรด

3) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector)

การคำนวณหาพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยกำหนดให้ตัวเก็บรังสีมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.35 และความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 732 W/m^2 คำนวณหาพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Garg, Sharma, Mahajan, and Bhargave, 1985) ได้จากสมการ

$$A_c = \frac{Q_c}{\eta_c \times \mathrm{I}}$$

$$A_c = \frac{1.39kW}{0.35 \times 0.732\frac{kW}{m^2}} = 5.43 \text{ m}^2$$

ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงใช้พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 6 m^2 กำหนดให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความกว้าง 1 m และความยาว 2 m จำนวน 3 ชุด ทำให้ตัวเก็บรังสีมีขนาดเล็กลงเพื่อสะดวกต่อการใช้งาน

การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยปริมาณความร้อนที่ต้องการให้กับอากาศเท่ากับ 1.39 kW ซึ่งกำหนดประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีเท่ากับ 0.35 ดังนั้นสามารถหาอัตราการของอากาศได้จากสมการ

$$\frac{Q_c}{\eta_c} = \dot{m}C_p\left(T_2 - T_1\right)$$

$$\frac{1.39kW}{0.35} = \dot{m}\left(1.0069\frac{kJ}{kg_{dryair}\ {}^{\circ}C}\right)(80-33)^{\circ}C$$

$$\dot{m} = 0.084 \text{ kg/s}$$

การคำนวณหาความสูงของช่องว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หาได้จากอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ) คือ 1.138 kg/m^3 หาความสูงโดยวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error approach) เนื่องจากมี 1 สมการ แต่มี 2 ตัวแปร สมมติ ความสูง เท่ากับ 0.2 m

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{0.084\frac{kg}{s}}{\left(1.138\frac{kg}{m^3}\right)(1m \times 0.2m)} = 0.37 \text{ m/s}$$

ดังนั้น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีชนิด 60° ทำมุมเอียง 14° กับแนวระดับ ขนาด 2x1 m^2 ความสูงช่องว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 0.2 m โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำจากแผ่นเหล็กหนา 0.5 mm ทาสีดำเพื่อเพิ่มการดูดซับรังสีอาทิตย์ และแผ่นปิดหน้าเป็นอะคีลิค หนา 3 mm ภายในติดตั้งฉนวนกันความร้อนหนา 20 mm

3.3 การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีเมื่อจัดวางแบบขนานและอนุกรม

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นตัวอุ่นอากาศก่อนเข้าสู่ห้องอบแห้ง ผู้วิจัยได้ออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรีงสีอาทิตย์เมื่อจัดวางแบบขนานและอนุกรมเพื่อกำหนดรูปแบบที่เหมาะสำหรับกระบวนการอบแห้งในงานวิจัย ซึ่งมีเครื่องมือและวิธีการทดลองดังนี้

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

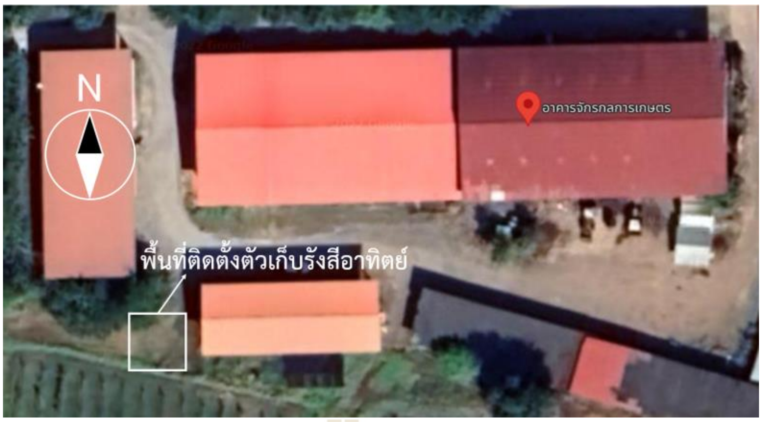
1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

2) เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ AHJ รุ่น AHJ-503 ใช้วัดความเร็วลม

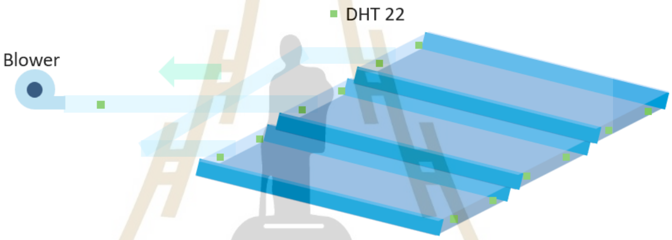
3) Solar Power meter ยี่ห้อ TENMARS รุ่น TM-206 ใช้วัดพลังงานแสงอาทิตย์

3.3.2 วิธีการทดสอบ

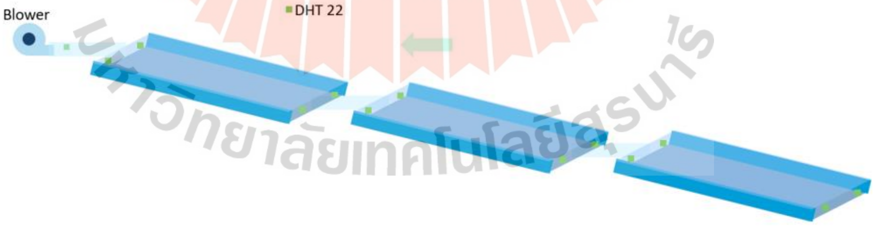
การทดลองจะติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไว้กลางแจ้ง สถานที่ทำการทดลอง ณ อาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ DHT22 ที่ทางเข้าตัวเก็บรังสี 2 จุด ทางออกตัวเก็บรังสี 2 จุด และท่อรวมลมร้อน 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้ ติดตั้งตัวเก็บรังสีแบบขนานและปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโบลเวอร์ไฟฟ้าในการควบคุมอัตราเร็วของอากาศ 7.5 V เปิดให้เครื่องทำงาน 30 นาที หลังจากนั้นทำการบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และความเร็วลม บันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโบลเวอร์ไฟฟ้าเป็น 15 และ 23 V ตามลำดับ และปรับการติดตั้งจากขนานเป็นอนุกรมและทำการทดลองเหมือนแบบขนานอีกครั้ง



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์



(ก) การต่อแบบขนาน



(ข) การต่อแบบอนุกรม

รูปที่ 3.4 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์

3.3.3 การประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector efficiency) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อน เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้อากาศมี

อุณหภูมิสูงขึ้นก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง พลังงานที่แผงรับรังสีอาทิตย์ (Ekechukwu and Norton, 1999) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$Q_u = \dot{m} C_a \left(T_{CO} - T_{CI} \right) \tag{3.3}$$

เมื่อ Q_u คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (kW)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg°C)

T_{CO} คือ อุณหภูมิของอากาศขาออกจากตัวเก็บรังสี (°C)

T_{CI} คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าจากตัวเก็บรังสี (°C)

ดังนั้นประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Garg, Sharma, Mahajan, and Bhargave, 1985) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \times \mathrm{I}} \times 100\% \tag{3.4}$$

เมื่อ η_c คือ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (%)

A_c คือ พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

3.4 การทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

3.4.1 วัสดุและอุปกรณ์

1) มะม่วงน้ำดอกไม้ในการทดลองมาจากตลาดท้องถิ่นในจังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย ความชื้นเริ่มต้นโดยเฉลี่ยของมะม่วงอยู่ที่ 81.56%(w.b) และมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 20°Brix

2) เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีชนิด 60° ทำมุมเอียง 14° กับแนวระดับ ขนาด 2x1 m^2 จำนวน 3 ชุด จัดวางแบบอนุกรม มีท่อลมเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องผลิตลมร้อนที่ติดตั้งฮีตเตอร์พร้อมครีบขนาด 1500 W จำนวน

2 ตัว ทางเข้าห้องอบแห้งติดตั้งโบลเวอร์เพื่อระบายความชื้นออกจากห้องอบแห้งและควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ภายในห้องอบแห้งมีถาด 4 ชั้น แต่ละชั้นติดตั้งฮีตเตอร์อินฟราเรดดังแสดงในรูปที่ 3.6 และติดตั้งเซ็นเซอร์ DHT22 ที่ทางเข้าตัวเก็บรังสี 1 จุด ทางออกตัวเก็บรังสี 1 จุด ในห้องอบแห้งบนชั้นถาดละ 1 จุด ทางออกของห้องอบแห้ง 1 จุด และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม 1 จุด และทางออกห้องฮีตเตอร์ 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยอากาศจะไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อรังสีอาทิตย์กระทบกับแผงรับแสงจะทำให้อากาศอุ่นขึ้น อากาศถูกดูดมายังห้องผลิตลมร้อน ซึ่งฮีตเตอร์จะทำงานถ้าหากอากาศมีอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่กำหนด ในส่วนการทำงานของฮีตเตอร์อินฟราเรดจะทำงานแบบเปิด-ปิดตามที่กำหนด และโบลเวอร์จะดูดอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง

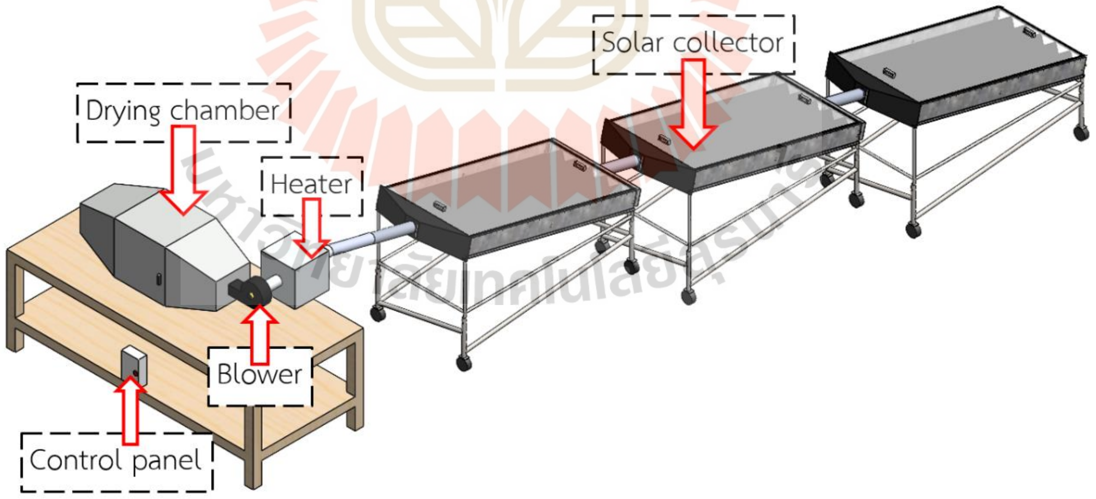
3) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) Memmert รุ่น UF160 ใช้สำหรับการอบหาความชื้นมะม่วงที่ใช้ในการทดลอง (รูปที่ 3.8)

4) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BSA3202S-CW พิกัด 3,200 g ความละเอียด 0.01 g ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุอบแห้ง (รูปที่ 3.9)

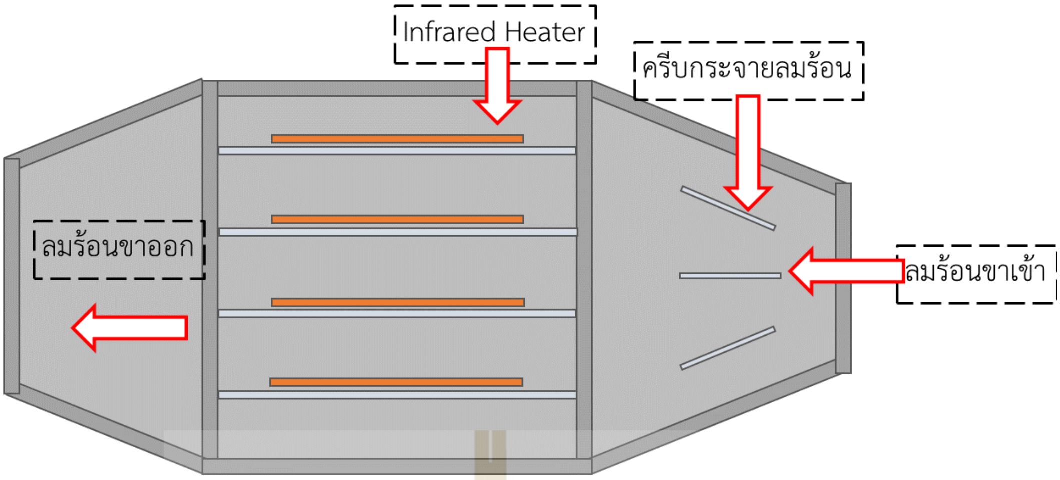
5) เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ โดยใช้เครื่อง Aqualab รุ่น PRE (รูปที่ 3.10)

6) เครื่องวัดค่าสี โดยใช้เครื่อง HunterLab รุ่น UltraScan

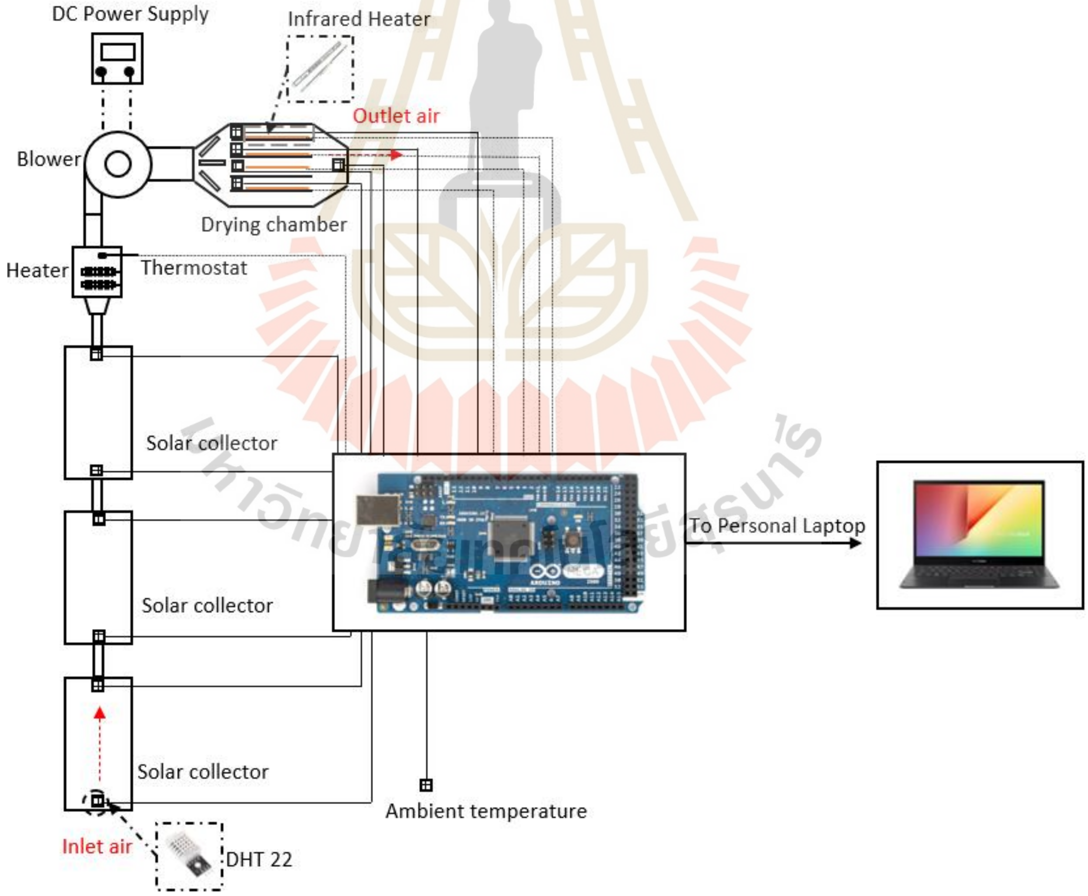
7) เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XTPlus, texture technologies corp. and stable micro systems, ltd., MA, USA) (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งติดตั้งรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

รูปที่ 3.8 ตู้อบลมร้อน

รูปที่ 3.9 เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.10 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ

รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

3.4.2 วิธีการทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 ส่วนคือ

1) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว (SC)

2) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วงอย่างเดียว (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) (IR-OC)

3) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (60 70 และ 80°C) (SC+H)

4) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (60 70 และ 80°C) (SC+H+IR-A)

5) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (60 70 และ 80°C) (SC+H+IR-OC)

ทำการทดลอง 3 ซ้ำ การทดสอบเริ่มจากนำมะม่วงน้ำดอกไม้ผลสดไปหาความชื้นเริ่มต้นตามวิธีของ AOAC (2000) ค่าความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2) โดยหั่นมะม่วงเป็นชิ้นซึ่งกำหนดให้ขนาดของมะม่วงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 7x3x0.5 cm^3 นำไปปรับสภาพก่อนการอบแห้งด้วยวิธีการลวกด้วยน้ำร้อน 1 นาที (จันทนา สีลาน้ำเที่ยง, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และกระวี ตรีอำนรรค, 2564) บรรจุมะม่วงลงในถาด ๆ ละ 1 kg ทั้งหมด 4 ถาด นำเข้า

ห้องอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ทำการตั้งค่าอุณหภูมิและฮีตเตอร์อินฟราเรด ตามสภาวะการอบแห้งที่กำหนด ระหว่างการทดสอบทำการบันทึก พลังงานแสงดวงอาทิตย์ ความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทุก ๆ 1 h และน้ำหนักมะม่วงที่ออกจากเครื่องอบแห้งและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งทุก ๆ 2 h โดยการทดลองด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียวระยะเวลาในการอบแห้งช่วง 7.00 น. ถึง 18.00 น. ทุกวัน จนมะม่วงมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18% และมีค่า Water Activity ไม่เกิน 0.65 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง (มอก. 919-2563)

รูปที่ 3.12 การจัดวางมะม่วงสำหรับอบแห้ง

3.4.3 การประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องอบแห้ง

ทำการประเมินสมรรถนะในการอบแห้ง ด้วยการพิจารณาค่าต่าง ๆ ประกอบด้วยค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

1) อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คิดจากปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$DR = \frac{m_{water}}{t} \tag{3.5}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h)

m_{water} คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Specific Electrical Energy Consumption, SEEC) เป็นอัตราส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการอบแห้ง ประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์และระบบควบคุม สามารถวัดได้ด้วยมาตรวัดไฟฟ้า (Kilowatt-hour Meter) ต่อปริมาณน้ำ 1 กิโลกรัม ที่ระเหยออกจากมะม่วงน้ำดอกไม้ (ณัฐพล แซ่ลิ้ม, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และกระวี ตรีอำนรรค, 2560) โดยไม่คิดค่าพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานที่ได้ฟรีซึ่งค่า SEEC สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$SEEC = \frac{3.6 \times E}{w_i - w_f} \tag{3.6}$$

เมื่อ SEEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (MJ/kg)

E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kW-h)

w_i คือ น้ำหนักมะม่วงเริ่มต้น (kg)

w_f คือ น้ำหนักมะม่วงหลังอบแห้ง (kg)

3.4.4 การประเมินคุณภาพมะม่วงอบแห้ง

ผลิตภัณฑ์มะม่วงอบแห้งที่ได้จากการทดลองถูกนำมาค่าความปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) วัดค่าสี และวัดเนื้อสัมผัสโดยค่า a_w วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Aqualab รุ่น PRE การวิเคราะห์ค่าสีใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าสี HunterLab รุ่น UltraScan ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ทำการวัดค่าสีตาม ระบบสี CIE L*a*b* สามจุดบนพื้นผิวของชิ้นมะม่วง โดยที่ L* หมายถึงค่าความสว่าง (Lightness), a* หมายถึงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว และ b* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน ทำการหาความแตกต่างของสีชิ้นมะม่วงอบแห้งจากการทดลองเทียบกับชิ้นมะม่วงผลสด (Total color difference, ΔE) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$\Delta E = \sqrt{\left(L_0^* - L^*\right)^2 + \left(a_0^* - a^*\right)^2 + \left(b_0^* - b^*\right)^2} \tag{3.7}$$

เมื่อ ΔE คือ ความต่างของสีระหว่างตัวอย่างที่ทำการเปรียบเทียบ

L^*_0, a^*_0, และ b^*_0 คือ ค่าสีของมะม่วงผลสด

L^*, a^*, และ b^* คือ ค่าสีมะม่วงอบแห้ง

การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงอบแห้งแบบ Texture Profile Analysis (TPA) ได้แก่ Hardness, Cohesiveness, Springiness, และ Chewiness ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสใช้หัวกดแบบแบนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm โดยกดตัวอย่างลง 70% ของความสูงด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัวกดระหว่าง และหลังทดสอบ คือ 1 mm/s (Barragán-Iglesias, Rodríguez-Ramírez, Sablani, and Méndez-Lagunas, 2018)

รูปที่ 3.13 เครื่องวัดค่าสี HunterLab รุ่น UltraScan

3.5 การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอกลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของมะม่วงน้ำดอกไม้เป็นขั้นตอนการหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้ผลสดและอบแห้งทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.5.1 การเตรียมสารสกัดจากมะม่วงน้ำดอกไม้

การเตรียมสารสกัดจากมะม่วงน้ำดอกไม้โดยการดัดแปลงวิธีของ IZLI, IZLI, and TASKIN (2017) มีขั้นตอนดังนี้

1) ปอกเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้ ล้างน้ำสะอาด จากนั้นหั่นเนื้อมะม่วงให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ให้ละเอียด

2) ชั่งน้ำหนักเนื้อมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ได้ 1 g เติมตัวทำละลายเมทานอล 80% ปริมาตร 4.5 mL ใส่ polypropylene tubes

3) สกัดด้วยเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Memert รุ่น WNB14 ความถี่ที่ใช้เขย่า 140 rpm ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 25°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (รูปที่ 3.14)

4) นำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Centrifuge) ยี่ห้อ Thermo SCIENTIFIC รุ่น SORVALLLEGEND XRT Centrifuge ความเร็วในการปั่นที่ 10,000 g เป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25°C (รูปที่ 3.15)

5) จากนั้นนำไปกรองให้ได้สารสกัดส่วนใสโดยใช้กระดาษกรอง (Membrane filter) ขนาด 0.45 μm (รูปที่ 3.16)

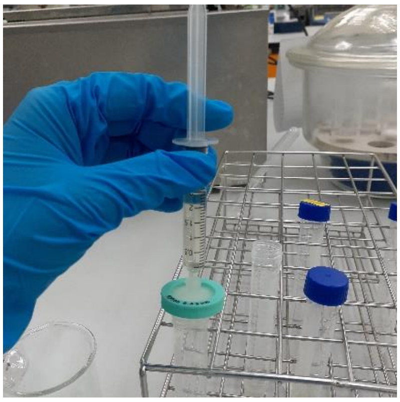
6) เก็บไว้ใน polypropylene tubes ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ที่อุณหภูมิ -21°C เพื่อนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป (รูปที่ 3.17)

7) ทำการทดลองเช่นเดิมเปลี่ยนเป็นมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ผ่านการลวก 1 นาที และอบแห้งดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3

รูปที่ 3.14 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ Memert รุ่น WNB14

รูปที่ 3.15 เครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Centrifuge) ยี่ห้อ Thermo SCIENTIFIC รุ่น SORVALLLEGEND XRT Centrifuge

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.16 กรองสารสกัดส่วนใส

รูปที่ 3.17 เก็บตัวอย่างไว้ใน polypropylene tubes ห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์

3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้วิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

การวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH เป็นวิธีการทดสอบฤทธิ์ต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยดูถึงความสามารถในการจับ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่เสถียรและสามารถรับอิเล็กตรอนได้ ถ้าสารสกัดสามารถจับกับ DPPH radical ได้สีของสารละลาย DPPH จะเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลือง โดยดัดแปลงวิธีของ Izli, Izli, and Taskin (2017) มีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 250 mL โดยชั่งน้ำหนัก DPPH 0.0099 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยเมทานอล 95% นำสารละลายเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 250 mL เก็บไว้ในขวดสีชา

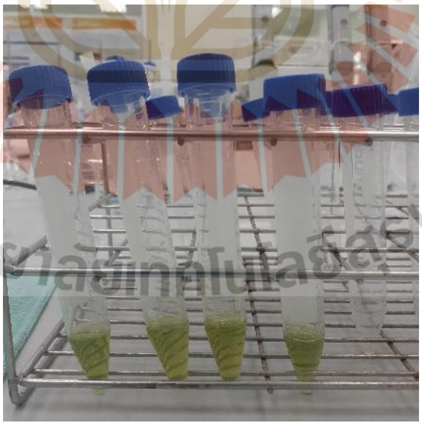
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2) เตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox ความเข้มข้น 500 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยชั่งน้ำหนัก Trolox 0.0500 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยเมทานอล 95% นำสารละลายเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 100 mL

3) เจือจางสารละลายมาตรฐาน Trolox ให้ได้ความเข้มข้น 0 50 150 250 350 และ 450 mg/L โดยที่ความเข้มข้นที่ 0 mg/L จะนำ DPPH 3.9 mL ผสมกับเมทานอล 0.1 mL

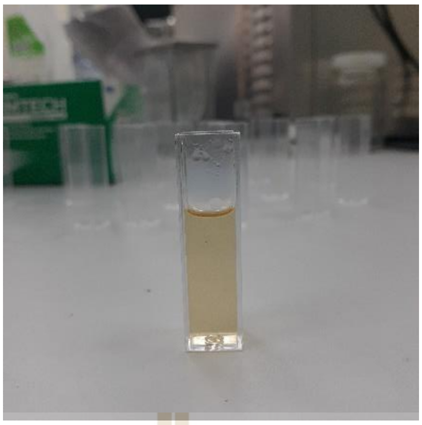
4) นำสารละลายมาตรฐาน Trolox ที่ความเข้มข้น 50 mg/L 0.1 mL ใส่ใน polypropylene tube เติมสารละลาย DPPH 3.9 mL เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องปั่นผสมเวลาประมาณ 15-30 วินาที หลังจากนั้นตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง (รูปที่ 3.18) นำสารละลายมาตรฐานไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrometer) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U2900 (รูปที่ 3.20) ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และนำมาทำกราฟมาตรฐานของ Trolox

5) นำสารสกัดมะม่วงที่ได้จากขั้นตอน 3.5.1 0.1 mL ใส่ใน polypropylene tube เติมสารละลาย DPPH 3.9 mL เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องปั่นผสมเวลาประมาณ 15-30 วินาที หลังจากนั้นตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และนำมาคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐาน Trolox



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างหลังผ่านการบ่ม 30 นาที

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.19 การเตรียมตัวอย่างก่อนการวัดการดูดกลืนแสง

รูปที่ 3.20 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrometer) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U2900

3.5.3 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้วิธี Folin Ciocalteu

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มหนึ่งที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและต้านทานการออกซิเดชัน การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยใช้วิธี Folin Ciocalteu ซึ่งเป็นสารละลายที่มีสีเหลือง เมื่อเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงไป สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงหรือน้ำเงิน โดยดัดแปลงวิธีของ Izli, Izli, and Taskin (2017) มีขั้นตอนดังนี้

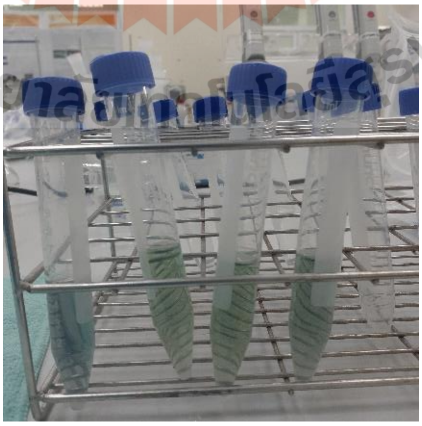
1) เตรียมสารละลายมาตรฐาน Gallic acid ความเข้มข้น 500 mg/L ปริมาตร 100 mL โดยชั่งน้ำหนัก Gallic acid 0.050 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยเมทานอล 95% นำสารละลายเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 100 mL

2) เจือจางสารละลายมาตรฐาน Gallic acid ให้ได้ความเข้มข้น 10 20 40 60 80 100 120 140 และ 160 mg/L

3) เตรียมสารละลาย Na_2CO_3 ความเข้มข้น 7.5% ปริมาตร 250 mL โดยชั่งน้ำหนัก Na_2CO_3 18.75 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายเทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 250 mL

4) นำสารละลายมาตรฐาน Gallic acid ที่ความเข้มข้น 10 mg/L 0.25 mL ใส่ใน polypropylene tube เติมสารละลาย Folin Ciocalteu 1.25 mL เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องปั่นผสมเวลาประมาณ 15 วินาที หลังจากนั้นตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 8 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เติมสารละลาย Na_2CO_3 3.75 mL แล้วตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 90 นาที (รูปที่ 3.21) นำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ ความเร็วในการปั่นที่ 10,000 g เป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25°C นำสารละลายมาตรฐานไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และนำมาทำกราฟมาตรฐานของ Gallic acid

5) นำสารสกัดมะม่วงได้จากขั้นตอน 3.5.1 0.25 mL ใส่ใน polypropylene tube เติมสารละลาย Folin Ciocalteu 1.25 mL เขย่าให้เข้ากันโดยใช้เครื่องปั่นผสมเวลาประมาณ 15 วินาที หลังจากนั้นตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 8 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เติมสารละลาย Na_2CO_3 3.75 mL แล้วตั้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 90 นาที นำไปแยกตะกอนด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ ความเร็วในการปั่นที่ 10,000 g เป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิคงที่ที่ 25°C นำสารละลายมาตรฐานไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และนำมาคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐาน Gallic acid



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างหลังผ่านการบ่ม 90 นาที

3.6 การหาความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้

การหาความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในการสร้างสมการการอบแห้งสำหรับทำนายพฤติกรรมการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ จะใช้วิธีสถิตโดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 วัสดุและอุปกรณ์

1) มะม่วงน้ำดอกไม้

2) กล่องแก้ว super lock

3) น้ำกลั่น

4) Crystalline thymol

5) Breaker

6) จานรองแก้ว ใช้สำหรับวางมะม่วงและ Crystalline thymol

7) แก้วทรงเตี้ย ใช้สำหรับเป็นฐานวางจานรองแก้ว

8) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) Memmert รุ่น UF160

9) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ME204 พิกัด 220 g ความละเอียด 0.0001 g ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักตัวอย่าง (รูปที่ 3.22)

ตารางที่ 3.1 ความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของสารละลายอิ่มตัว (Greenspan, 1977)

Salt	Equilibrium relative humidity (%)			
	25°C	45°C	65°C	85°C
LiCl	11.30	11.16	10.86	10.38
$MgCl_2$	32.78	31.10	28.54	25.11
KI	68.86	65.26	62.50	60.56
$NaNO_3$	74.25	69.99	66.64	65.03
KCl	80.99	79.56	79.85	78.68

รูปที่ 3.22 เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง

3.6.2 วิธีการทดสอบ

1) หาความชื้นเริ่มต้นของมะม่วง หาโดยการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 h

2) เตรียมสารละลาย เทน้ำกลั่นใส่ลงในบิ๊กเกอร์จำนวน 50 ml

3) ค่อย ๆ เติมสารเคมี LiCl ลงไป แล้วคนให้สารเคมีละลาย จนกระทั่งเป็นสารละลายอิ่มตัว

4) หากสารละลายอิ่มตัวน้อยกว่า 150 ml เติมน้ำกลั่นแล้วเพิ่มสารเคมีลงไปให้ได้ปริมาณสารละลายอิ่มตัวมากกว่า 150 ml

5) นำสารละลายที่เตรียมได้ใส่ลงในกล่องแก้ว

6) เตรียมสารละลายอีก 4 ชนิดด้วยวิธีเดียวกัน

7) ทำการหั่นชิ้นมะม่วงขนาด ความกว้างxความยาวxความหนา 1x1x1 cm^3

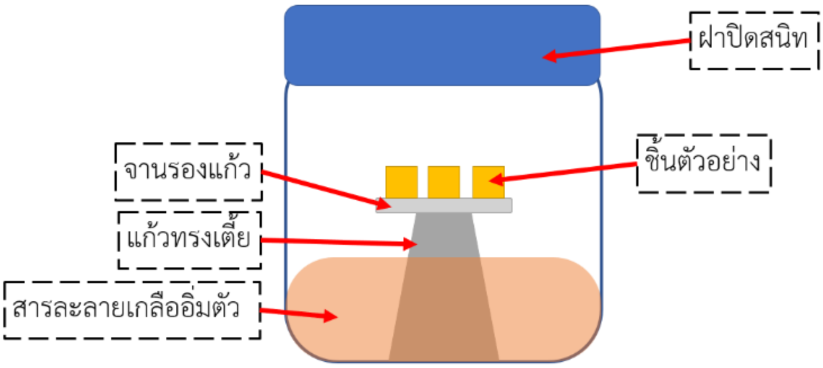
8) ชั่งน้ำหนักมะม่วงแล้วนำมาวางไว้บนจานรองแก้วในกล่องแก้วสารละลายอิ่มตัวดังแสดงในรูปที่ 3.23

9) นำกล่องแก้วเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 45°C

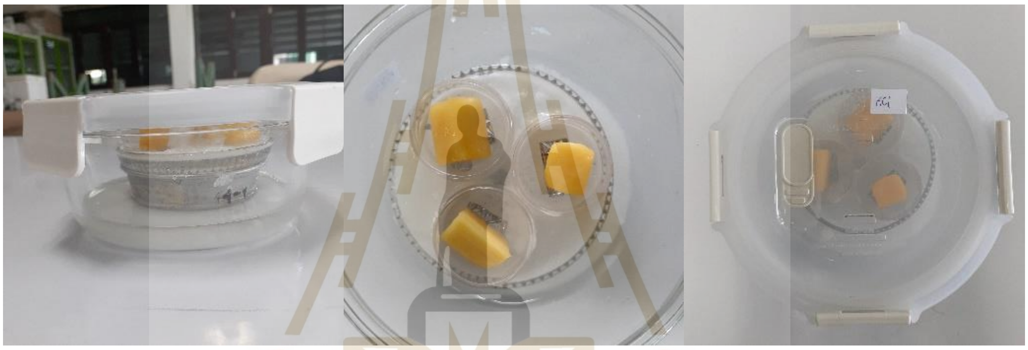
10) นำชิ้นตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 24 h จนกระทั่งน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง ±0.0001 g จึงหยุดการทดลอง

11) จึงนำชิ้นตัวอย่างไปหาค่าความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 h

12) ทำการทดลองตามขั้นตอน 1-11 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิ



(ก) ภาพจำลอง



(ข) การทดลองจริง

รูปที่ 3.23 การวางตัวอย่างหาความชื้นสมดุล

การหาสมการความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Aviara, Ajibola, and Oni, 2004) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 เป็นการหารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง โดยวิธีทางสถิติใช้ nonlinear regression ของโปรแกรม SPSS 26.0 โดยพิจารณาความเหมาะสมของสมการจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (SEE) ของแบบจำลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุล

Model	Mathematical expression	
Modified Chung-Pfost	$M_{eq} = \frac{-1}{C}\ln\left[-\frac{(T+B)}{A}\ln(rh)\right]$	(3.8)
Modified Halsey	$M_{eq} = \left[\frac{-\ln(rh)}{\exp(A+BT)}\right]^{-1/C}$	(3.9)
Modified Oswin	$M_{eq} = (A+BT)\left[\frac{rh}{1-rh}\right]^{1/C}$	(3.10)
Modified GAB	$M_{eq} = \frac{AB\left(\frac{C}{T}\right)rh}{(1-B(rh))\left(1-B(rh)+\left(\frac{C}{T}\right)B(rh)\right)}$	(3.11)

เมื่อ M_{eq} คือ ความชื้น (% d.b)

Rh คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เศษส่วน)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

A, B, C คือ ค่าคงที่ของสมการ

3.7 สมการการอบแห้งแบบชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

3.7.1 วิธีการศึกษาสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

นำค่าความชื้นที่ได้จากหัวข้อที่ 3.4.2 และ 3.6 มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งค่าอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.12) (Erbay and Icier, 2010)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \qquad (3.12)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ (% d.b)

M_e คือ ความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้ (% d.b)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ (% d.b)

จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งจากการทดลองมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลของ Newton และ Page ซึ่งมีรูปแบบสมการพื้นฐานดังนี้ (Erbay and Icier, 2010)

$$MR = \exp(-kt) \qquad (3.13)$$

$$MR = \exp(-kt^n) \qquad (3.14)$$

โดยที่ k, n คือ ค่าคงที่

โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะนำมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) พิจารณาความเหมาะสมของสมการจากค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (RMSE) เป็นดัชนีชี้วัดเพื่อเลือกแบบจำลองที่เหมาะสม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของผลการศึกษาประกอบด้วย ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีกายภาพ และคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง ผลการประเมินสมรรถนะของเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ และผลศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลมะม่วงน้ำดอกไม้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

รายละเอียดของการออกแบบ ชิ้นส่วนต่าง ๆ และรูปร่าง ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไว้ในภาคผนวก ค

4.1.1 ผลของการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์

หลังจากได้ดำเนินการออกแบบและกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงรายละเอียดในข้อ 3.2 แล้วจึงได้ดำเนินการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประกอบไปด้วยแผ่นดูดซับรังสีแบบแผ่นราบร่องรูปตัววีชนิด 60° ทำมุมเอียง 14° กับแนวระดับขนาด 2x1 m^2 ทาสีดำเพื่อเพิ่มการดูดซับรังสีอาทิตย์ แผ่นปิดด้านหน้า และภายในติดตั้งฉนวนกันความร้อน จำนวน 3 ชุด จากนั้นประกอบเครื่องอบแห้งต้นแบบประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ท่อ ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบขนาด 1500 W จำนวน 2 ตัว โบลเวอร์ ห้องอบแห้งขนาด 60x60x60 cm^3 รังสีอินฟราเรดขนาด 220 W จำนวน 4 ตัว และตู้คอนโทรล แล้วทดสอบเบื้องต้น ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่สามารถอบแห้งมะม่วงได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้แสดงดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

4.1.2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

หลักการทำงานเครื่องอบแห้ง โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิ 60-80℃ และรังสีอินฟราเรดทำงานแบบต่อเนื่อง และแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) ตามสภาวะการอบแห้งที่กำหนด เมื่ออากาศไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แล้วรังสีอาทิตย์กระทบกับแผงรับรังสีเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศทำให้อากาศอุ่นขึ้น จากนั้นอากาศถูกดูดมายังห้องผลิตลมร้อนโดยมีฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบซึ่งจะทำงานถ้าหากอากาศมีอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่กำหนด และโบลเวอร์จะดูดอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง

4.2 ผลการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีเมื่อจัดวางแบบขนานและอนุกรม

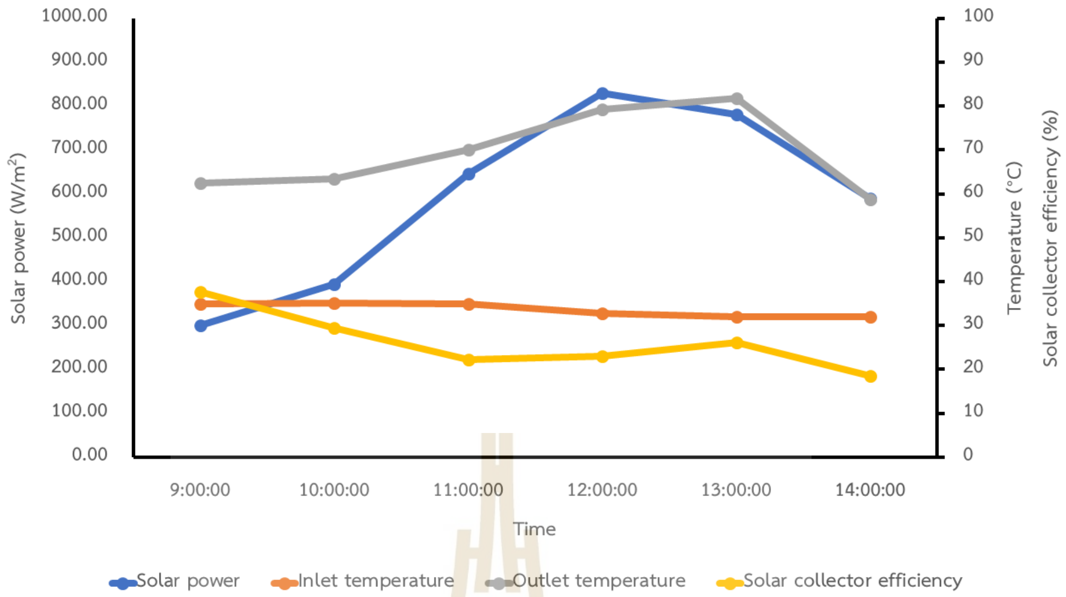
จากตารางที่ 4.1 และในรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้รับพลังงานจากรังสีอาทิตย์ส่งผลให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นตาม และอุณหภูมิขาออกจากตัวเก็บจะลดลงตามความเข้มรังสีอาทิตย์ เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ค่าผลต่างของอุณหภูมิอากาศขาออกและขาเข้ามีแนวโน้มลดลง แต่ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นดังแสดงรูปที่ 4.3 เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศสูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนลดลงและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการต่อแบบขนานและอนุกรมที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากันพบว่า การต่อแบบอนุกรมมีประสิทธิภาพมากกว่า เนื่องจากอากาศมีระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าแบบขนานซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้ไม่เป็นไปตามที่ Tarminzi et al. (2021) ได้รายงานว่าการจัดเรียงแบบขนานให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า ถึงแม้ว่าอุณหภูมิทางออกตัวเก็บ

รังสีของการจัดเรียงแบบอนุกรมจะสูงกว่าแบบขนาน ในการทดลองของ Tarminzi ความยาวของท่อทางออกตัวเก็บรังสีแบบอนุกรมไปยังห้องอบแห้งมีระยะที่ยาวกว่าแบบขนานทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากกว่า ซึ่งงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการต่อท่อให้เป็นลักษณะทางตรงมากที่สุดทั้งของการต่อแบบขนานและอนุกรม และได้ทำการวัดอุณหภูมิบริเวณก่อนถึงทางเข้าโบลเวอร์ที่จุดเดียวกันของการจัดเรียงทั้งแบบขนานและอนุกรมให้สมมติว่าเป็นทางเข้าห้องอบแห้ง พบว่าอุณหภูมิลดลงจากจุดทางออกตัวเก็บรังสี และการต่อแบบอนุกรมมีอุณภูมิที่สูงกว่าในการต่อแบบขนานมีการใช้ข้อต่องอที่จุดรวมจึงทำให้เกิดการสูญเสียมากกว่าแบบอนุกรม ผู้วิจัยจึงเลือกการจัดวางตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบอนุกรมเนื่องจากมีประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่ทางออกสูงกว่าแบบขนาน โดยนำไปใช้ในการทดลองอบแห้งตามหัวข้อที่ 3.4

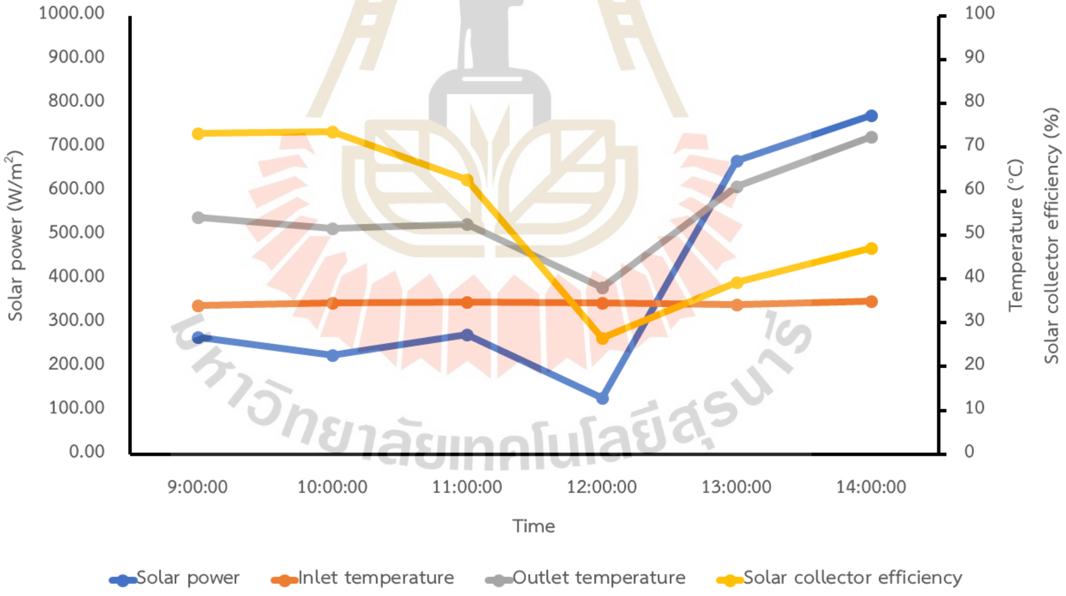
ตารางที่ 4.1 ผลการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

วงจร	**อัตราการไหล** (kg/s)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	I (W/m^2)	η_C (%)	T_{mix} (°C)
ขนาน	0.02	33.74	64.96	556.39	27.56	62.44
	0.06	34.45	63.77	543.18	52.27	58.28
	0.09	33.73	67.06	740.89	67.64	61.25
อนุกรม	0.02	33.46	78.32	722.82	29.89	73.86
	0.06	34.37	71.37	641.86	56.17	67.31
	0.09	33.95	73.23	768.67	72.92	65.95

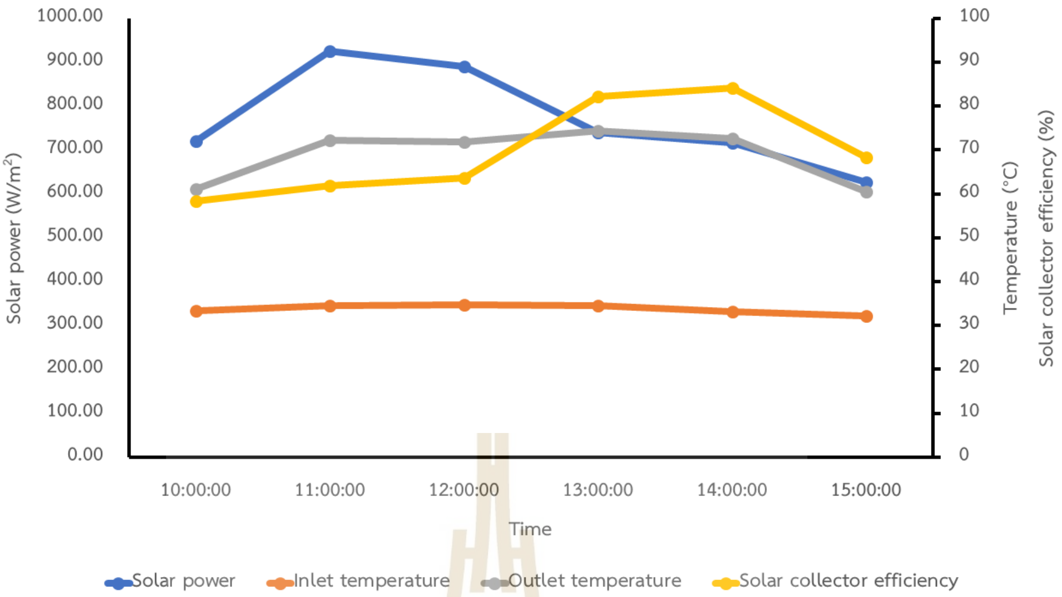
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



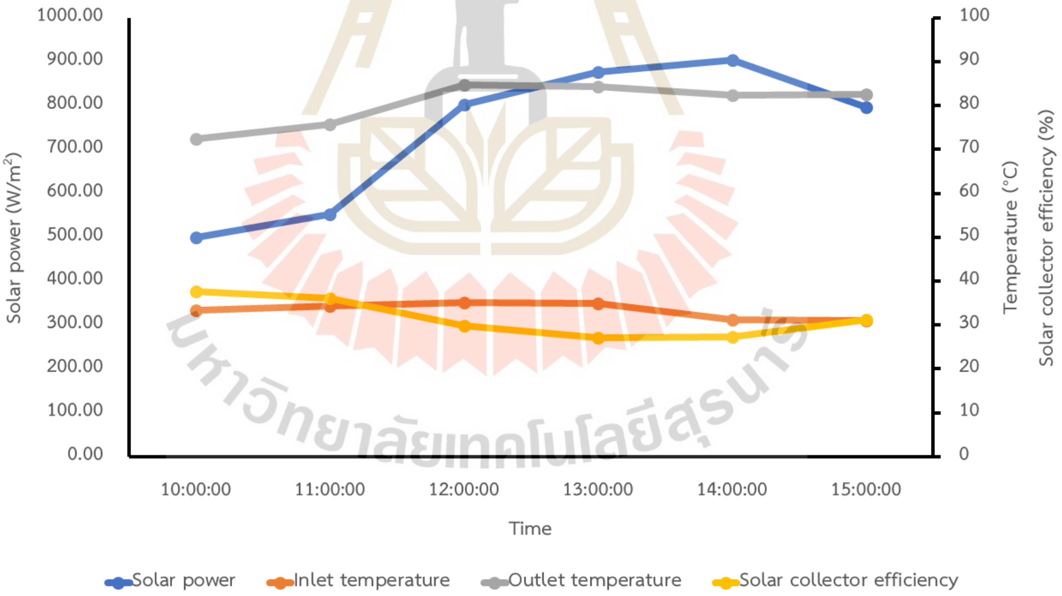
(ก) วงจรขนาน อัตราการไหล 0.02 kg/s



(ข) วงจรขนาน อัตราการไหล 0.06 kg/s

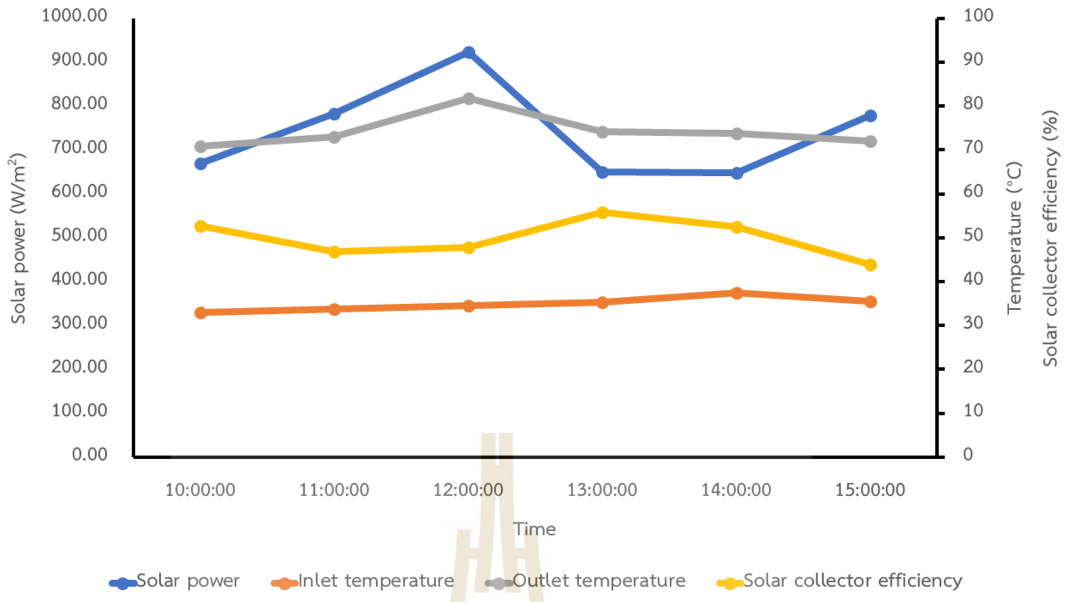


(ค) วงจรขนาน อัตราการไหล 0.09 kg/s

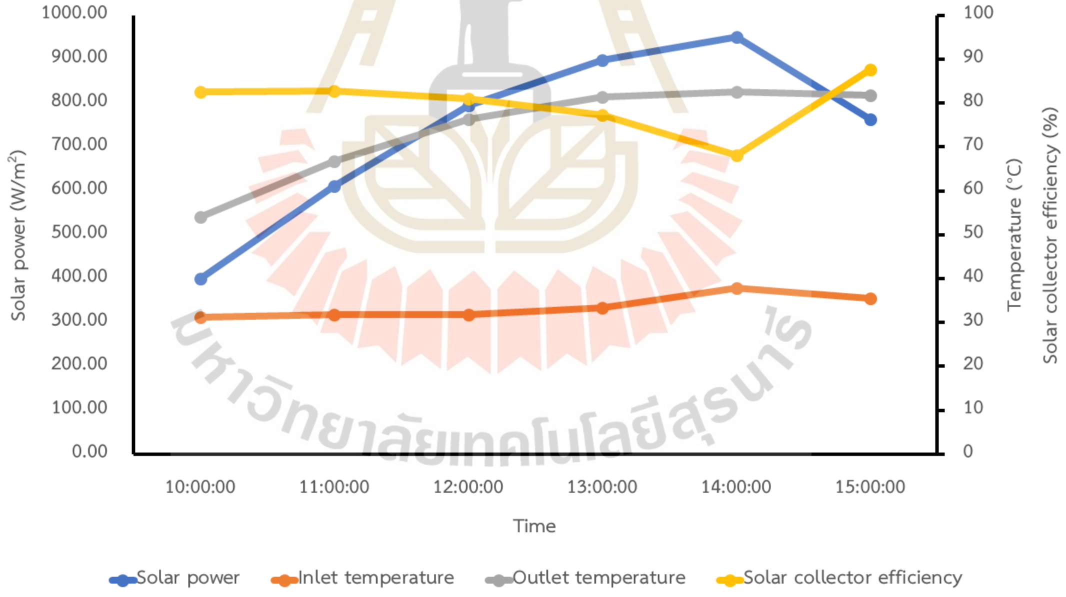


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(ง) วงจรอนุกรม อัตราการไหล 0.02 kg/s



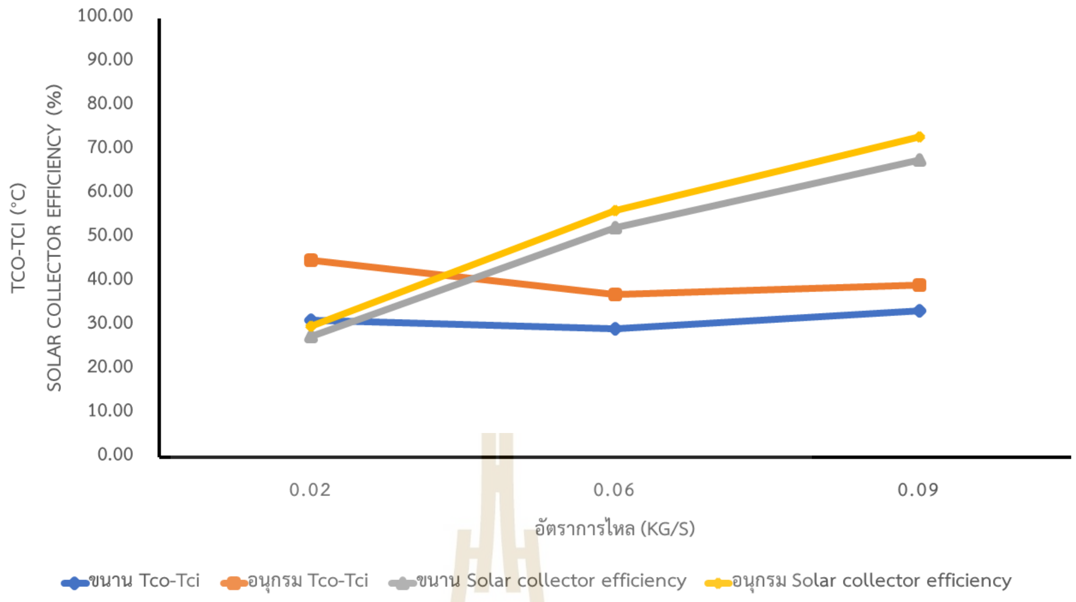
(จ) วงจรอนุกรม อัตราการไหล 0.06 kg/s



(ฉ) วงจรอนุกรม อัตราการไหล 0.09 kg/s

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar power) อุณหภูมิอากาศขาเข้าและออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์กับช่วงเวลาในการทดสอบ



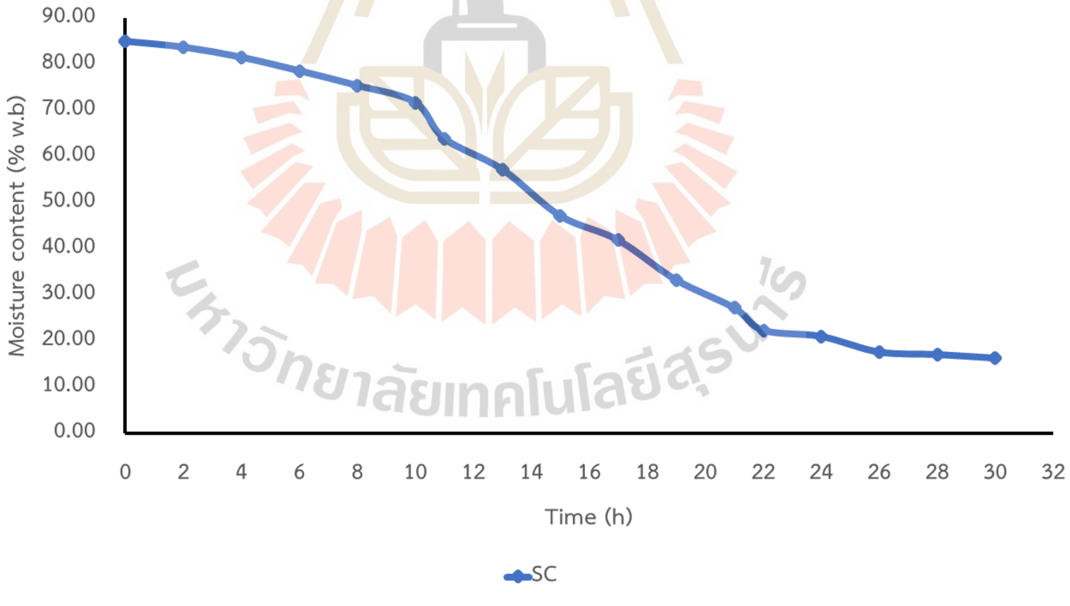
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และอัตราการไหล

4.3 ผลการทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้

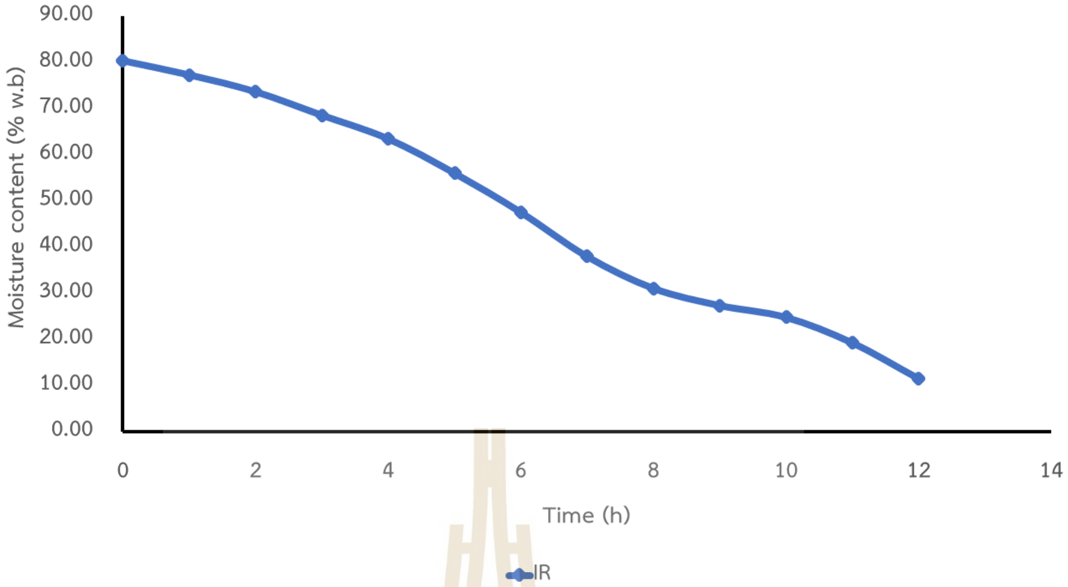
จากการทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น ด้วยพลังงานความร้อนร่วม 3 รูปแบบ คือ แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบและรังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง แสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบและรังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) โดยกำหนดอุณหภูมิอบแห้งไว้ 3 ระดับ คือ 60 70 และ 80°C และพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว และรังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) อย่างเดียว โดยพฤติกรรมการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ส่วนใหญ่ช่วงแรกความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมะม่วงสัมผัสกับอากาศอบแห้งเกิดการถ่ายเทความร้อนทำให้ความชื้นในมะม่วงเคลื่อนตัวออกมาสู่ผิวด้านนอก เกิดการระเหยน้ำออกจากผิวมะม่วงด้วยอัตราคงที่ จากนั้นความชื้นค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งความชื้นมะม่วงต่ำกว่า 18%(w.b) นำมะม่วงที่ได้จากการทดลองคำนวณหาปริมาณความชื้น สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและเวลาในการอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบแห้งพบว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียวใช้เวลามากที่สุดเฉลี่ย 2 วันครึ่ง เมื่อรวมเวลาหลัง 18.00 น. อย่างไรก็ตามในช่วงพักการอบแห้งหลัง 18.00 น. มะม่วงยังคงสัมผัสกับอากาศภายในห้องที่เปิดเครื่องปรับอากาศทำให้น้ำระเหยออกไป โดยสังเกตุได้ที่ช่วง 11 และ 21 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.4 (ก) เมื่อเพิ่มการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบในระบบพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลง โดยที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ใช้เวลา

26 22 และ 18 ชั่วโมงตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น ส่งผลให้การระเหยของน้ำในมะม่วงออกสู่อากาศได้เร็วขึ้น โดยพฤติกรรมการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 4.4 (ค)

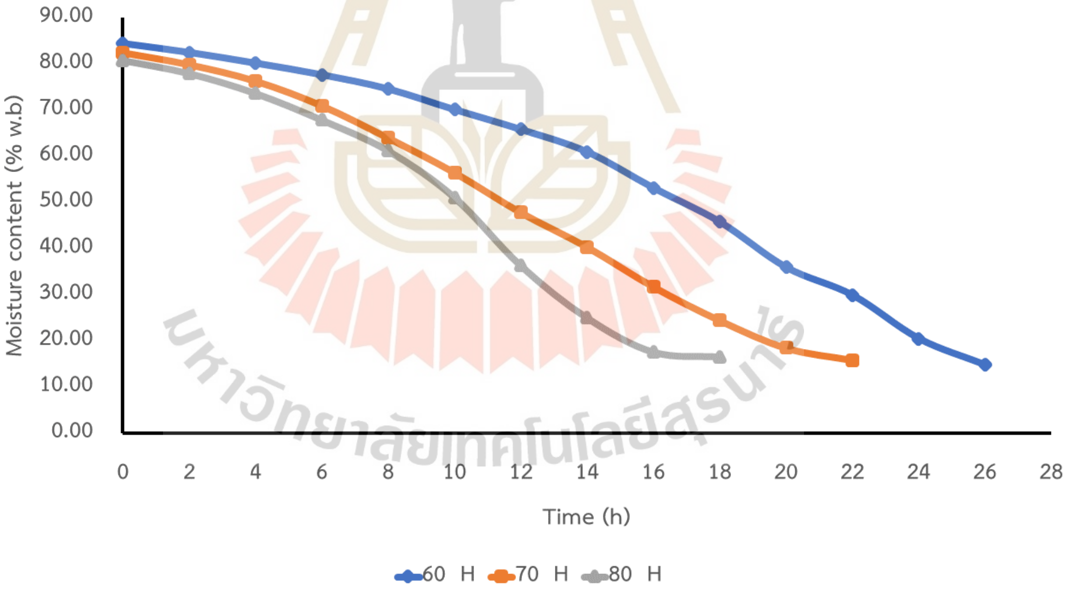
เมื่อเพิ่มรังสีอินฟราเรดในการอบแห้งเวลาที่ใช้ลดลง เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังมะม่วงได้ด้วยการพาความร้อนไปยังผิววัสดุและการแผ่รังสีไปยังภายในวัสดุทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นไปมาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เกิดการเคลื่อนที่ของความชื้นจากด้านในไปยังผิววัสดุทำให้สามารถระเหยน้ำออกได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 4.4 (ข) (ง) และ (จ) โดยการใช้รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่องสามารถลดเวลาได้มากกว่ารังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) เมื่อเทียบที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน เนื่องจากมะม่วงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยการใช้รังสีอินฟราเรดพบว่าชิ้นมะม่วงอบแห้งที่วางใกล้รังสีอินฟราเรดมีสีน้ำตาลไหม้ซึ่งพบในช่วงท้ายของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.5 เนื่องจากเกิดความร้อนสะสมภายในวัสดุสูงทำให้เกิดความเสียหาย เพื่อลดการเสียหายลงสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลง 30-60 นาที จากเวลาเดิมโดยมะม่วงอบแห้งจะยังคงมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 18%(w.b) และปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.65 และยังช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้งอีกด้วย



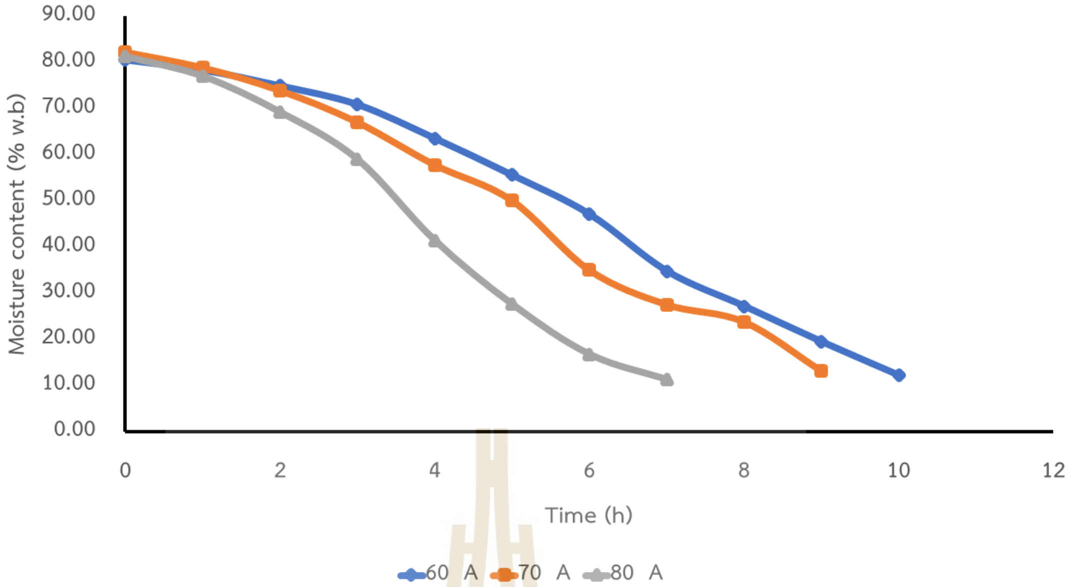
(ก) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว



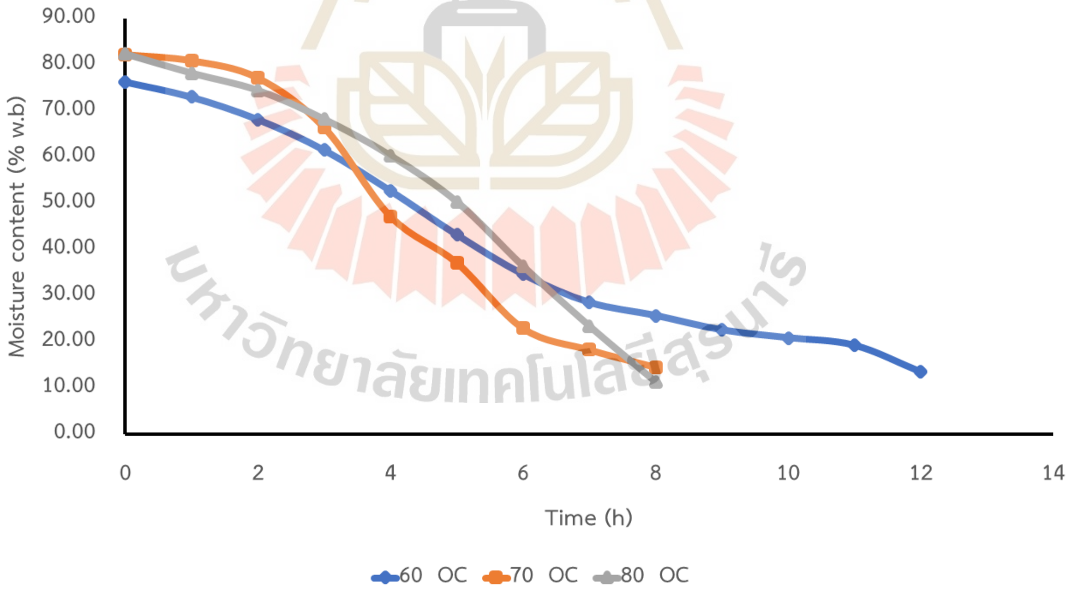
(ข) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดอย่างเดียว



(ค) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ



(ง) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ



(จ) การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นมะม่วงกับเวลาในการอบแห้งที่สภาวะต่างกัน

รูปที่ 4.5 ลักษณะรอยไหม้ของมะม่วงอบแห้งเมื่อใช้รังสีอินฟราเรด

4.4 ผลของการประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

4.4.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการอุ่นอากาศก่อนเข้าฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบเพื่อเพิ่มให้อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้นตามที่ต้องการ และการนำรังสีอินฟราเรดมาช่วยในการอบแห้งนั้นเป็นการช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าในระบบการอบแห้งลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.5 แสดงให้ให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวส่งผลให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะหรือ SEEC มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นต้องการพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับฮีตเตอร์สูงขึ้น ซึ่งค่า SEEC เฉลี่ยของการอบแห้งมะม่วงที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C คือ 15.39 16.11 และ 17.33 $MJ/kg_{evaporated\ water}$ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากถึงแม้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการใช้ไฟฟ้ามากขึ้นแต่ก็ลดระยะเวลาในการทำแห้งได้ เมื่อทำการทดสอบเปิดฮีต-เตอร์ไฟฟ้าให้อุณหภูมิอากาศจนได้อุณหภูมิอบแห้ง 60 70 และ 80°C พบว่าที่ระดับอุณหภูมิเดียวกันการใช้ไฟฟ้าผลิตลมร้อนอย่างเดียวใช้ไฟฟ้าไป 14.56 18.29 และ 18.47 kW-h โดยการผลิตลมร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าสามารถลดการใช้พลังงานจากไฟฟ้าได้ 4.68 6.66 และ 5.11 kW-h หรือคิดเป็น 27.15 32.73 และ 25.63 % ตามลำดับ ส่วนการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีค่า SEEC เฉลี่ยน้อยที่สุดของสภาวะการอบแห้งเท่ากับ 3.29 $MJ/kg_{evaporated\ water}$ เนื่องจากให้พลังงานกับโบลเวอร์เพื่อเป่าอากาศออกจากห้องอบแห้งเท่านั้น

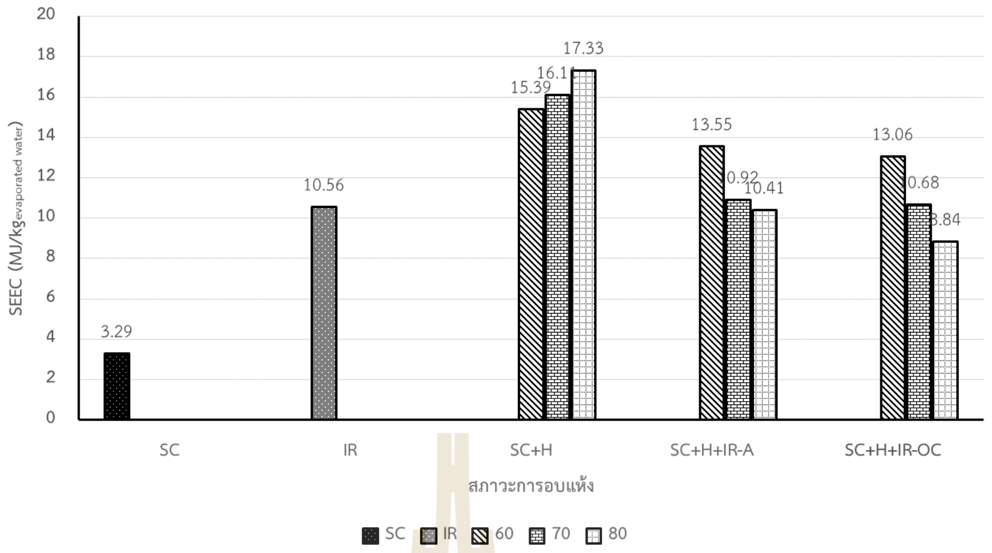
ส่วนการใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดร่วมด้วย พบว่าค่า SEEC มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากภายในวัสดุได้รับทั้งพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนและลมร้อนที่ผิวสัมผัสทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้นและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเวลาที่ใช้ในการ

อบแห้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 80°C แบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) มีค่า SEEC เฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 8.84 $MJ/kg_{evaporated\ water}$ ของระบบที่ใช้รังสีอินฟราเรดร่วม เมื่อพิจารณาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะเทียบกับรายงานของ วีระ ศรีอริยะกุล (2564) ซึ่งทำการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแพร่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนพบว่ามีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยสุด 68.84 $MJ/kg_{evaporated\ water}$ ที่สภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70°C และอุณหภูมิอินฟราเรด 70°C ดังนั้นการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์อุ่นอากาศขั้นต้นช่วยลดภาระของฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงาน จึงลดค่าใช้ด้านพลังงานลงได้

ตารางที่ 4.2 ค่าความชื้นสุดท้าย ค่า water activity ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ และอัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

สภาวะการอบแห้ง	ความชื้นสุดท้าย (% w.b)	a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	Time (h)
SC	15.51^{a}	0.59^{a}	3.29^{e}	0.11^{b}	26.67^{a}
IR-OC	13.45^{abcd}	0.52^{ab}	10.56^{cd}	0.25^{ab}	12.67^{b}
SC+H 60°C	14.77^{ab}	0.59^{a}	15.39^{ab}	0.13^{b}	23.33^{a}
SC+H 70°C	13.67^{abcd}	0.58^{ab}	16.11^{ab}	0.15^{b}	22.00^{a}
SC+H 80°C	14.47^{abc}	0.54^{ab}	17.33^{a}	0.15^{b}	20.67^{a}
SC+H+IR-A 60°C	11.93^{abcd}	0.47^{ab}	12.89^{bc}	0.36^{ab}	8.00^{b}
SC+H+IR-A 70°C	11.01^{cd}	0.46^{ab}	10.92^{cd}	0.48^{a}	7.33^{b}
SC+H+IR-A 80°C	10.20^{d}	0.46^{ab}	10.41^{cd}	0.46^{a}	6.33^{b}
SC+H+IR-OC 60°C	12.73^{abcd}	0.45^{b}	13.06^{bc}	0.25^{ab}	10.33^{b}
SC+H+IR-OC 70°C	11.76^{bcd}	0.48^{ab}	10.68^{cd}	0.33^{ab}	8.00^{b}
SC+H+IR-OC 80°C	11.65^{bcd}	0.48^{ab}	8.84^{d}	0.46^{a}	8.33^{b}

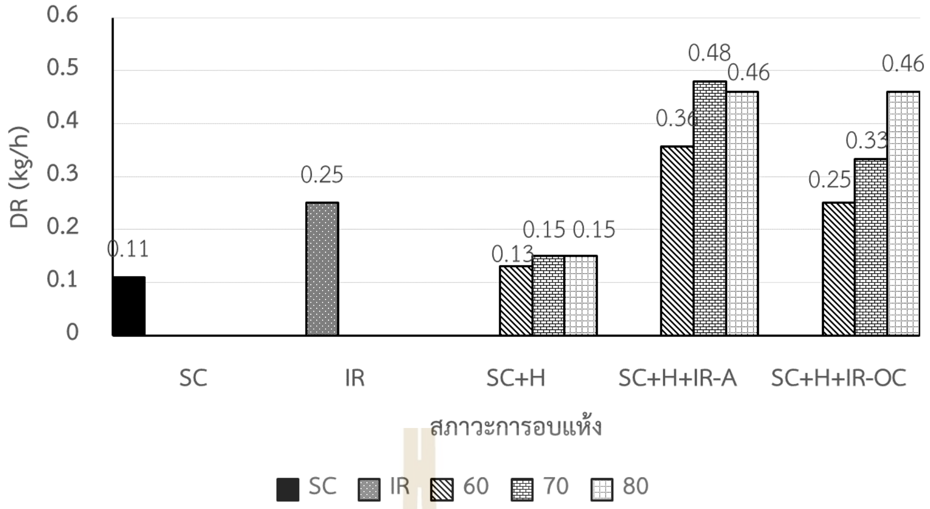
หมายเหตุ : อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



รูปที่ 4.6 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

4.4.2 อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเกิดการถ่ายเทมวลได้มากขึ้น (เรวัฒ คำวัน, สุรสิทธิ์ เที่ยงจันตา และสวัสดิ์ กีไสย์, 2561) ส่วนการใช้รังสีอินฟราเรดร่วมด้วยทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นลดระยะเวลาในการอบแห้งลง เป็นผลจากการแผ่รังสีทำให้ความร้อนภายในวัสดุเร่งการเคลื่อนที่ของความชื้นวัสดุออกสู่ผิววัสดุได้มากขึ้น โดยอัตราการระเหยน้ำสูงเมื่อสภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (70 และ 80°C) และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 80°C มีค่าอัตราการอบแห้งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะพบว่าที่สภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นสภาวะการอบแห้งที่มีค่า SEEC ต่ำกว่าสองสภาวะ แสดงให้เห็นถึงความร้อนจากรังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วงที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 80°C ไม่แตกต่างจากรังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และการใช้แบบเป็นช่วงยังประหยัดพลังงานมากกว่า อีกทั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ยังสามารถทำการอุ่นอากาศเพื่อลดภาระฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบได้อีกด้วย



รูปที่ 4.7 อัตราการอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

4.5 สมบัติทางกายภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง

4.5.1 ความชื้นสุดท้ายและค่า water activity

ปริมาณความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระของมะม่วงอบแห้งดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่ามะม่วงอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว มีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยมากที่สุด 15.51%(w.b) เนื่องจากมีอัตราการการอบแห้งที่ต่ำส่งผลให้เกิดการแข็งตัวของผิววัสดุ ซึ่งขัดขวางการระเหยของน้ำในมะม่วงออกมาสู่ผิวด้านนอกได้น้อยลงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนาน สำหรับระบบร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบมีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยน้อยกว่าโดยน้อยที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 70°C 13.67%(w.b) และสำหรับระบบที่เพิ่มรังอินฟราเรดมีความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยน้อยที่สุดที่สภาวะร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ 80°C 10.20%(w.b) โดยระบบที่ใช้รังสีอินฟราเรดส่งผลให้น้ำระเหยอออกจากมะม่วงด้วยอัตราการอบแห้งที่สูง ทำให้ความชื้นลดลงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบมีแนวโน้มลดลงมากที่สุด เนื่องจากมะม่วงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ

ส่วนค่า Water activity หรือ a_w ของมะม่วงอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียวและระบบร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 60°C มากที่สุดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับระบบร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (70 และ 80°C) และร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ พบว่าค่า Water activity ไม่มีความแตกต่าง นอกจากที่สภาวะร่วมจากจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่

อุณหภูมิ 60°C มีค่า Water activity เฉลี่ยน้อยที่สุด 0.45 และพบว่ามะม่วงอบแห้งทุกสภาวะการอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่า 18%(w.b) และมีค่า Water Activity ไม่เกิน 0.65 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้อบแห้ง

4.5.2 คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์

จากการนำมะม่วงที่ผ่านการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ มาทำการตรวจสอบคุณภาพด้านสีพบว่าค่าสี L* ของมะม่วงผลสดและอบแห้ง ดังแสดงในตาราง 4.3 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่าสี L* ลดลงจากผลสด การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงค่า L* มีแนวโน้มน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนค่าสี a* ของมะม่วงอบแห้ง พบว่าค่าสี a* ของมะม่วงผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่าสี a* เพิ่มขึ้นจากผลสดแสดงถึงการเกิดสีน้ำตาลของมะม่วงหลังผ่านการอบแห้ง (Chong, Law, Cloke, Abdullah, and Daud, 2008) การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงค่า a* มีแนวโน้มน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และค่าสี b* ของมะม่วงอบแห้ง พบว่าค่าสี b* ของมะม่วงผลสดและอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ค่าสี b* ลดลงจากผลสด การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงค่า b* มีแนวโน้มต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อนำไปอบแห้งด้วยระบบร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (60 และ 70°C) รักษาความเป็นสีเหลืองได้มากที่สุด โดยการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียวมีค่า L* และ b* น้อยที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งมากที่สุดเมื่อรวมเวลาที่เก็บหลังจาก 18.00 น. จากการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของสีมะม่วงผลสดและผ่านการอบแห้งแล้ว พบว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (60 และ 70°C) มีค่าความแตกต่างของสีเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยไม่ได้นำชิ้นมะม่วงที่มีรอยไหม้มาทำการหาคุณภาพหลังการอบแห้ง ดังนั้นค่าความแตกต่างของสีจึงไม่ได้บ่งบอกถึงการเกิดสีน้ำตาลมากนัก

ตารางที่ 4.3 ผลของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงน้ำดอกไม้

สภาวะการอบแห้ง	L^*	a^*	b^*	ΔE
Fresh	63.64^{a}	10.83^{b}	59.81^{a}	-
SC	46.11^{e}	18.43^{a}	34.87^{d}	17.28^{a}
IR-OC	55.49^{bc}	17.65^{a}	47.79^{bc}	10.60^{d}

หมายเหตุ : อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ผลของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสีของมะม่วงน้ำดอกไม้ (ต่อ)

สภาวะการอบแห้ง	L^*	a^*	b^*	ΔE
SC+H 60°C	58.22^{b}	17.08^{a}	52.12^{b}	10.89^{cd}
SC+H 70°C	54.26^{bcd}	17.17^{a}	49.77^{b}	11.48^{cd}
SC+H 80°C	52.89^{cd}	16.01^{a}	47.25^{bc}	12.53^{bc}
SC+H+IR-A 60°C	55.21^{bcd}	17.70^{a}	46.35^{bc}	8.66^{e}
SC+H+IR-A 70°C	56.67^{bc}	16.99^{a}	48.89^{bc}	8.70^{e}
SC+H+IR-A 80°C	55.26^{bcd}	18.10^{a}	47.37^{bc}	10.77^{cd}
SC+H+IR-OC 60°C	57.68^{b}	17.92^{a}	48.51^{bc}	11.25^{cd}
SC+H+IR-OC 70°C	50.79^{d}	17.72^{a}	42.57^{c}	13.95^{b}
SC+H+IR-OC 80°C	54.48^{bcd}	16.47^{a}	46.38^{bc}	11.48^{cd}

หมายเหตุ : อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.5.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

จากการวิเคราะห์ค่า Hardness ของมะม่วงอบแห้งพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \le 0.05$) โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่า Hardness มีแนวโน้มลดลง จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าที่สภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 80°C มีค่า Hardness เฉลี่ยน้อยที่สุดแสดงถึงแรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดด้วยหัววัด หรือเทียบได้กับการเคี้ยวครั้งแรกมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิในการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการการอบแห้งเพิ่มขึ้น ความชื้นออกมาสู่ผิวด้านนอกอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลทำให้เซลล์ภายในวัสดุเกิดการหดตัวได้น้อยลง เมื่อนำรังสีอินฟราเรดมาใช้ในระบบ พบว่าค่า Hardness มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกันโดยระบบที่ใช้ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบเปิดตลอด ซึ่งค่า Hardness ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลไม้อบแห้งอย่างเช่น แอปริคอท ลูกแพร์ สตรอเบอร์รี่ และกีวี ตามรายงานของ Chong, Law, Cloke, Abdullah, and Daud (2009) อยู่ในช่วง 1.63-26.05 N มีความชื้นสุดท้าย 1.86-28.83%(w.b) อย่างไรก็ตาม หากความชื้นสุดท้ายต่ำ ค่า Hardness มีแนวโน้มจะสูง โดยค่า Hardness มากเป็นผลให้ค่า Springiness ของการอบแห้งที่มีรังสีอินฟราเรดร่วมด้วยมีแนวโน้มลดลง โดยค่า Springiness เฉลี่ยมากที่สุดที่สภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจาก

ร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (60 70 และ 80°C) เมื่อมะม่วงอบแห้งมีค่า Hardness มากและค่า Springiness น้อย จึงมีค่า Cohesiveness มากแสดงถึงลักษณะการยึดเกาะของเนื้ออาหารภายในหรือความเหนียวมาก จึงต้องใช้แรงในการเคี้ยวสูงซึ่งดูได้จากค่า Chewiness (Ansari, Maftoon-Azad, Farahnaky, Hosseini, and Badii, 2014) โดยค่า Cohesivenes เฉลี่ยน้อยที่สุดคือ การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว และการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบ (70 และ 80°C) ส่วนค่า Chewiness เฉลี่ยน้อยที่สุด คือการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากร่วมจากแสงอาทิตย์ และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 80°C

ตารางที่ 4.4 ผลของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของมะม่วงน้ำดอกไม้

สภาวะการอบแห้ง	Hardness (N)	Springiness	Cohesiveness	Chewiness (N)
SC	14.05^{bc}	0.09^{b}	0.10^{e}	1.15^{ef}
IR-OC	17.06^{ab}	0.06^{c}	0.14^{d}	1.55^{de}
SC+H 60°C	15.83^{ab}	0.11^{a}	0.11^{e}	1.21^{ef}
SC+H 70°C	13.87^{bc}	0.11^{a}	0.10^{e}	1.14^{ef}
SC+H 80°C	9.77^{c}	0.11^{a}	0.10^{e}	1.00^{f}
SC+H+IR-A 60°C	19.35^{a}	0.07^{c}	0.22^{a}	2.89^{a}
SC+H+IR-A 70°C	17.25^{ab}	0.08^{c}	0.18^{bc}	2.53^{ab}
SC+H+IR-A 80°C	16.98^{ab}	0.08^{c}	0.15^{cd}	2.18^{bc}
SC+H+IR-OC 60°C	17.33^{ab}	0.07^{c}	0.19^{b}	1.86^{cd}
SC+H+IR-OC 70°C	16.69^{ab}	0.07^{c}	0.15^{d}	1.82^{cd}
SC+H+IR-OC 80°C	16.36^{ab}	0.08^{c}	0.14^{d}	1.60^{de}

หมายเหตุ : อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.6 การวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอกลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจากสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้ผลสดและอบแห้ง พบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ส่งผลต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 4.5 เห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือสลายตัวของสารฟีนอลิก ส่งผลให้ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระลดลง (Di Scala et al., 2011) เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจากสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 60°C มีค่ามากที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้น ทำให้เกิดการสลายตัวจากความร้อนได้น้อย

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมะม่วงน้ำดอกไม้ของการอบแห้งที่สภาวะต่าง ๆ

สภาวะการอบแห้ง	Antioxidant (mgTrolox/L)	TPC (mgGA/L)
Fresh	306.80^{a}	82.01^{a}
SC	116.50^{e}	21.29^{e}
IR-OC	156.70^{cde}	44.27^{cd}
SC+H 60°C	158.92^{bcde}	43.84^{cd}
SC+H 70°C	150.70^{cde}	43.37^{cd}
SC+H 80°C	52.60^{f}	32.94^{de}
SC+H+IR-A 60°C	193.90^{bc}	50.68^{bc}
SC+H+IR-A 70°C	180.74^{bcd}	46.24^{bc}
SC+H+IR-A 80°C	137.40^{de}	41.54^{cd}
SC+H+IR-OC 60°C	208.47^{b}	57.63^{b}
SC+H+IR-OC 70°C	198.30^{bc}	51.58^{bc}
SC+H+IR-OC 80°C	129.68^{e}	42.54^{cd}

หมายเหตุ : อักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.7 ผลการเปรียบเทียบที่สภาวะการอบแห้ง

จากการพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ อัตราการอบแห้ง ความชื้นสุดท้าย ค่าปริมาณน้ำอิสระ ค่าสี เนื้อสัมผัส ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของการทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ดังที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าไม่สามารถเลือกสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมได้อย่างชัดเจน จึงทำการวิเคราะห์ด้วยการให้คะแนนตามสมรรถนะและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งพิจารณาทีละหัวข้อ โดยสภาวะการอบแห้งที่ดีที่สุดของแต่ละหัวข้อจะได้ 1 คะแนน สภาวะที่ดีรองลงมาได้ 2 3 4 5 6 7 และ 8 คะแนน ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ทางสถิติที่ไม่แตกต่างกันนั้นจะได้คะแนนเท่ากันแสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อทำการรวมคะแนนทั้งหมดสภาวะการอบแห้งที่ได้คะแนนน้อยที่สุดคือ การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

	SC	IR	SC+H 60	SC+H 70	SC+H 80	SC+H+IR-A 60	SC+H+IR-A 70	SC+H+IR-A 80	SC+H+IR-OC 60	SC+H+IR-OC 70	SC+H+IR-OC 80
ความชื้นสุดท้าย	7	4	6	4	5	4	2	1	4	3	3
aw	3	2	3	2	2	2	2	2	1	2	2
SEEC	1	3	5	5	6	4	3	3	4	3	2
DR	3	2	3	3	3	2	1	1	2	2	1
Time	2	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1
L	6	2	1	3	4	3	2	3	1	5	3
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b	3	2	1	1	2	2	2	2	2	3	2
E	6	2	3	3	4	1	1	3	3	5	3
Hardness	2	3	3	2	1	4	3	3	3	3	3
Springiness	2	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3
Cohesiveness	1	2	1	1	1	3	3	3	3	2	2
Chewiness	2	3	2	2	1	7	6	5	4	4	3
TPC	5	3	3	3	4	2	2	3	1	2	3
DPPH	7	5	4	5	8	2	3	6	1	2	7
Total	51	38	39	38	45	41	35	40	34	41	39

รูปที่ 4.8 การให้คะแนนตามสมรรถนะการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์

4.8 สมการความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้

จากผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของมะม่วงที่อุณหภูมิ 25 45 65 และ 85°C แสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของ

อากาศแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์มีลักษณะเป็นรูปตัว S พบว่าที่อุณหภูมิคงที่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นค่าความชื้นสมดุลของมะม่วงจะมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความชื้นเดียวกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความชื้นสมดุลของมะม่วงจะมีค่าลดลง เมื่อทำการวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมกับค่าความชื้นสมดุลของมะม่วงโดยวิธีการ nonlinear regression ด้วยโปรแกรม SPSS ได้ค่าพารามิเตอร์ของสมการแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่ารูปแบบสมการ Modified Halsey สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 และมีค่า SEE ต่ำกว่าอีก 3 แบบจำลอง

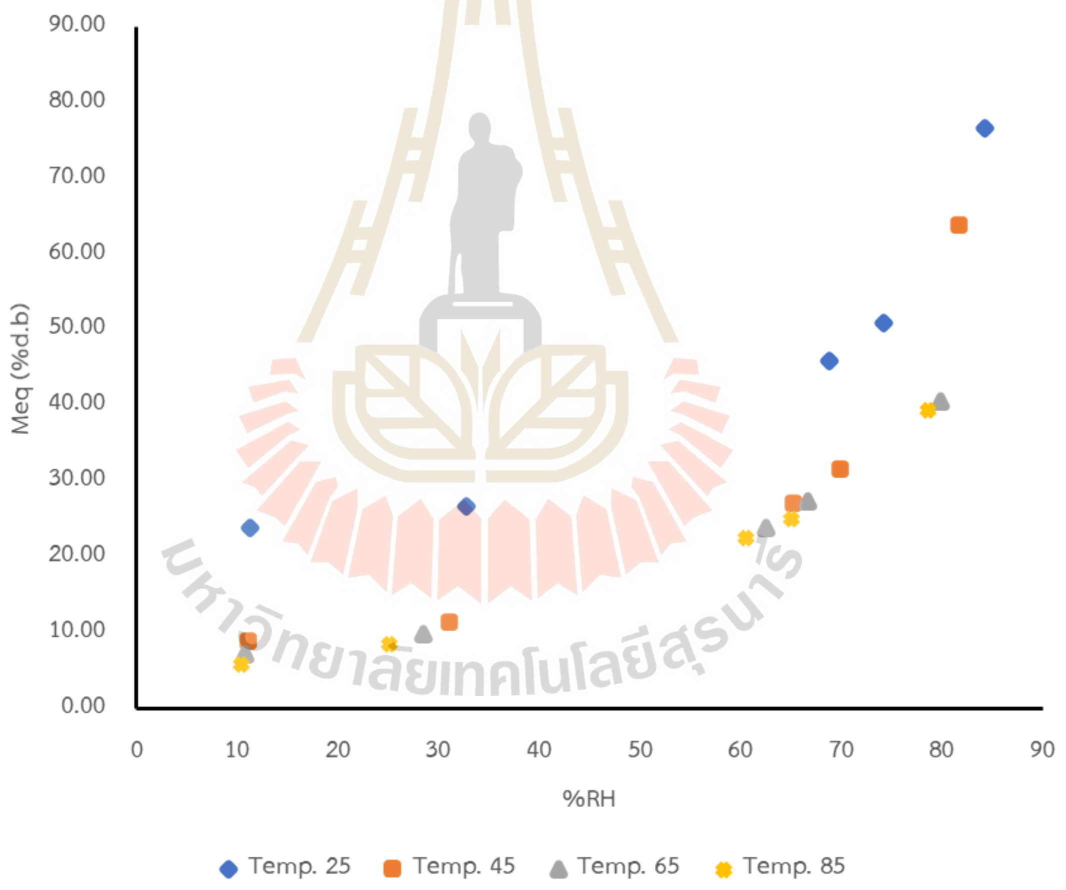
ตารางที่ 4.6 ค่าความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	**ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)**	**ความชื้นสมดุล (% d.b)**
25	11.3	23.96
25	32.78	26.76
25	68.86	45.93
25	74.25	50.98
25	84.34	76.65
45	11.16	8.87
45	31.1	11.42
45	65.26	27.03
45	69.99	31.53
45	81.74	63.69
65	10.86	7.25
65	28.54	9.85
65	62.5	23.95
65	66.64	27.48
65	79.85	40.49
85	10.38	5.82
85	25.11	8.59
85	60.56	22.52
85	65.03	25.05
85	78.68	39.42

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.7 ค่าประมาณของค่าคงที่ในสมการความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Parameters	Modified Chung-Pfost	Modified Halsey	Modified Oswin	Modified GAB
A	157.328	4.655	34.725	89.219
B	-2.844	-0.014	-0.218	0.523
C	0.059	1.395	1.803	25.75
R^2	0.881	0.947	0.922	0.887
SEE	6.51	4.33	5.28	6.34



รูปที่ 4.9 ความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้จากการทดลอง

4.9 สมการการอบแห้งชั้นบางของมะม่วงน้ำดอกไม้

จากผลการศึกษาหัวข้อที่ 4.8 นำมาหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Newton และ Page โดยความสามารถของแบบจำลองในการทำนายความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้มีดัชนีบ่งชี้คือ R^2 และ RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้เลือกแบบจำลองที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่ารูปแบบสมการของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ได้ดีโดยมีค่า R^2 ในช่วง 0.993-0.999 มีค่ามากกว่าสมการของ Newton และมีค่า RMSE ในช่วง 0.009-0.028 น้อยกว่าสมการของ Newton ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งของ Page มีความเหมาะสมมากที่สุดในการทำนายอัตราการส่วนความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีความแม่นยำสูงและค่าความผิดพลาดต่ำ

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่การอบแห้งแบบชั้นบางและค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

สภาวะการอบแห้ง	Newton			Page			
	k	R^2	RMSE	k	n	R^2	RMSE
SC	0.101	0.957	0.069	0.026	1.548	0.997	0.020
IR-OC	0.246	0.985	0.039	0.162	1.263	0.999	0.012
SC+H 60°C	0.094	0.975	0.050	0.042	1.32	0.996	0.019
SC+H 70°C	0.138	0.982	0.043	0.071	1.313	0.999	0.009
SC+H 80°C	0.140	0.965	0.062	0.053	1.456	0.998	0.018
SC+H+IR-A 60°C	0.242	0.958	0.067	0.110	1.517	0.998	0.014
SC+H+IR-A 70°C	0.307	0.982	0.044	0.204	1.308	0.999	0.011
SC+H+IR-A 80°C	0.352	0.970	0.059	0.213	1.426	0.997	0.016
SC+H+IR-OC 60°C	0.271	0.984	0.041	0.181	1.280	0.997	0.018
SC+H+IR-OC 70°C	0.319	0.911	0.111	0.082	2.119	0.997	0.022
SC+H+IR-OC 80°C	0.302	0.976	0.513	0.199	1.311	0.993	0.028

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.10 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ที่แสดงดังตารางที่ 4.9 สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขต่าง ๆ ของการคำนวณดังนี้

1) ต้นทุนการสร้างเครื่องอบแห้งรวม 44,400 บาท

2) อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สดได้ครั้งละ 4 kg (น้ำหนักมะม่วงรวมเปลือกและเมล็ด 10 kg)

3) ราคามะม่วงน้ำดอกไม้สด 15 บาทต่อกิโลกรัม

4) ใช้เวลาในการอบแห้งครั้งละ 11 ชั่วโมง (ลดความชื้น 85%(w.b) เหลือ 15%(w.b))

5) ราคามะม่วงน้ำดอกไม้แห้ง 500 บาทต่อกิโลกรัม (ผลิตภัณฑ์ดอยคำ 11 ส.ค. 65)

6) สมมติให้มีการอบแห้งผลผลิตอื่นที่เงื่อนไขการทำงานเดียวกันตลอดปี

7) ทำงานสัปดาห์ละ 6 วัน ดังนั้นทำงานปีละ 312 วัน

8) อัตราการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชั่วโมงเท่ากับ 1.75 kWh

9) อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 6.5% (ธ.ก.ส. 1 มิ.ย. 63)

10) ตัวเครื่องมีอายุการใช้งาน 10 ปี

11) มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของต้นทุน

12) ค่าบำรุงรักษารายปีคิดเป็น 5% ของต้นทุน

13) ค่าไฟฟ้าราคา 4.4 บาทต่อ kWh

14) ค่าแรงงาน 1 คน ชั่วโมงละ 40 บาท

ค่าใช้จ่ายเปรียบเทียบรายปีของต้นทุนสร้างเครื่อง

เงินลงทุนรายปี = 44,400 CRF (6.50%, 10)

= $44{,}400\ (i\ (1+i^{n})/((1+i)^{n}-1))$

= $44{,}400\ (0.065\ (1+0.065^{10})/((1+0.065)^{10}-1))$

= 6,176.25 บาท/ปี

มูลค่าซากรายปี = 44,400 SFF (6.50%, 10)

= $44{,}400\ (i/((1+i)^{n}-1))$

= $44{,}400\ (0.065/((1+0.065)^{10}-1))$

= 3,290.25 บาท/ปี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่าบำรุงรักษา = 44,400 x 0.05

= 2,220 บาท/ปี

ค่าพลังงานไฟฟ้ารายปี = ชั่วโมงการทำงาน x อัตราการใช้ไฟฟ้า x ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย

= 11 x 312 x 1.75 x 4.4

= 26,426.4 บาท/ปี

ค่ามะม่วงน้ำดอกไม้ = 10 กิโลกรัม/ครั้ง x ราคามะม่วงน้ำดอกไม้ x วันทำงาน

= 10 x 15 x 312

= 46,800 บาท/ปี

เงินค่าแรงงาน = 40 x 11 x 312

= 137,280 บาท/ปี

รวมเงินลงทุนรายปี = (เงินลงทุนสร้างเครื่องรายปี + เงินค่าบำรุงรักษารายปี + ค่ามะม่วงน้ำดอกไม้ + ค่าพลังงานในการอบแห้ง + ค่าแรงงาน) - มูลค่าซากรายปี

= (6,176.25 + 2,220 + 46,800 + 26,426.4 + 137,280) - 3,290.25

รวมเงินลงทุนรายปี = 215,612.4 บาท

น้ำหนักมะม่วงน้ำดอกไม้หลังการอบแห้ง

ความชื้นเริ่มต้น	85% (w.b)
ปริมาณเริ่มต้น	4 x 312 = 1,248 kg
ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ	15% (w.b)

น้ำหนักแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้ = น้ำหนักเริ่มต้น x (1 - (ความชื้นวัสดุ/100))

= 1,248 x (1 – (85/100))

= 187.2 kg

น้ำหนักมะม่วงน้ำดอกไม้ที่ความชื้น 15% = น้ำหนักแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้/(1 – (ความชื้นมะม่วงน้ำดอกไม้/100))

= 187.2/(1 – (14/100))

= 217.67 kg

ราคามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง = 217.67 x 500

= 108,837.21 บาท

ระยะเวลาคืนทุน = รวมเงินลงทุนรายปี/ราคามะม่วงน้ำดอกไม้อบแห้ง

= 215,612.4/108,837.21

= 1.98 ปี

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมการสร้างเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ ราคาค่าบำรุงรักษารายปี ค่ามะม่วงน้ำดอกไม้ ค่าพลังงานในการอบแห้ง และค่าแรงงาน รวมเป็นเงินลงทุนรายปี 215,612.4 บาท ผลตอบแทนจากการขายมะม่วงอบแห้งรายปี 108,837.21 บาท มีระยะเวลาการคืนทุนอยู่ที่ 1.98 ปี หรือ 2 ปี ซึ่งถือว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนเหมาะสำหรับธุรกิจครอบครัวหรือเกษตรกรรายย่อย ในช่วงผลผลิตล้นตลาดมีราคาตกต่ำนำมาแปรรูปเพิ่มมูลค่าได้และยังสามารถใช้ได้กับผลิตผลทางการเกษตรที่มีลักษณะใกล้เคียงได้ตลอดทั้งปี

ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
1	ฮีตเตอร์รังสีอินฟราเรด	4	300	1,200
2	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ประกอบไปด้วย	3	7,800	23,400
	-เหล็กกล่อง			
	-เหล็กแผ่น			
	-แผ่นอะคริลิคใส			
	-ฉนวนกันความร้อน			
	- Nut, Bolt, และอุปกรณ์จับยึด			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
3	ท่อลมร้อน	1	2,800	2,800
4	ตู้ควบคุมและระบบไฟฟ้า	1	3,700	3,700
5	ถาด	4	150	600
6	ชุดฮีตเตอร์ครีบ	1	3,100	3,100
7	ห้องอบแห้ง	1	5,900	5,900
8	โบลเวอร์	1	3,700	3,700
	รวมเป็นเงิน			**44,400**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1) เครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการพัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีชนิด 60° ทำมุมเอียง 14° กับแนวระดับ ขนาด 2x1 m^2 จำนวน 3 ชุด มีท่อลมเชื่อมต่อระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์และห้องผลิตลมร้อนที่ติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบขนาด 1500 W จำนวน 2 ตัว ทางเข้าห้องอบแห้งติดตั้งโบลเวอร์เพื่อระบายความชื้นออกจากห้องอบแห้งและควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ภายในห้องอบแห้งมีถาด 4 ชั้น แต่ละชั้นติดตั้งรังสีอินฟราเรด โดยอากาศจะไหลเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่อรังสีอาทิตย์กระทบกับแผงรับแสงจะทำให้อากาศอุ่นขึ้น อากาศถูกดูดมายังห้องผลิตลมร้อน ซึ่งฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบจะทำงานถ้าหากอากาศมีอุณหภูมิไม่ถึงค่าที่กำหนด ในส่วนการทำงานของรังสีอินฟราเรดจะทำงานแบบช่วงตามที่กำหนด และโบลเวอร์จะดูดอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้ง

2) จากการทดลองการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อให้คะแนนตามสมรรถนะการอบแห้งและคุณภาพของผลิตภัณฑ์พบว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรดแบบเป็นช่วง (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบครีบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์

3) สมการความชื้นสมดุลของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยแบบจำลองของ Modified Halsey สามารถทำนายค่าความชื้นสมดุลได้ใกล้เคียงมากที่สุด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแหล่งความร้อนร่วมจากรังสีอินฟราเรดและพลังงานแสงอาทิตย์มากที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มายังห้องอบแห้งอาจจะต้องลดความยาวท่อและหุ้มฉนวนท่อ

2) ควรศึกษาสภาวะการอบแห้งในการใช้รังสีอินฟราเรดแบบช่วงเพิ่มเติมเพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง เนื่องจากความชื้นสุดท้ายที่ได้จากการทดลองแห้งเกินไป ทำให้ค่า Chewiness สูง

3) เพื่อป้องกันการเกิดรอยไหม้ที่ผลิตภัณฑ์อาจจะเพิ่มระบบถาดหมุนทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับรังสีอินฟราเรดได้ทั่วถึง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, และกระวี ตรีอำนรรค. (2564). ผลของการปรับสภาพด้วยวิธีการลวกต่อสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของมะม่วงโชคอนันต์อบแห้ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22.

ณัฐพล แซ่ลิ้ม, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, และกระวี ตรีอำนรรค. การอบข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมีต่ำ (ปริญญานิพนธ์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

เทวรัตน์ ทิพยวิมล. (2552). การอบแห้งและการเก็บรักษาผลผลิตเกษตร. เอกสารประกอบการสอนสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, กระวี ตรีอำนรรค, เกียรติศักดิ์ ใจโต, คนธรส ถินสูงเนิน, เฉลิมชาติ เสาวรัจ, กฤษดา สายแสง, และศักรินทร์ ปาปะเก. (2560). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้าแบบบังคับการไหลเพื่อใช้ทำความสะอาดโรงเรือนปศุสัตว์ทดแทนสารเคมี. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2549). เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

บุหรัน พันธุ์สวรรค์. (2556). อนุมูลอิสระ สารต้านอนุมูลอิสระ และการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 21(3), 274-286.

พชร ว่องไพศาลกิจ. (2562). การประยุกต์ใช้โมดูลเทอร์อิเล็คทริคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการอบแห้งอุณหภูมิต่ำ (ปริญญานิพนธ์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

เรวัฒ คำวัน, สุรสิทธิ์ เที่ยงจันตา, และสวัสดิ์ กีไสย์. (2561). การหาอัตราการแห้งตัวของขนุนโดยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดระบบสุญญากาศ. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง*, 11(2), 67-77.

วีระ ศรีอริยะกุล. (2564). การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้โดยใช้การแผ่รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับอากาศร้อน. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)*, 17(3), pp 16-182.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2563). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้งมอก. 919-2563. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม. 15 หน้า.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศปี 2563. สืบค้นจาก https://www.oae.go.th/view/1/TH-TH.

Afzal, T. M., Abe, T., and Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR–convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42, 177-182.

Al-Juamily, K. E. J., Khalifa, A. J. N., and Yassen, T. A. (2007). Testing of performance of fruit and vegetable solar drying system in Iraq. *Desalination*, 209, 163-170.

Andrés, A., Fito, P., Heredia, A., and Rosa, E. M. (2007). Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technology*, 25(11), 1857-1866. doi:10.1080/07373930701677488

Ansari, S., Maftoon-Azad, N., Farahnaky, A., Hosseini, E., and Badii, F. (2014). Effect of moisture content on textural attributes of dried figs. *International Agrophysics*, 28(4). doi:10.2478/intag-2014-0031

AOAC. (2000). Official methods of AOAC Internation. (17th ed.). USA: The Association of Official Analitical Chemists.

Arslan, D., and Özcan, M. M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, color and antioxidant content. *Food Bioproducts Processing*, 89(4), 504-513.

Augustus, L., Kumar, S., and Bhattacharya, S. C. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(4), 367-393. doi:10.1016/s1364-0321(02)00005-9

Aviara, N. A., Ajibola, O. O., and Oni, S. A. (2004). Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. *Biosystems Engineering*, 87(2), 179-190. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.11.006

Bala, B. K. (1997). Drying and storage of cereal grains. USA: Science Publishers. 302p.

Barragán-Iglesias, J., Rodríguez-Ramírez, J., Sablani, S. S., and Méndez-Lagunas, L. L. (2018). Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) pretreated with calcium and osmotic dehydration. *Drying Technology*, 37(7), 906-919. doi: 10.1080/07373937.2018.1473420

Barreto, J. C., Trevisan, M. T., Hull, W. E., Erben, G., De Brito, E. S., Pfundstein, B., Wurtele, G., Spiegelhalder, B., and Owen, R. W. (2008). Characterization and quantitation of polyphenolic compounds in bark, kernel, leaves, and peel of mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5599-5610.

Belessiotis, V., and Delyannis, E. (2011). Solar drying. Sol Energy, 85:1665-1691.

Brennan, J. G. (2005). Food processing handbook. doi:10.1002/3527607579

Chong, C. H., Law, C. L., Cloke, M., Abdullah, L. C., and Daud, W. R. W. (2008). Drying kinetics, texture, color, and determination of effective diffusivities during sun drying of chempedak. *Drying Technology*, 26(10), 1286-1293. doi:10.1080/07373930802307308

Chong, C. H., Law, C. L., Cloke, M., Abdullah, L. C., and Daud, W. R. W. (2009). Drying models and quality analysis of sun-dried ciku. *Drying Technology*, 27(9), 985-992. doi:10.1080/07373930902904491

Chu, K. J., and Chou, S. K. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*, 14: 519-528.

Corzo, O., and Alvarez, C. (2012). Color change kinetics of mango at different maturity stages during air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(1): 508-517. doi/10.1111/j.1745-4549.2012.00801.x

Das, I., Das, S. K., and Bal, S. (2009). Drying kinetics of high moisture paddy undergoing vibration-assisted infrared (IR) drying. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 166-171. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.04.02

Di Scala, K., Vega-Gálvez, A., Uribe, E., Oyanadel, R., Miranda, M., Vergara, j., Quispe, I., and Lemus-Mondaca, R. (2011). Changes of quality characteristics of pepino fruit during convective drying. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(4), 746-753. doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02555.x

Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: An overview of drying principles and theory. *Energy Conversion & Management*, 40(6), 593-613. doi:10.1016/s0196-8904(98)00092-2

Ekechukwu, O. V., and Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion & Management*, 40(1999), 615-655. doi:10.1016/s0196-8904(98)00093-4

El-Mesery, H. S., and Mwithiga, G. (2015). Performance of a convective, infrared and combined infrared- convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2721-2730. doi:10.1007/s13197-014-1347-1.

Erbay, Z., and Icier, F. (2010). A Review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464. doi:10.1080/10408390802437063

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Fellows, P. (1997). Food processing technology: Principles and practices. Cambridge: Ellis Horwood Publishing. pp. 505.

Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., and Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30.

Garg, H. P., Sharma, V. K., Mahajan, R. B., and Bhargave, A. K. (1985). Experimental study of an inexpensive solar collector cum storage system for agricultural uses. *Solar Energy*, 35(4), 321-331.

Ghodake, H. M., Goswami, T. K., and Chakraverty, A. (2007). Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 827-835. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.11.023

Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards-A Physics and Chemistry*, 81, 89-96. doi.:10.6028/jres.081A.011

Hall, C. W. (1962). Theory of infrared drying. *Transactions of the ASAE*, 5(1), 14-16.

Hashimoto, A., and Kameoka, T. (1999). Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology-An International Journal*, 17: 1613-1626.

Hebbar, H. U., and Rostagi, N. K. (2001). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Journal of Food Engineering*, 47(1), 1-5.

Hebbar, H. U., Vishwanathan, K. H., and Ramesh, M. N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 557-563. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.02.020

IZLI, N., IZLI, G., and TASKIN, O. (2017). Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Science and Technology*, 37(4): 604-612.

Janjai, S., and Bala, B. K., (2012). Solar drying technology. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16-54. doi:10.1007/s12393-011-9044-6

Jayas, D. S., and Mazza, G. (1993). Comparison of five, three parameter equations for the description of adsorption data of oats. *Transactions of the ASAE*, 36(1): 119-125.

Jenkins, G. W., and Forth, M. W. (1965). Infrared drying of shelled corn. *Transactions of the ASAE*, 8(4), 457-459. doi:10.13031/2013.40549

Karim, M. A., and Hawlader, M. N. A. (2006). Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors. *Energy*, 31(4), 452-470. doi:10.1016/j.energy.2005.03.007

Khir, R., Pan, Z., Salim, A., Hartsough, B.R., and Mohamed, S. (2011). Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying. *Food Science and Technology*, 44(4), 1126-1132. doi:10.1016/j.lwt.2010.10.003

Kumar, M., Sansaniwal, S. K., and Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346-360.

Lingayat, A., Chandramohan, V. P., and Raju, V. R. K. (2017). Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia*, 109, 409-416. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.041

Nowak, D., and Lewicki, P. P. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 5(3), 353-360. doi:10.1016/j.ifset.2004.03.003.

Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., and Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6, 412-419.

Prakash, O., and Anil, K. (2013). Historical review and recent trends in solar drying systems. *International Journal of Green Energy*, 10(7), 690-738.

Ranjan, R., Irudayaraj, J., and Jun, S. (2002). Simulation of infrared drying process. *Drying Technology*, 20(2), 363-379. doi:10.1081/DRT-120002547

Sandin, R., Chegini, G. R., and Sadin, H. (2014). The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. *Heat Mass Transfer*, 50(4), 501-507. doi:10.1007/s00231-013-1255-3.

Sapers, G. M., and Douglas, Jr. F. W. (1987). Measurement of enzymatic browning at cut surfaces and in juice of raw apple and pear fruits. *Journal Food Science*, 52, 1258-1261.

Sharma, A., Chen, C., and Vu Lan N. (2009). Solar-energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1185-1210.

Soda, M. S., and Chandra, R. (1994). Solar drying systems and their testing procedures: a review. *Energy Conversion and Management*, 35(3), 219-267.

Song, X. D., Mujumdar, A. S., Law, C. L., Fang, X. M., Peng, W. J., Deng, L. Z., Wang, J., and Xiao, H. W. (2019). Effect of drying air temperature on drying kinetics, color, carotenoid content, antioxidant capacity and oxidation of fat for lotus pollen, *Drying Technology*, 38(9), 1151-1164. doi:10.1080/07373937.2019. 1616752

Sparrow, E. M., and Lin, S. H. (1962). Absorption of thermal radiation in a V-groove cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5(11), 1111-1115. doi:10.1016/0017-9310(62)90064-9

Talla, A., Jannot, Y., Nkeng, G. E., and Puiggali, J. R. (2005). Experimental determination and modeling of sorption isotherms of tropical fruits: Banana, mango, and pineapple. *Drying Technology*, 23(7), 1477-1498. doi:10.1081/DRT-200063530

Tarminzi, M. A. S. M., Razak, A. A., Azmi, M. A. A., Fazlizan, A., Majid, Z. A. A., and Sopian, K. (2021). Comparative study on thermal performance of cross-matrix absorber solar collector with series and parallel configurations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100935. doi:10.1016/j.csite.2021. 100935.

Tian, Y., and Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied Energy*, 104, 538-553. doi:10.1016/j.apenergy.2012.11.051

Tomar, V., Tiwari, G. N., and Norton, B. (2017). Solar dryers for tropical food preservation: Thermophysics of crops, systems and components. *Solar Energy*, 154(15), 2-13. doi:10.1016/j.solener.2017.05.066

VijayaVenkataRaman, S., Iniyan, S., and Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652-2670. doi:10.1016/j.rser.2012.01.007

Zambrano, M. V., Dutta, B., Mercer, D. G., MacLean, H. L., and Touchie, M. (2019). Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 16, 2652-2670. doi:10.1016/j.tifs.2019.04.006

ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.1 ความชื้นเริ่มต้นของมะม่วงน้ำดอกไม้

ครั้งที่	น้ำหนัก			ความชื้นมะม่วง (% w.b)
	ถ้วย (g)	ถ้วย+มะม่วงผลสด (g)	ถ้วย+มะม่วงแห้ง (g)	
1	11.2412	16.2086	12.0576	83.56
2	15.1574	20.4069	16.0128	83.71
3	15.3743	20.2293	16.1862	83.28
เฉลี่ย				**83.52**

ตารางผนวกที่ ก.2 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรขนาน ที่อัตราการไหล 0.02 (kg/s)

วงจร	อัตราการไหล (kg/s)	เวลา	I (W/m^2)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	η_C (%)
ขนาน	0.02	10.00 น.	300.00	34.9	62.40	36.92
		11.00 น.	395.00	35.1	63.40	29.37
		12.00 น.	646.00	35.0	70.05	22.24
		13.00 น.	830.00	32.7	79.27	23.00
		14.00 น.	780.00	31.9	80.72	26.18
		15.00 น.	590.00	31.9	58.68	18.61

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.3 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรขนาน ที่อัตราการไหล 0.06 (kg/s)

วงจร	อัตราการไหล (kg/s)	เวลา	I (W/m^2)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	η_C (%)
ขนาน	0.06	10.00 น.	266.33	33.9	53.98	73.22
		11.00 น.	225.67	34.5	51.60	73.57
		12.00 น.	273.00	34.8	52.42	62.66
		13.00 น.	129.00	34.5	38.02	26.47
		14.00 น.	670.00	34.1	61.17	39.22
		15.00 น.	772.00	35.0	72.43	47.08

ตารางผนวกที่ ก.4 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรขนาน ที่อัตราการไหล 0.09 (kg/s)

วงจร	อัตราการไหล (kg/s)	เวลา	I (W/m^2)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	η_C (%)
ขนาน	0.09	10.00 น.	721.00	33.4	61.08	58.34
		11.00 น.	924.67	34.5	72.18	61.93
		12.00 น.	889.00	34.7	71.90	63.58
		13.00 น.	739.33	34.5	74.45	80.11
		14.00 น.	715.67	33.1	72.68	80.04
		15.00 น.	627.33	32.2	60.43	68.39

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.5 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.02 (kg/s)

วงจร	อัตราการไหล (kg/s)	เวลา	I (W/m^2)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	η_C (%)
อนุกรม	0.02	10.00 น.	500.00	33.4	72.42	30.56
		11.00 น.	551.67	34.4	75.70	36.17
		12.00 น.	801.33	35.1	80.7	29.90
		13.00 น.	876.67	34.9	80.63	27.18
		14.00 น.	904.33	31.2	80.45	27.38
		15.00 น.	796.67	31.1	80.22	31.25

ตารางผนวกที่ ก.6 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.06 (kg/s)

วงจร	อัตราการไหล (kg/s)	เวลา	I (W/m^2)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	η_C (%)
อนุกรม	0.06	10.00 น.	670.00	33.0	70.82	52.78
		11.00 น.	782.67	33.8	72.92	46.73
		12.00 น.	923.33	34.5	80.70	47.80
		13.00 น.	650.00	35.3	74.12	55.84
		14.00 น.	647.67	37.4	73.72	52.43
		15.00 น.	778.00	35.5	72.08	43.97

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.7 ทดสอบการประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์วงจรอนุกรม ที่อัตราการไหล 0.09 (kg/s)

วงจร	อัตราการไหล (kg/s)	เวลา	I (W/m^2)	T_{CI} (°C)	T_{CO} (°C)	η_C (%)
อนุกรม	0.09	10.00 น.	400.00	31.2	54.03	82.56
		11.00 น.	611.00	31.7	66.68	82.81
		12.00 น.	794.00	31.8	76.28	81.03
		13.00 น.	898.33	33.3	80.35	77.36
		14.00 น.	950.33	37.8	80.82	68.10
		15.00 น.	762.33	35.6	80.55	87.68

ตารางผนวกที่ ก.8 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว (SC)

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ความชื้น (% w.b)		a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	Time (h)
		เริ่มต้น	สุดท้าย				
SC	1	85.36	15.21	0.60	3.14	0.12	22
	2	84.46	15.55	0.59	3.33	0.11	30
	3	85.00	15.77	0.57	3.41	0.11	28

ตารางผนวกที่ ก.9 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดอย่างเดียว (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) (IR-OC)

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ความชื้น (% w.b)		a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	Time (h)
		เริ่มต้น	สุดท้าย				
IR	1	76.32	11.40	0.47	10.72	0.19	16
	2	81.32	14.21	0.52	11.87	0.28	10
	3	80.36	14.73	0.56	9.08	0.27	12

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.10 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์และฮีตเตอร์ครีบ (60 70 และ 80 °C) (SC+H)

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ความชื้น (% w.b) เริ่มต้น	ความชื้น (% w.b) สุดท้าย	a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	Time (h)
SC+H 60 °C	1	81.32	15.15	0.57	15.88	0.14	22
	2	84.44	15.51	0.66	14.18	0.14	26
	3	80.59	13.65	0.53	16.10	0.11	22
SC+H 70 °C	1	83.87	12.75	0.64	14.64	0.15	22
	2	83.22	15.15	0.60	17.29	0.17	24
	3	80.27	13.10	0.50	16.41	0.13	20
SC+H 80 °C	1	83.92	13.18	0.53	17.40	0.14	24
	2	80.82	17.31	0.58	17.93	0.15	18
	3	76.27	12.92	0.50	16.65	0.16	20

ตารางผนวกที่ ก.11 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ฮีตเตอร์อินฟราเรด (เปิดตลอด) และฮีตเตอร์ครีบ (60 70 และ 80 °C) (SC+H+IR-A)

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ความชื้น (% w.b) เริ่มต้น	ความชื้น (% w.b) สุดท้าย	a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	Time (h)
SC+H+IR-A 60 °C	1	80.53	12.79	0.52	13.72	0.24	10
	2	79.11	12.06	0.48	13.75	0.46	7
	3	83.52	10.95	0.42	13.17	0.37	7
SC+H+IR-A 70 °C	1	82.18	10.42	0.49	10.87	0.44	9
	2	80.78	12.27	0.49	11.71	0.41	7
	3	79.04	10.33	0.41	10.17	0.59	6
SC+H+IR-A 80 °C	1	79.58	11.59	0.50	12.48	0.39	7
	2	81.32	9.56	0.45	9.03	0.51	6
	3	82.80	9.46	0.42	9.72	0.48	6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.12 ทดสอบการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ด้วยพลังงานความร้อนร่วมจากแสงอาทิตย์ ฮีตเตอร์อินฟราเรด (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) และฮีตเตอร์ครีบ (60 70 และ 80 °C) (SC+H+IR-OC)

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ความชื้น (% w.b)		a_w	SEEC (MJ/kg)	DR (kg/h)	Time (h)
		เริ่มต้น	สุดท้าย				
SC+H+IR-OC 60 °C	1		12.61	0.45	12.8	0.26	10
	2		13.28	0.43	14.21	0.18	12
	3		12.30	0.46	12.18	0.31	9
SC+H+IR-OC 70 °C	1		11.18	0.45	10.59	0.51	7
	2		11.83	0.45	11.31	0.24	8
	3		12.26	0.54	10.14	0.25	9
SC+H+IR-OC 80 °C	1		11.73	0.47	9.84	0.28	10
	2		10.75	0.52	8.07	0.68	8
	3		12.48	0.46	8.60	0.42	7

ตารางผนวกที่ ก.13 ปริมาณสารละลายมาตรฐาน Trolox ในการวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH

Trolox (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm ครั้งที่		
	1	2	3
0	1.047	1.077	1.030
50	0.890	0.899	0.931
150	0.640	0.671	0.689
250	0.456	0.434	0.436
350	0.235	0.179	0.259
450	0.039	0.040	0.037

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.14 ผลการหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของมะม่วงน้ำดอกไม้

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm	Antioxidant (mgTrolox/L)
Fresh	1	0.395	285.59
	2	0.329	315.59
	3	0.321	319.23
B1	1	0.459	256.50
	2	0.447	261.95
	3	0.421	273.77
SC	1	0.719	138.32
	2	0.792	105.14
	3	0.79	106.05
IR-OC	1	0.633	177.41
	2	0.703	145.59
	3	0.700	146.95
SC+H 60 °C	1	0.636	176.05
	2	0.691	151.05
	3	0.694	149.68
SC+H 70 °C	1	0.630	178.77
	2	0.730	133.32
	3	0.715	140.14
SC+H 80 °C	1	0.911	51.05
	2	0.864	72.41
	3	0.948	34.23
SC+H+IR-A 60 °C	1	0.541	219.23
	2	0.623	181.95
	3	0.626	180.59

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.14 ผลการหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของมะม่วงน้ำดอกไม้ (ต่อ)

สภาวะการอบแห้ง	**ครั้งที่**	**ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm**	**Antioxidant (mgTrolox/L)**
SC+H+IR-A 70 °C	1	0.612	186.95
	2	0.625	181.05
	3	0.640	174.23
SC+H+IR-A 80 °C	1	0.676	157.86
	2	0.737	130.14
	3	0.750	124.23
SC+H+IR-OC 60 °C	1	0.526	226.05
	2	0.583	200.14
	3	0.585	199.23
SC+H+IR-OC 70 °C	1	0.552	214.23
	2	0.579	201.95
	3	0.630	178.77
SC+H+IR-OC 80 °C	1	0.723	136.50
	2	0.721	137.41
	3	0.770	115.14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.15 ปริมาณสารละลายมาตรฐาน Gallic acid ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยใช้วิธี Folin Ciocalteu

Gallic (mg/L)	**ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ครั้งที่**		
	1	**2**	**3**
10	0.205	0.11	0.178
20	0.329	0.342	0.275
40	0.434	0.496	0.54

ตารางผนวกที่ ก.15 ปริมาณสารละลายมาตรฐาน Gallic acid ในการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยใช้วิธี Folin Ciocalteu (ต่อ)

Gallic (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ครั้งที่		
	1	2	3
60	0.613	0.575	0.654
80	0.843	0.85	0.872
100	0.989	1.052	1.032

ตารางผนวกที่ ก.16 ผลการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้

สภาวะการอบแห้ง	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm	TPC (mgGA/L)
Fresh	1	0.833	78.92
	2	0.842	79.89
	3	0.91	87.20
B1	1	0.784	73.66
	2	0.811	76.56
	3	0.773	72.47
SC	1	0.346	26.56
	2	0.275	18.92
	3	0.27	18.39
IR-OC	1	0.51	44.19
	2	0.469	39.78
	3	0.553	48.82

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางผนวกที่ ก.16 ผลการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของมะม่วงน้ำดอกไม้ (ต่อ)

สภาวะการอบแห้ง	**ครั้งที่**	**ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm**	**TPC (mgGA/L)**
SC+H 60 °C	1	0.506	43.76
	2	0.526	45.91
	3	0.488	41.83
SC+H 70 °C	1	0.532	46.56
	2	0.459	38.71
	3	0.516	44.84
SC+H 80 °C	1	0.442	36.88
	2	0.375	29.68
	3	0.399	32.26
SC+H+IR-A 60 °C	1	0.599	53.76
	2	0.516	44.84
	3	0.596	53.44
SC+H+IR-A 70 °C	1	0.48	40.97
	2	0.528	46.13
	3	0.579	51.61
SC+H+IR-A 80 °C	1	0.497	42.80
	2	0.464	39.25
	3	0.495	42.58
SC+H+IR-OC 60 °C	1	0.666	60.97
	2	0.583	52.04
	3	0.656	59.89
SC+H+IR-OC 70 °C	1	0.583	52.04
	2	0.581	51.83
	3	0.572	50.86
SC+H+IR-OC 80 °C	1	0.508	43.98
	2	0.527	46.02
	3	0.449	37.63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 ความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้

ความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้เริ่มต้น ตัวอย่างที่ 1 (ตารางผนวกที่ ก.1)

$$M = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100\%$$

$$M = \frac{4.9674 - 0.8164}{4.9674} \times 100\%$$

$$M = 84.56\%$$

เมื่อ M คือ ความชื้นของมะม่วง (% w.b)

w_i คือ น้ำหนักมะม่วงก่อนเข้าตู้อบลมร้อน (g)

w_f คือ น้ำหนักมะม่วงหลังเข้าตู้อบลมร้อน (g)

มะม่วงน้ำดอกไม้มีความชื้น 84.56% (w.b)

ข.2 ประเมินสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสรอาทิตย์ต่อวงจรแบบขนาน พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 6 m^2 มีอัตราการไหลของอากาศ 0.02 kg/s ทดสอบเวลา 10.00 น. ความเข้มรังสีอาทิตย์ 300.00 W/m^2 อุณหภูมิขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 34.9 °C และอุณหภูมิขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 62.40 °C พลังงานที่แผงรับรังสีอาทิตย์ หาได้จากสมการ (ตารางผนวกที่ ก.2)

$$Q_u = \dot{m}C_a\left(T_{CO} - T_{CI}\right)$$

$$Q_u = 0.02 \times 1.0069\left(62.40 - 34.90\right)$$

$$Q_u = 0.55$$

เมื่อ Q_u คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (kW)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg°C)

T_{CO} คือ อุณหภูมิของอากาศขาออกจากตัวเก็บรังสี (°C)

T_{CI} คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าจากตัวเก็บรังสี (°C)

ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ 0.55 kW
ดังนั้นประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \times I} \times 100\%$$

$$\eta_c = \frac{0.55}{6 \times 300} \times 100\%$$

$$\eta_c = 30.55\%$$

เมื่อ η_c คือ ประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

A_c คือ พื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

I คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อวงจรแบบขนาน ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.02 kg/s มีประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 30.55%

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.3 ประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

ข.3.1 ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้น้ำหนักเริ่มต้น 4.30 kg สภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดอย่างเดียว (เปิด 5 นาที ปิด 3 นาที) น้ำหนักหลังการอบแห้ง 1.21 kg พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง 9.2 kW-h ความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ หาได้จากสมการ (ตารางผนวกที่ ก.9)

$$SEEC = \frac{3.6 \times E}{w_i - w_f}$$

$$SEEC = \frac{3.6 \times 9.2}{4.30 - 1.21}$$

$$SEEC = 10.72$$

เมื่อ SEEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (MJ/kg)
E คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (kW-h)

อบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้เริ่มต้น 4.30 kg ให้ได้น้ำหนักหลังการอบแห้ง 1.21 kg มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 10.72 MJ/kg

ข.3.2 อัตราการอบแห้ง

ใช้สภาวะการอบแห้งตามข้อ ข.3.1 เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง 16 h (ตารางผนวกที่ ก.9) อัตราการอบแห้ง หาได้จากสมการ

$$DR = \frac{w_i - w_f}{t}$$

$$DR = \frac{4.30 - 1.21}{16}$$

$$DR = 0.19$$

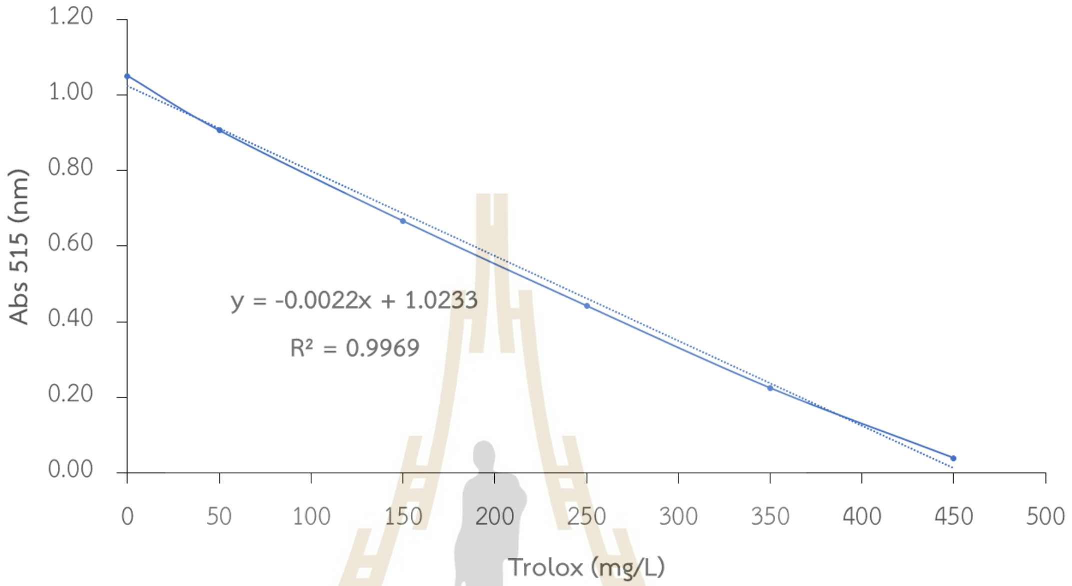
เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h)
t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

อัตราการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้ 0.19 kg/h

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.4 ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระที่สภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยทำกราฟมาตรฐานของ Trolox (ตารางผนวกที่ ก.13)



รูปที่ ข.1 กราฟมาตรฐานของ Trolox

ได้สมการเชิงเส้น

$$y = -0.0022x + 1.0233$$

$$x = \frac{y - 1.0233}{-0.0022}$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm ที่วัดได้จากตัวอย่าง

x คือ Antioxidant (mgTrolox/L)

นำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐาน Trolox (ตารางผนวกที่ ก.14)

$$x = \frac{0.719 - 1.0233}{-0.0022}$$

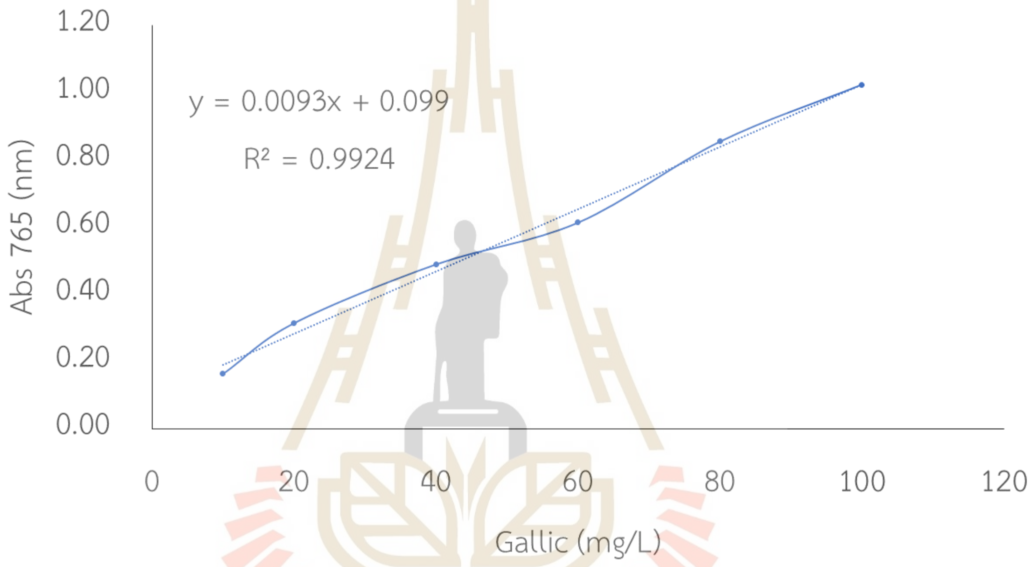
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$x = 138.32$$

ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ 138.32 mgTrolox/L

ข.5 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่สภาวะการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์อย่างเดียว โดยทำกราฟมาตรฐานของ Gallic acid (ตารางผนวกที่ ก.15)



รูปที่ ข.2 กราฟมาตรฐานของ Gallic acid

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้สมการเชิงเส้น

$$y = 0.0093x + 0.099$$

$$x = \frac{y - 0.099}{0.0093}$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ที่วัดได้จากตัวอย่าง

x คือ TPC (mgGA/L)

นำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐาน Gallic acid (ตารางผนวกที่ ก.16)

$$x = \frac{0.346 - 0.099}{0.0093}$$

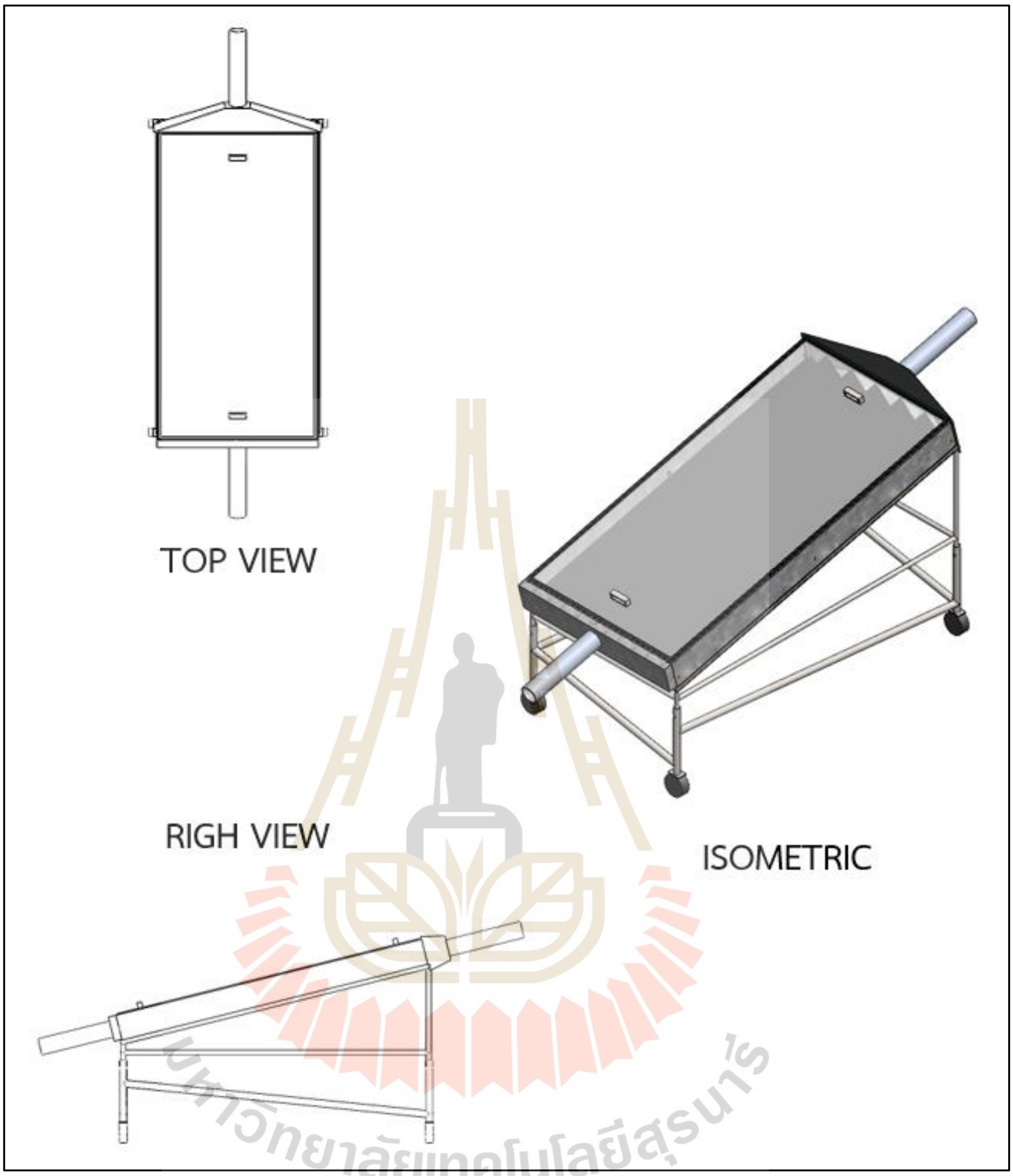
$$x = 26.56$$

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 26.56 mgGA/L

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ค
แบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.1 แบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ภาคผนวก ง
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, และกระวี ตรีอำนรรค. (2564). ผลของการปรับสภาพด้วยวิธีการลวกต่อสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของมะม่วงโชคอนันต์อบแห้ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22.

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, และกระวี ตรีอำนรรค. (2565). การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบร่องรูปตัววีเมื่อจัดวางแบบขนานและอนุกรม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14.

จันทนา สีลาน้ำเที่ยง, เทวรัตน์ ตรีอำนรรค, และกระวี ตรีอำนรรค. (xxxx). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้. *วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนคร*, (x),xx-xx.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจันทนา สีลาน้ำเที่ยง เกิดเมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2541 สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนวังน้ำเย็นวิทยาคม จังหวัดสระแก้ว เมื่อปีการศึกษา 2558 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2562 ในปี พ.ศ. 2563 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับการสนับสนุนทุนกิตติบัณฑิต เป็นระยะเวลา 2 ปี ในระหว่างการศึกษาได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา 521355 Agricultural Machinery Engineering Laboratory, 521356 Agricultural Engineering Laboratory I, 521357 Agricultural Engineering Laboratory II, 521412 Agricultural and Food Engineering Laboratory II, และรายวิชา 521423 Agricultural Survey ซึ่งการฝึกสอนทำให้ได้รับประสบการณ์ใหม่ ๆ และทบทวนความรู้อย่างสม่ำเสมอ และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย