



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ระบบอบแห้งความดันต่ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DRYING WITH LOW PRESSURE FOR USING SOLAR ENERGY



By

Mr. Chanwit PHONYIAM

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science PHYSICS

Department of PHYSICS

Academic Year 2025

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	ระบบอบแห้งความดันต่ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
โดย	นายชาญวิทย์ พลเยี่ยม
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกช ชันจิรกุล)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณีฎฐ์ กาศยปนนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรวรรณ อัมพร)



660720007 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานแสงอาทิตย์, การอบแห้งความดันต่ำ, ความดันอากาศ

นาย ชาณุวิทย์ พลเยี่ยม: ระบบอบแห้งความดันต่ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนด้านทรัพยากรไม่ว่าจะเป็นด้านพลังงานหรือด้านปัญหาการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้มีความต้องการใช้พลังงานและบริโภคอาหารมากขึ้น เทคโนโลยีการอบแห้งช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานและช่วยในการถนอมอาหารเพื่อเพิ่มความมั่นคงทางด้านอาหาร ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับระบบอบแห้งความดันต่ำภายในห้องอบแห้งโดยทำการทดลองอบแห้งกล้วยและไพลโดยหม้อดูดความชื้นความดันต่ำมีความดันอากาศเท่ากับ 0.6 bar การอบแห้งใช้เวลา 3 วันพบว่า ความชื้นสุดท้ายของกล้วยในการตากแดดธรรมชาติ การอบแห้งด้วยพาราโบลาโดมและการอบแห้งด้วยระบบความดันต่ำมีค่าเท่ากับ 46.38 % w.b., 38.51% w.b. และ 35.68 % w.b. ตามลำดับ และของไพลเท่ากับ 13.95 % w.b., 13.04 % w.b. และ 12.5 % w.b. ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการลดความดันอากาศในห้องอบแห้งช่วยให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีการลดลงของความชื้นมากกว่า ในขั้นตอนถัดมาผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมเปรียบเทียบกับการอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ จากการจำลองแบบ (simulation) แรงที่เกิดผนังเครื่องอบแห้งด้วยโปรแกรม solidwork 2022 ผู้วิจัยได้ปรับปรุงแบบและสร้างเครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งความดันต่ำโดยสามารถอบแห้งได้ที่ความดันต่ำ 0.9 bar อย่างไรก็ตามพบว่าเกิดความชื้นสะสมภายในห้องอบแห้งทำให้อัตราการระเหยน้ำของกล้วยต่ำกว่าการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมดั้งเดิม ค่าความชื้นสูงสุดของกล้วยจากเครื่องอบแห้งที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำคือ 9.70 % w.b. และ 15.30 % w.b. ตามลำดับ ผลการทดสอบ water activity มีค่า 0.548 และ 0.605 ตามลำดับ ในขณะที่สีของกล้วยจากเครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศมีค่า $L^* = 35.85$, $a^* = 9.08$, $b^* = 16.75$ และสำหรับเครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมความดันต่ำมี ค่า $L^* = 41.32$, $a^* = 14.77$, $b^* = 24.58$

660720007 : Major PHYSICS

Keyword : Solar dryer, Solar energy, Low-pressure drying, Atmospheric pressure

Mr. Chanwit PHONYIAM : Drying with low pressure for using solar energy

Thesis advisor : Assistant Professor Somjet Pattarapanitchai

Currently, the problem of resource shortages, whether it is energy or population growth, has led to an increased demand for energy and food consumption. Drying technology helps solve energy shortages problem and aid in food preservation to enhance food. In this research, the researcher conducted drying experiments using a solar drying system compared the results with a low-pressure drying system. The experiments were performed on dried banana and dried Plai (*Zingiber montanum*). A low-pressure desiccator operating at an air pressure of 0.6 bar was used, and all of period of drying process took 3 days. The results show that the final moisture contents of the bananas dried in open sun drying, the parabola dome solar dryer, and the low-pressure drying system were 46.38 % w.b., 38.51% w.b., and 35.68% w.b., respectively, while Plai were 13.95 % w.b., 13.04 % w.b. and 12.5 % w.b. respectively. This indicates that reducing the air pressure in the drying chamber enhances moisture reduction in the dried products. In the next phase, the researcher dried bananas using a parabola dome solar dryer compared with drying bananas using a parabola dome dryer operating under low atmospheric pressure. The simulation of the pressure on the dryer walls using SolidWorks 2022, was produced the researcher improved the design and constructed a low-pressure parabola dome dryer capable of operating at a reduced pressure to 0.9 bar. However, it was found that moisture accumulation occurred inside the drying chamber, resulting in a lower evaporation rate of the bananas compared to the conventional parabola dome dryer. The final moisture content of bananas from a parabola dome dryer and parabola dome dryer with low pressure are 9.70 % w.b. and 15.30 % w.b.. The results of the water activity values are 0.548 and 0.605. The results of color from parabola dome dryer are $L^* = 35.85$, $a^* = 9.08$, $b^* = 16.75$ while parabola dome dryer with low pressure are $L^* = 41.32$, $a^* = 14.77$, $b^* = 24.58$

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ ที่ช่วยให้คำแนะนำตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณะอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ที่ช่วยสนับสนุนด้านทุนการศึกษาสำหรับงานวิจัย นอกจากนี้ยังขอขอบคุณเพื่อนร่วมสาขาฟิสิกส์ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดมา สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถนำไปเป็นแนวทางและช่วยต่อยอดในการพัฒนางานวิจัยด้านการอบแห้งของประเทศต่อไป



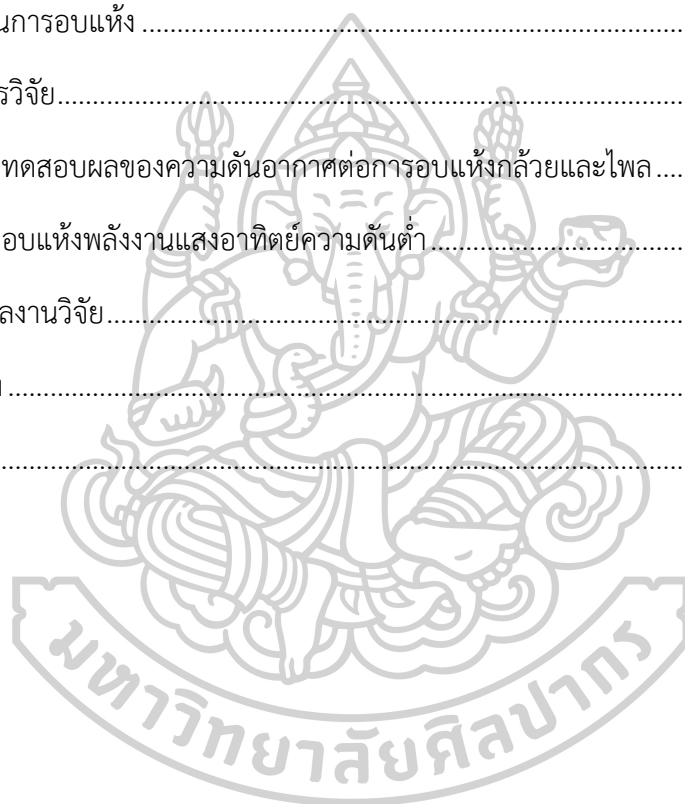
ชาญวิทย์ พลเยี่ยม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การอบแห้ง (Drying).....	3
2.2 วัสดุชื้น (Moist Material)	3
2.3 น้ำในวัสดุชื้น.....	3
2.3.1 น้ำอิสระ (free water)	3
2.3.2 น้ำดูดซับ (adsorb water).....	4
2.3.3 น้ำเกาะติด (bound water).....	4
2.4 Water activity	4
2.5 อากาศชื้น	5
2.5.1 ความดันไอน้ำ (Vapour pressure).....	6
2.5.2 ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapur pressure).....	6
2.5.3 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio)	7

2.5.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity).....	7
2.6 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content).....	7
2.7 กระบวนการอบแห้ง (Drying process).....	8
2.7.1 การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น (Heat transfer).....	8
2.7.2 ปริมาณความชื้นในวัสดุชิ้นและการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้ง.....	11
2.8 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying).....	14
2.9 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	15
2.9.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection solar dryer).....	15
2.9.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนโดยบังคับอากาศ (Forced convection solar dryer).....	16
2.9.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบผสม.....	18
2.10 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม (Parabola dome solar dryer)...	19
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศและจุดเดือดของน้ำ.....	21
2.12 ความดันและคุณสมบัติยืดหยุ่น.....	23
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย.....	30
3.1 การทดลองผลกระทบความดันอากาศต่อการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	30
3.1.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม.....	30
3.1.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ.....	32
3.1.3 การทดสอบการอบแห้งด้วยระบบความดันต่ำโดยใช้หม้อดูดความชื้น.....	33
3.2 การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ.....	35
3.2.1 เงื่อนไขแบบจำลอง (simulation conditions).....	35
3.2.2 ผลของแบบจำลอง.....	36

3.3 การสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสำหรับอบแห้งความดันต่ำ.....	38
3.3.1 ทดสอบการรั่วของอากาศเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสำหรับ อบแห้งความดันต่ำ.....	39
3.3.2 ระบบสุญญากาศที่ใช้สำหรับการอบแห้ง.....	40
3.3.3 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมความดัน.....	42
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าและบันทึกผล.....	43
3.5 ขั้นตอนการอบแห้ง.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	51
4.1 ผลการทดสอบผลของความดันอากาศต่อการอบแห้งกล้วยและไพล.....	51
4.2 ผลการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ.....	56
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย.....	60
รายการอ้างอิง.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	64



สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลชีพ (Baldet & Colas, 2012).....	5
รูปที่ 2 องค์ประกอบของอากาศชื้น (เสริม จันทร์ฉาย, 2560).....	6
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิคงที่.....	8
รูปที่ 4 แสดงช่วงความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Comer & Harrower, 2013).	10
รูปที่ 5 กราฟการแห้ง (drying curve) (เสริม จันทร์ฉาย, 2560).....	12
รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งกับเวลา (drying rate) (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)	13
รูปที่ 7 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ดัดแปลงจาก (Ekechukwu & Norton, 1999)..	15
รูปที่ 8 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม ดัดแปลงจาก (Ekechukwu & Norton, 1999).	16
รูปที่ 9 เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่รับรังสีอาทิตย์โดยตรง (เสริม จันทร์ฉาย, 2560).....	17
รูปที่ 10 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมสำหรับดูดอากาศ(เสริม จันทร์ฉาย, 2560).....	17
รูปที่ 11 องค์ประกอบเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบผสม (Cedeño et al.)	18
รูปที่ 12 ตัวอย่างองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนแบบบังคับแบบผสม (Ekechukwu & Norton, 1999).....	19
รูปที่ 13 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม.....	20
รูปที่ 14 แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบตัน (www.bing.com).....	21
รูปที่ 15 แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบลูกฟูก (tse1.mm.bing.net).....	21
รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดและความดันอากาศ (il.mahidol.ac.th).....	22
รูปที่ 17 ระบบอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศ.....	24
รูปที่ 18 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด.....	25
รูปที่ 19 ระบบอบแห้งความดันต่ำอัตโนมัติโดยใช้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า.....	26

รูปที่ 20	แผนภาพโครงสร้างและองค์ประกอบของระบบอบแห้งแบบ Pulsed vacuum infrared .	27
รูปที่ 21	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา	30
รูปที่ 22	data logger Yokogawa DC100 series	31
รูปที่ 23	Temperature and Relative Humidity Sensor E+E.....	31
รูปที่ 24	ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ.....	32
รูปที่ 25	Digital Thermo-Hygrometer	33
รูปที่ 26	มวลตัวอย่างในการอบแห้ง	34
รูปที่ 27	เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาและหม้อดูดความชื้นความดันต่ำ.....	34
รูปที่ 28	ตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C.....	34
รูปที่ 29	แบบเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาสำหรับความดันต่ำ	35
รูปที่ 30	การจำลองความดันที่กระทำต่อพาราโบลาโดม (a) stress (b) displacement (c) strain	36
รูปที่ 31	โครงเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งความดันต่ำ	38
รูปที่ 32	เครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งที่ความดันต่ำ.....	38
รูปที่ 33	ทดสอบการรั่วซึมของอากาศของโดมอบแห้ง.....	39
รูปที่ 34	ทดสอบการลดความดันอากาศภายในโดมอบแห้ง	40
รูปที่ 35	ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump DSZH 115) (www.bing.com)	41
รูปที่ 36	เซนเซอร์วัดความดันอากาศ (Panasonic digital pressure sensor model DP-100 series)	41
รูปที่ 37	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3) (tse2.mm.bing.net).....	41
รูปที่ 38	Relay module (tse1.mm.bing.net).....	41
รูปที่ 39	แผนผังการทำงานระบบควบคุมความดัน	42
รูปที่ 40	ตำแหน่งเซนเซอร์วัดความดันอากาศภายในห้องอบแห้งและสายต่อปั๊มดูดอากาศ ในห้องอบแห้ง	43
(b) รูปที่ 41	ตำแหน่งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ (a) สำหรับพาราโบลาโดม (b) สำหรับพาราโบลาโดมความดันต่ำ	44

รูปที่ 42 data logger Yokogawa FX1000 series.....	44
รูปที่ 43 การอบแห้งกล้วยสำหรับพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศ.....	45
รูปที่ 44 การอบแห้งกล้วยสำหรับพาราโบลาโดมความดันต่ำ	45
รูปที่ 45 การตากแห้งตามธรรมชาติ	46
รูปที่ 46 รอยแตกของแผ่นโพลีคาร์บอเนต.....	46
รูปที่ 47 ความเสียหายต่อเครื่องอบแห้งความดันต่ำที่เกิดจากแรงดันอากาศขณะอบแห้ง (a) ความเสียหายต่อแผ่นโพลีคาร์บอเนต (b) ความเสียหายต่อโครงสร้างเครื่องอบแห้ง	47
รูปที่ 48 แก้วโครงสร้างภายในหลังเกิดความเสียหายจากแรงดันอากาศ.....	48
รูปที่ 49 การอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ.....	48
รูปที่ 50 Rotronic Hygrolab water activity meter (a) ช่องใส่ตัวอย่าง (b) ขณะทำการวัดค่า... 49	
รูปที่ 51 Hunterlab miniscan EZ colorimeter (a) หน้าจอแสดงผล (b) probe วัดสี	50
รูปที่ 52 นำมวลตัวอย่างอบแห้ง 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	50
รูปที่ 53 มวลตัวอย่างของกล้วยและไพลที่ได้จากการอบแห้งพาราโบลาโดม.....	51
รูปที่ 54 มวลตัวอย่างของกล้วยและไพลที่ได้จากการอบแห้งหม้อความดันต่ำ	51
รูปที่ 55 กราฟแสดงความเข้มข้นสีอาทิตย์ขณะอบแห้ง	52
รูปที่ 56 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ขณะอบแห้งของการอบแห้งที่ความดันอากาศและความดันต่ำ52	
รูปที่ 57 กราฟแสดงอุณหภูมิขณะอบแห้งของการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำ.....	53
รูปที่ 58 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยขณะอบแห้ง	54
รูปที่ 59 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไพลขณะอบแห้ง.....	54
รูปที่ 60 กราฟแสดงความเข้มข้นสีอาทิตย์ขณะทำการอบแห้ง.....	56
รูปที่ 61 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละระบบ.....	57
รูปที่ 62 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งขณะอบแห้ง	57
รูปที่ 63 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุอบแห้ง.....	58

รูปที่ 64 ผลิตภัณท์ออบแห้งที่ได้จากการตากตามธรรมชาติ พาราโบลาคือความดันบรรยากาศและ
พาราโบลาคือความดันต่ำ..... 59



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันมีปัญหาด้านการขาดแคลนด้านทรัพยากรไม่ว่าจะเป็นด้านพลังงานหรือด้านปัญหาการเพิ่มขึ้นของประชากร ทำให้มีความต้องการใช้พลังงานและบริโภคอาหารมากขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถสร้างเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อลดปัญหาเหล่านี้ เช่น เทคโนโลยีโซลาร์เซลล์สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หรือเทคโนโลยีการอบแห้งเพื่อช่วยทดแทนการขาดแคลนอาหารและยังสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ได้อีกด้วย

การใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการถนอมอาหารในรูปแบบหนึ่งคือการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยเป็นการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนเพื่อไปใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งหมายถึง การเอาน้ำออกจากวัสดุอบแห้งหรือผลิตภัณฑ์อาหาร โดยการทำให้ปริมาณน้ำอิสระลดลงจนจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ทำให้เก็บรักษาไว้ได้นานและสามารถแปรรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ การอบแห้งโดยทั่วไปในครัวเรือนมักใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งการอบแห้งด้วยพลังงานไฟฟ้าจะทำให้มีประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดี แต่ก็เป็นการใช้พลังงานที่มีการปลดปล่อยคาร์บอนปริมาณมาก ดังนั้นการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นอีกแนวทางสำหรับการอบแห้ง โดยปัจจุบันมีเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีรูปทรงหลากหลาย เช่น เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตู้ (cabinet dryer) เครื่องอบแห้งแบบหลังคากระจก (glass-roof solar dryer) เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ลม (solar tunnel dryer) เครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก (solar greenhouse dryer)

สำหรับเครื่องอบแห้งแบบเรือนกระจก (solar greenhouse dryer) มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเป็นเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้โพลีคาร์บอเนตซึ่งทำงานร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าให้แก่พัดลมเพื่อระบายความชื้นของผลิตภัณฑ์ออกทำให้ผลิตภัณฑ์แห้ง แต่สำหรับบางผลิตภัณฑ์จำเป็นต้องใช้เวลามากในการอบแห้งหรือบางครั้งอาจไม่สามารถใช้เวลาอบยาวนานได้ จึงมีระบบการอบแห้งชนิดอื่นเพื่อลดปัญหานี้เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แห้งที่มีคุณภาพดี

จากการศึกษาพบว่าความดันอากาศมีผลต่อการระเหยและจุดเดือดของน้ำ ผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดเพื่อลดเวลาและอุณหภูมิอบแห้งสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความรวดเร็วและลดการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการจากความร้อน การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความ

ดันต่ำ คือการอบแห้งในระบบปิดและการลดความดันของห้องอบแห้งให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เนื่องจากความดันที่ต่ำช่วยลดจุดเดือดของน้ำ ทำให้สามารถระเหยน้ำออกได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งในสภาพแวดล้อมที่มีความดันปกติ ทำให้ใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยลงและสามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการได้ดียิ่งขึ้น (Barzee et al., 2021)

สำหรับเครื่องอบแห้งสภาวะความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอก จะมีความแตกต่างของความดันอากาศซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำต่อเครื่องอบแห้งจากบรรยากาศด้านนอกกดลงที่เครื่องอบแห้งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องอบแห้งได้ ดังนั้นการสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของโครงสร้างมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาพารามิเตอร์ของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความดันอากาศต่างกัน
2. ศึกษาและพัฒนาโครงสร้างเครื่องอบแห้งที่สามารถทนต่อความดันอากาศลบ
3. สร้างและพัฒนากระบวนการอบแห้งความดันต่ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบอบแห้งความดันต่ำโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ออกแบบให้เป็นระบบปิดมีขนาดเล็กที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงเพื่อทนต่อความดันอากาศภายนอก ป้อนสุญญากาศที่ทำหน้าที่ดูดอากาศเพื่อทำให้ความดันอากาศในเครื่องอบแห้งลดลง โดยจะทำการลดความดันอากาศลงน้อยสุดที่ 0.6 bar ทำการบันทึกและเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง ความชื้นภายในเครื่องอบแห้ง มวลของผลิตภัณฑ์และความดันอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การอบแห้ง (Drying)

การอบแห้ง หมายถึงกระบวนการกำจัดความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในวัสดุโดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) และการถ่ายเทมวล (Mass transfer) ด้วยการใช้ความร้อนจากแหล่งพลังงานต่าง ๆ ถ่ายเทไปยังวัสดุเพื่อใช้ในการระเหยน้ำเป็นไอน้ำและเกิดการเคลื่อนที่ของไอน้ำไปบริเวณพื้นผิววัสดุสู่สภาพแวดล้อมส่งผลให้ปริมาณน้ำในวัสดุลดลง (เสริม จันทร์ฉาย, 2560) กระบวนการอบแห้งเป็นหนึ่งในกระบวนการสำคัญของอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร วัสดุชีวภาพ และอุตสาหกรรมเกษตร การทำให้ปริมาณน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุลดลงจะส่งผลให้วัสดุอบแห้งมีอายุการเก็บรักษามากขึ้น ลดการเน่าเสียและยังสามารถรักษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ไว้ได้

2.2 วัสดุชื้น (Moist Material)

วัสดุชื้น หมายถึงวัสดุประกอบด้วยของแข็งและมีน้ำเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง โดยน้ำในวัสดุชื้นสามารถอยู่ในรูปของเหลวหรือไอน้ำกระจายตัวอยู่ในของแข็งนั้น (เสริม จันทร์ฉาย, 2560) ซึ่งปริมาณความชื้นของวัสดุชื้นสามารถแสดงได้ในรูปของความชื้นมาตรฐานแห้ง (moisture content dry basis) บอกถึงอัตราส่วนระหว่างมวลน้ำต่อมวลของแข็งและความชื้นมาตรฐานเปียก (moisture content wet basis) บอกถึงอัตราส่วนระหว่างมวลน้ำต่อมวลวัสดุชื้น

2.3 น้ำในวัสดุชื้น

น้ำในวัสดุชื้นจะมีปริมาณการกระจายตัวและมีวิธียึดเกาะกับโครงสร้างแตกต่างกันไปในแต่ละประเภทของวัสดุชื้น ซึ่งน้ำในวัสดุชื้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ น้ำอิสระ (free water) น้ำดูดซับ (adsorb water) และน้ำเกาะติด (bound water) (Mathlouthi, 2001)

2.3.1 น้ำอิสระ (free water)

หมายถึงน้ำในวัสดุชื้นมักอยู่รอบนอกสุดของเซลล์หรือภายในโดยไม่ถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมีอย่างถาวร ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งลักษณะน้ำอิสระมีดังนี้

- สามารถระเหยได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและถูกแช่แข็งได้ตามอุณหภูมิของน้ำปกติ
- สามารถทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย (solvent)
- มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของอาหาร

2.3.2 น้ำดูดซับ (adsorb water)

หมายถึงน้ำที่ยึดติดกับของแข็งหรือผิวของวัสดุขึ้นด้วยแรงทางกายภาพหรือพันธะเคมี เช่น แรลงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) หรือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ซึ่งลักษณะน้ำดูดซับมีดังนี้

- ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ
- ต้องการพลังงานในการระเหยสูงกว่าน้ำอิสระ

2.3.3 น้ำเกาะติด (bound water)

หมายถึงน้ำที่ถูกยึดเหนี่ยวไว้กับโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุขึ้นอย่างแน่นหนาทำให้สูญเสียความอิสระในการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งลักษณะน้ำเกาะติดมีดังนี้

- จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้
- ต้องการพลังงานสูงมากในการระเหย

2.4 Water activity

ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ สำหรับจุลชีพ (micro-organism) ในวัสดุขึ้นแต่ละชนิดมีความสามารถในการใช้ประโยชน์จากน้ำได้ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุขึ้นและความแอคทีฟ (active) ของน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมสภาพ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้บอกระดับความแอคทีฟของน้ำด้วยพารามิเตอร์ที่เรียกว่า “แอคทีวิตีของน้ำ (a_w)” (เสริม จันทรธนาย, 2560) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันไอของวัสดุขึ้นต่อความดันไอที่สภาวะสมดุลหรือกล่าวคือวัสดุขึ้นที่มีน้ำอิสระมากจะมีความดันไอและค่าแอคทีวิตีของน้ำมาก ซึ่งแสดงดังสมการ (Madhumathy, 2021)

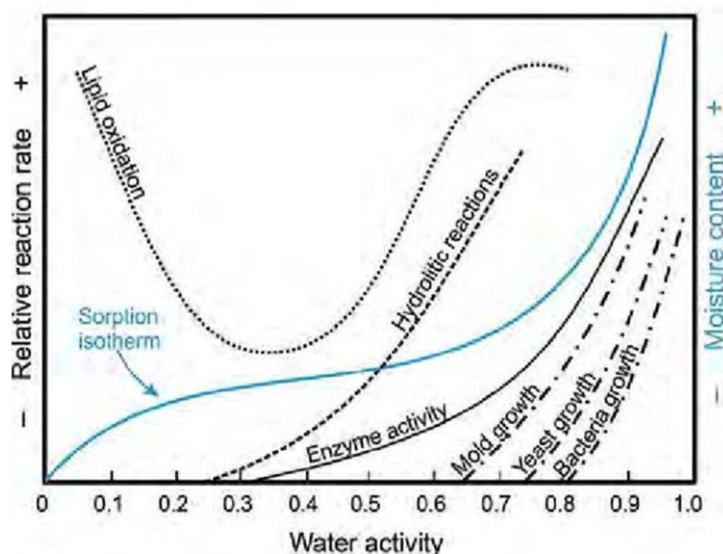
$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

เมื่อ	a_w	คือ water activity (-)
	P	คือ ความดันไอของน้ำเหนือผลิตภัณฑ์ (kPa)
	P_0	คือ ความดันไอน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (kPa)

ค่า a_w ของอาหารทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 0 -1.0 และค่า a_w ยังมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity : RH) ของอากาศโดยรอบดังสมการ

$$RH = a_w \times 100 \quad (2)$$

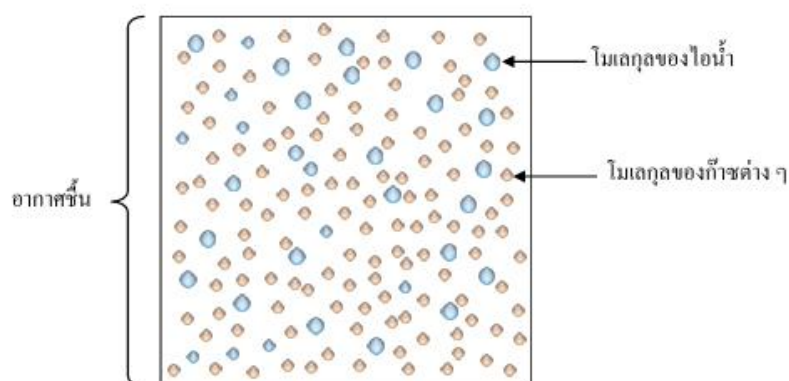
จากการศึกษาด้านเทคโนโลยีอาหารพบว่า แบคทีเรียส่วนใหญ่สามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อ $a_w \geq 0.91$ ในขณะที่เชื้อราสามารถเจริญเติบโตได้ดีเมื่อ $a_w \geq 0.8$ (Stevenson et al., 2015) ในวัสดุชั้น 2 ชั้นที่มีความชื้นเท่ากัน แต่ปริมาณน้ำอิสระไม่เท่ากันจะส่งผลให้วัสดุชั้นทั้งสองมีค่า a_w แตกต่างกันระดับการเน่าเสียและการเจริญเติบโตของจุลชีพก็จะแตกต่างกันออกไป ซึ่งค่า a_w ที่จุลชีพต้องการใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีสามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 1 กราฟแสดงการเจริญเติบโตของจุลชีพ (Baldet & Colas, 2012)

2.5 อากาศชื้น

อากาศแวดล้อมประกอบด้วยโมเลกุลแก๊สต่างๆและไอน้ำแสดงดังรูปที่ 2 โดยงานด้านการอบแห้งแก๊สต่าง ๆ ทั้งหมดหมายถึง อากาศแห้ง (dry air) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับไอน้ำในอากาศแวดล้อม โดยปริมาณไอน้ำสูงสุดในอากาศจะอยู่ในรูปสภาพอิ่มตัวซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นนั้นๆและไอน้ำส่วนเกินจะควบแน่นเป็นน้ำ เราสามารถทำให้ไอน้ำอิ่มตัวได้ด้วยการลดอุณหภูมิหรือเพิ่มปริมาณไอน้ำในอากาศนั้น



รูปที่ 2 องค์ประกอบของอากาศชั้น (เสริม จันทรฉาย, 2560)

2.5.1 ความดันไอน้ำ (Vapour pressure)

อากาศชั้นประกอบด้วยน้ำและแก๊สต่างๆ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบมีความดันย่อย (partial pressure) ในกรณีไอน้ำจะเรียกความดันย่อยนี้ว่า ความดันไอน้ำ เมื่อไอน้ำอิ่มตัวจะเรียกว่า ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapour pressure, P_{vs}) ซึ่งค่าความดันไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Barbosa-Cánovas et al., 2020)

2.5.2 ความดันไอน้ำอิ่มตัว (saturated vapour pressure)

ค่าความดันไอน้ำสูงสุดที่สามารถอยู่ในสถานะไอได้โดยไม่เกิดการควบแน่น ณ อุณหภูมิหนึ่ง หากมีการเพิ่มไอน้ำในบรรยากาศแวดล้อมไอน้ำส่วนเกินจะควบแน่นเป็นหยดน้ำ ซึ่งค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถหาได้จากสมการ (เสริม จันทรฉาย, 2560)

$$\ln(P_{vs}) = 24.2779 - \frac{6238.64}{T} - 0.344438 \ln(T) \quad (3)$$

; $233.16 \leq T \leq 273.16$

หรือ

$$\ln(P_{vs}) = \frac{-7511.52}{T} + 89.63121 + 0.023998970T - 1.1654551 \times 10^{-5} T^2 - 1.2810336 \times 10^{-8} T^3 + 2.0998405 \times 10^{-11} T^4 - 12.150799 \ln(T) \quad (4)$$

; $273.16 \leq T \leq 393.16$

เมื่อ P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัว (kPa)

T คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศชั้นเมื่อเริ่มอิ่มตัว (K)

2.5.3 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio)

อัตราส่วนของมวลไอน้ำในอากาศต่อมวลของอากาศแห้งซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$w = 0.62198 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (5)$$

เมื่อ	w	คือ อัตราส่วนความชื้น	(kg kg ⁻¹)
	P _v	คือ ความดันไอน้ำในอากาศชื้น	(kPa)
	P	คือ ความดันบรรยากาศ	(kPa)

2.5.4 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity)

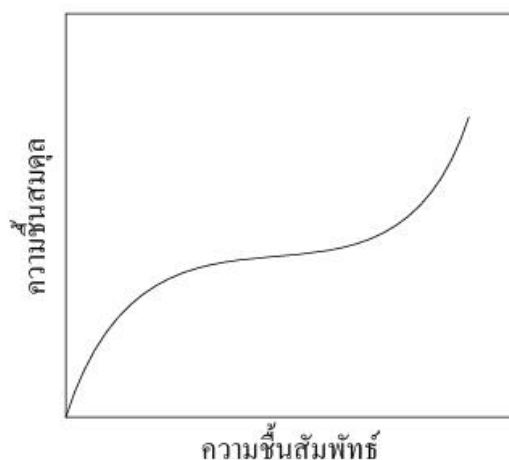
ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำและความดันไอน้ำอิ่มตัว เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการรับไอน้ำของอากาศชื้น

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (6)$$

เมื่อ	RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์	(%)
	P _v	คือ ความดันไอน้ำ	(kPa)
	P _{vs}	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว	(kPa)

2.6 ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)

วัสดุชิ้นจะมีการแลกเปลี่ยนความชื้นกับอากาศแวดล้อมอยู่เสมอจนกระทั่งความชื้นมีค่าคงที่หรืออยู่ในสภาวะสมดุลกับอากาศแวดล้อม เรียกว่าค่าความชื้นนี้ว่า ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) ซึ่งความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศกับความชื้นสมดุลเมื่ออุณหภูมิคงที่แสดงได้ดังรูปที่ 3 (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิคงที่

2.7 กระบวนการอบแห้ง (Drying process)

การอบแห้ง เป็นการลดปริมาณน้ำหรือความชื้นของวัสดุขึ้นโดยการทำให้ให้น้ำนั้นเปลี่ยนสถานะเป็นไอและระเหยออกมาโดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation) สำหรับการอบแห้งทางการเกษตรมักเป็นการอบแห้งโดยใช้การพาความร้อน (convection) เป็นหลัก โดยการลดลงของความชื้นเกิดเมื่อวัสดุขึ้นได้รับความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น น้ำบริเวณผิววัสดุจะระเหยเป็นไอออกมาเกิดการถ่ายเทมวลของน้ำบริเวณผิววัสดุกับอากาศแวดล้อมทำให้ความชื้นของวัสดุขึ้นลดลง โดยกระบวนการถ่ายเทมวลของน้ำจากวัสดุขึ้นไปยังอากาศแวดล้อมจะหยุดเมื่อความดันไอน้ำที่ผิววัสดุขึ้นเท่ากับความดันไอน้ำในอากาศแวดล้อม และการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในวัสดุสู่ผิววัสดุเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุนั้นๆ โดยการเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในสู่ผิวที่เกิดจากกระบวนการแพร่ (diffusion) การไหลในท่อขนาดเล็กในโครงสร้างวัสดุ (capillary flow) การไหลจากความดันออสโมติก (osmotic pressure) เป็นต้น

2.7.1 การถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น (Heat transfer)

การนำความร้อนเกิดจากการถ่ายเทพลังงานของโมเลกุลที่มีพลังงานสูงไปสู่โมเลกุลข้างเคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเกิดจากการถ่ายเทพลังงานของโมเลกุลที่มีพลังงานสูงไปสู่โมเลกุลข้างเคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า ในกรณีการถ่ายเทความร้อนอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) พบว่าอัตราการนำความร้อนจากผิวด้านหนึ่งไปยังอีกด้าน จะแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวทั้งสอง ($T_1 > T_2$) และพื้นที่ แต่จะแปรผกผันกับความหนาซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{\text{cond}} = -kA\left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (7)$$

$$Q_{\text{cond}} = h_{\text{cond}}(T_h - T_l) \quad (8)$$

เมื่อ	Q_{cond}	คือ อัตราการนำความร้อน	(Watt)
	A	คือ พื้นที่	(m^2)
	ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิ	(K)
	ΔX	คือ ความหนา	(m)
	K	คือ thermal conductivity	($Wm^{-1}K^{-1}$)
	T_h	คือ อุณหภูมิสูง	(K)
	T_l	คือ อุณหภูมิต่ำ	(K)
	h_{cond}	คือ conduction heat transfer coefficient	($Wm^{-2}K^{-1}$)

2. การพาความร้อน (Convection)

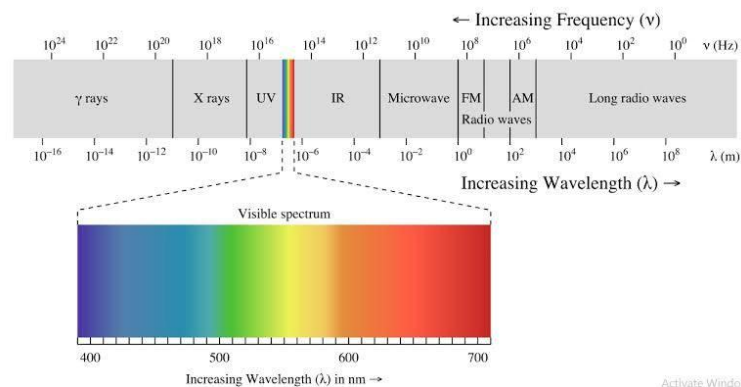
การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างของแข็งกับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านโดยการพาความร้อนแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1. การพาแบบอิสระ (free convection) เป็นการเคลื่อนที่ของของไหลที่เกิดจากแรงลอยตัวที่เป็นผลมาจากความต่างของอุณหภูมิในของไหล 2. การพาแบบบังคับ (force convection) คือ กรณีที่ของไหลเคลื่อนที่จากแรงภายนอก เช่น พัดลมหรือปั๊ม ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9

$$Q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}(T_s - T_a) \quad (9)$$

เมื่อ	Q_{conv}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน	(Wm^{-2})
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวของแข็ง	(K)
	T_a	คือ อุณหภูมิของไหล	(K)
	h_{conv}	คือ convection heat transfer coefficient	$(\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$

3. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ถ้ามีวัตถุอุณหภูมิสูงอยู่ในสุญญากาศวัตถุดังกล่าวจะสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังผนังตู้ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นต่างกับการนำความร้อนและการพาความร้อน เนื่องจากเกิดขึ้นในสภาวะสุญญากาศการถ่ายเทความร้อนนี้จึงเป็นการแผ่รังสี (เสริม จันทรฉาย, 2560) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ในสุญญากาศจากผิวร้อนหนึ่งไปยังอีกผิวหนึ่ง โดยแบ่งเป็นช่วงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงช่วงความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Comer & Harrower, 2013)

โดยสมการการแผ่รังสีความร้อนสำหรับการอบแห้งสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Q_{\text{rad}} = h_{\text{rad}}A(T_s - T_a) \quad (10)$$

เมื่อ	h_{rad}	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี	$(\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1})$
	A	คือ พื้นที่ผิว	(m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิพื้นผิว	(K)
	T_a	คือ อุณหภูมิแวดล้อม	(K)

2.7.2 ปริมาณความชื้นในวัสดุขึ้นและการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้ง

การบอกปริมาณความชื้นของวัสดุขึ้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

1. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content dry basis) ซึ่งแสดงถึงมวลของน้ำต่อมวลของแข็งที่อยู่ในวัสดุขึ้น ซึ่งแสดงดังสมการที่ 10

$$M_{d.b} = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ	$M_{d.b}$	คือความชื้นมาตรฐานแห้ง	(%)
	m_w	คือมวลน้ำในวัสดุ	(kg)
	m_s	คือมวลแห้งของวัสดุ	(kg)

2. ความชื้นมาตรฐานเปียก (Moisture content wet basis) ซึ่งแสดงถึงมวลของน้ำต่อมวลวัสดุขึ้น แสดงดังสมการที่ 11

$$M_{w.b} = \frac{m_w}{m_H} \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ	$M_{w.b}$	คือความชื้นมาตรฐานเปียก	(%)
	m_w	คือมวลของน้ำในวัสดุ	(kg)
	m_H	คือมวลวัสดุอบแห้ง	(kg)

การแสดงความชื้นของวัสดุสามารถแสดงได้ในรูปอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ซึ่งบอกถึงปริมาณความชื้นของวัสดุขึ้นที่นำมาอบแห้งที่เวลาใดๆ ต่อความชื้นเริ่มต้นของวัสดุอบแห้งโดยแสดงได้ดังสมการที่ 13-15

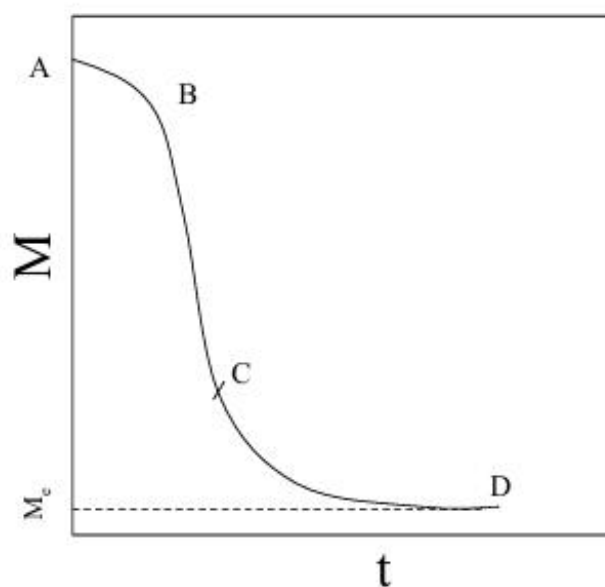
$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (13)$$

$$M_t = \frac{m_t - m_s}{m_t} \quad (14)$$

$$M_i = \frac{m_i - m_s}{m_i} \quad (15)$$

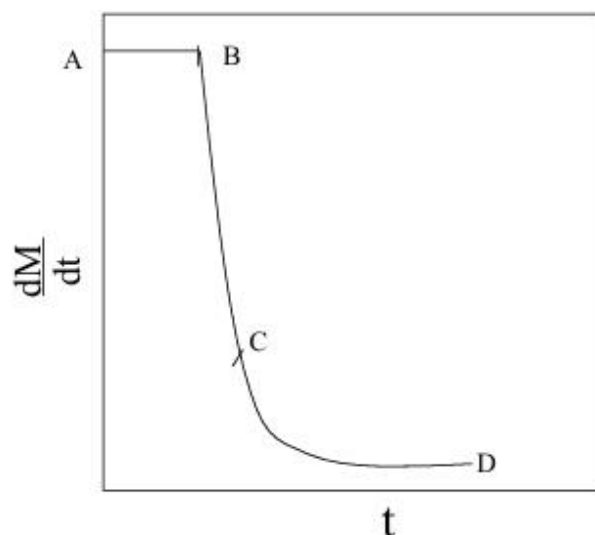
เมื่อ	M_i	คือความชื้นเริ่มต้นของมวลตัวอย่าง	(% w.b.)
	M_t	คือความชื้นของมวลตัวอย่างที่เวลาใดๆ	(% w.b.)
	M_{eq}	คือความชื้นสมดุลของมวลตัวอย่าง	(% w.b.)
	m_i	คือมวลเริ่มต้นของมวลตัวอย่าง	(kg)
	m_t	คือมวลตัวอย่างที่เวลาใดๆ	(kg)
	m_s	คือมวลแห้งของวัสดุ	(kg)
	MR	คืออัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio)	(-)

ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรการลดลงของความชื้นโดยทั่วไปจะมีลักษณะดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงถึงปริมาณความชื้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่า กราฟการแห้ง (drying curve)



รูปที่ 5 กราฟการแห้ง (drying curve) (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

หรือแสดงในรูปของกราฟอัตราการแห้ง (drying rate) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งกับเวลา (drying rate) (เสริม จันทน์ฉาย, 2560)

ซึ่งอัตราการแห้ง (drying rate) สามารถหาได้จากสมการ

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (16)$$

เมื่อ	M_t	คือ ความชื้นของมวลตัวอย่างที่เวลา t	(% w.b.)
	$M_{t+\Delta t}$	คือ ความชื้นของมวลตัวอย่างที่เวลา $t+\Delta t$	(% w.b.)
	Δt	คือ ระยะเวลาทำแห้ง	(min)
	DR	คือ อัตราการทำแห้ง (Drying rate)	($\text{kg kg}^{-1} \text{min}^{-1}$)

โดยทั่วไปอัตราการแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (constant-rate regime) ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้งและช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling-rate regime) ซึ่งเกิดในช่วงท้ายของการอบแห้งเนื่องจากช่วงนี้ปริมาณความชื้นมีปริมาณน้อย

ช่วงอัตราการแห้งคงที่การระเหยของน้ำมักเกิดที่บริเวณผิวผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเขียนอัตราการแห้งในช่วงเวลานี้ได้ดังสมการ

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_a - T_w) \quad (17)$$

เมื่อ	$\frac{dm_w}{dt}$	คือ อัตราการระเหยของน้ำ	(kg s ⁻¹)
	h_c	คือ สภานำความร้อน (thermal conductivity) ของฟิล์มอากาศบางล้อมรอบวัสดุ	(Wm ⁻² K ⁻¹)
	L	คือ ความร้อนแฝง (latent heat) ของการระเหยของน้ำ	(J kg ⁻¹)
	T_w	คือ อุณหภูมิผิววัสดุ	(K)
	T_a	คือ อุณหภูมิของอากาศ	(K)
	A	คือ พื้นที่ผิวของวัสดุ	(m ²)

สำหรับช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate regime) โดยทั่วไปสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (18)$$

เมื่อ	M_e	คือ ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content)	(% w.b.)
	M	คือ ความชื้นของวัสดุ	(% w.b.)
	k	คือ ค่าคงที่การอบแห้ง (drying constant)	(s ⁻¹)

2.8 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying)

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการแปลงพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปแบบความร้อน โดยพลังงานความร้อนจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการระเหยน้ำในวัสดุอบแห้งด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อน โดยการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมคือการนำวัสดุไปตากกลางแจ้งเพื่อให้เกิดกระบวนการระเหยของน้ำในวัสดุนั้นๆ แต่เนื่องจากการตากแห้งกลางแจ้งนั้นเสี่ยงต่อการได้รับความเสียหายจากแมลงต่างๆ เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นมา

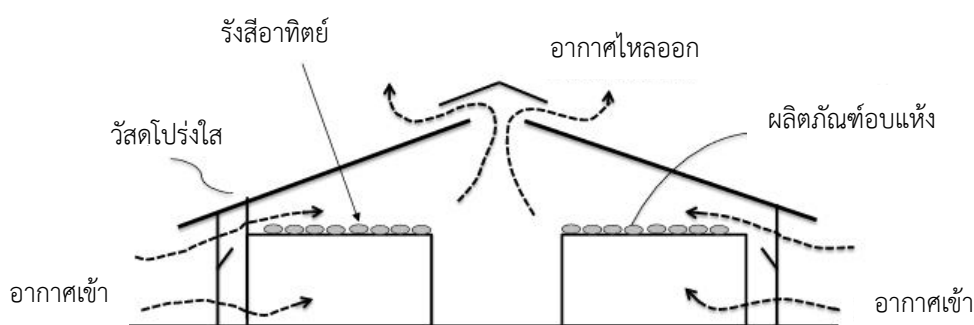
2.9 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนแบบการไหลตามธรรมชาติ (natural convection circulation) การทำงานของเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะอาศัยการลอยตัวของอากาศในการพาความร้อนเพื่อระเหยน้ำในผลิตภัณฑ์ และการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบบังคับการไหลของอากาศ (forced convection circulation) ซึ่งอาศัยแรงพัดจากพัดลมในการพาความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทตามวิธีรับรังสีอาทิตย์ได้ โดยสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ รับรังสีโดยตรง (direct) รับรังสีทางอ้อม (indirect) และแบบผสม (direct-indirect, hybrid)

2.9.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural convection solar dryer)

1. แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (direct)

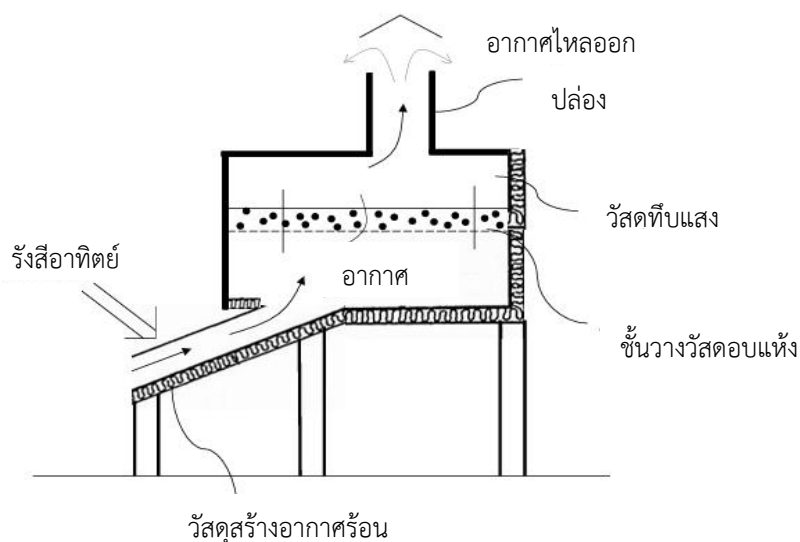
รังสีอาทิตย์จะตกกระทบวัสดุที่ต้องการอบแห้งโดยตรง ซึ่งรังสีจะส่งผ่านวัสดุโปร่งแสงมายังวัสดุ วัสดุโปร่งแสงสามารถใช้ได้ทั้งแผ่นพลาสติกใสหรือกระจกใส ซึ่งวัสดุโปร่งแสงดังกล่าวสามารถช่วยในการป้องกันแมลงและป้องกันการสูญเสียความร้อน น้ำที่ระเหยจากวัสดุอบแห้งจะถูกพาขึ้นด้านบน โดยการไหลของอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติ



รูปที่ 7 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง ดัดแปลงจาก (Ekechukwu & Norton, 1999)

2. เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีส่วนรับรังสีอาทิตย์ทำให้อากาศร้อนที่ได้จะลอยตัวและไหลผ่านวัสดุอบแห้งด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

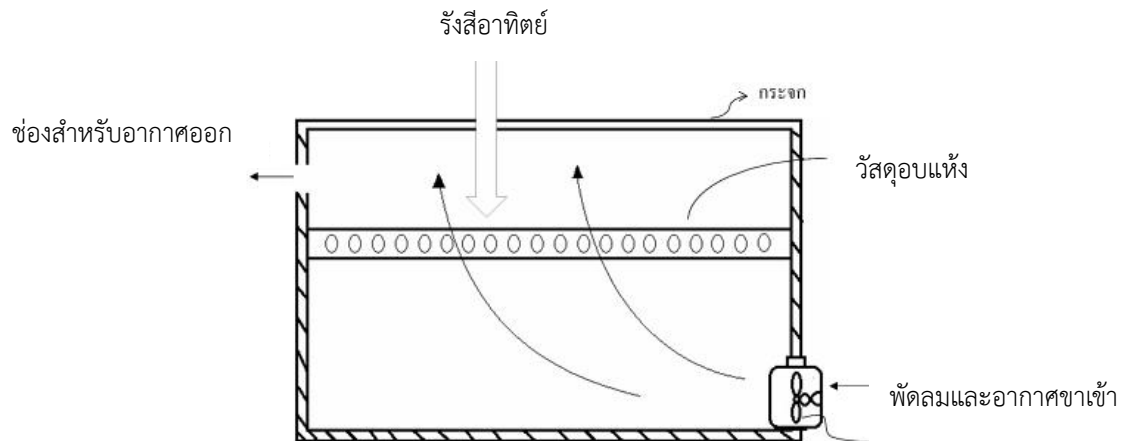


รูปที่ 8 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม ดัดแปลงจาก (Ekechukwu & Norton, 1999)

2.9.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาความร้อนโดยบังคับอากาศ (Forced convection solar dryer)

1. แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง (direct)

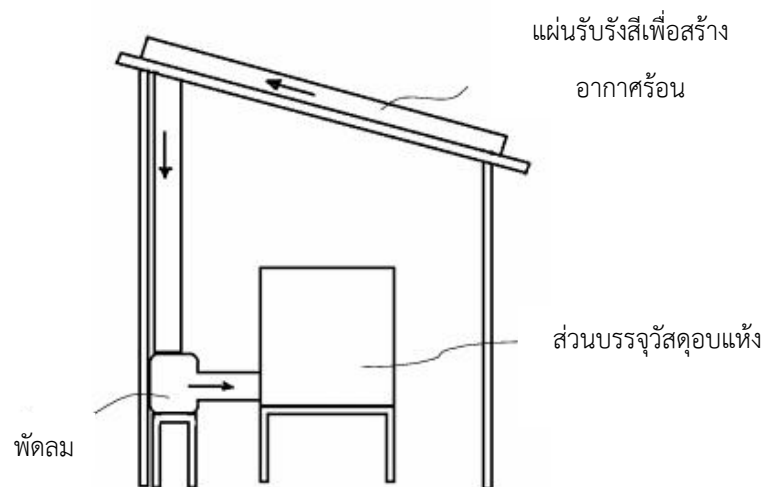
เครื่องอบแห้งประเภทนี้ วัสดุอบแห้งจะได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงและได้รับอากาศร้อนที่ถูกพัดลมบังคับให้เคลื่อนที่ผ่านวัสดุอบแห้ง ส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศมีมากขึ้นและสม่ำเสมอช่วยเร่งการพาความร้อนจากอากาศสู่วัสดุอบแห้งได้ดีขึ้น



รูปที่ 9 เครื่องอบแห้งแบบตู้ที่รับรังสีอาทิตย์โดยตรง (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

2. แบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อม (indirect)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมีส่วนรับรังสีอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่สร้างอากาศร้อนเพื่อให้
อากาศร้อนเคลื่อนที่ผ่านวัสดุอบแห้งด้วยพัดลม



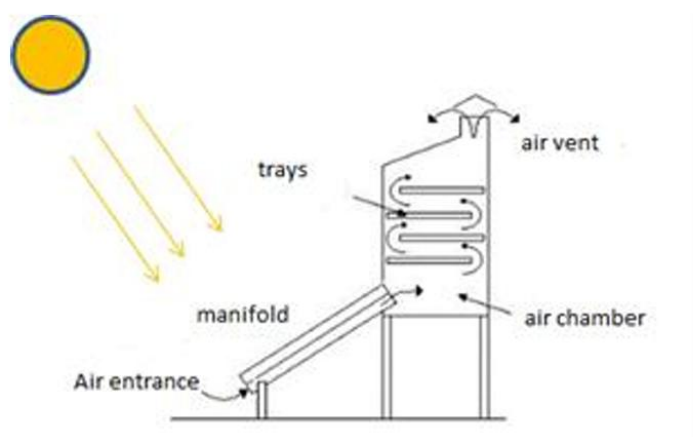
รูปที่ 10 เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์ทางอ้อมและใช้พัดลมสำหรับดูดอากาศ(เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

2.9.3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนแบบผสม

ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ แบบพาความร้อนตามธรรมชาติและพาความร้อนแบบบังคับ

1. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบผสม (mixed mode natural convection solar dryer)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะประกอบไปด้วยส่วนรับรังสีอาทิตย์และส่วนวางวัสดุอบแห้งที่มีวัสดุโปร่งใสคลุมอยู่ซึ่งทำให้วัสดุอบแห้งได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงด้วยเช่นกัน ซึ่งมีลักษณะดังรูป

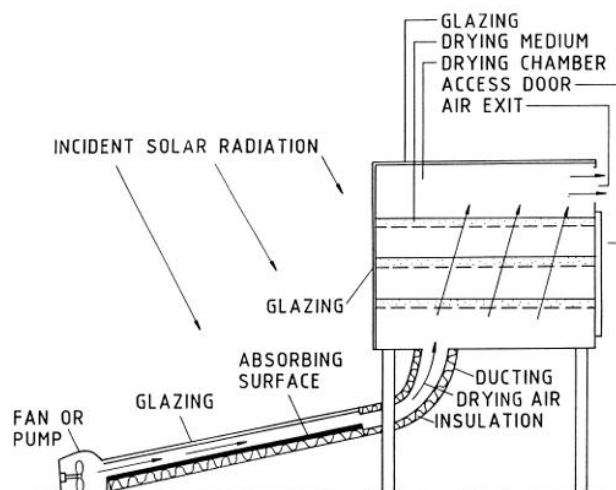


รูปที่ 11 องค์ประกอบเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนตามธรรมชาติแบบผสม (Cedeño et al.)



2. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทพาความร้อนโดยการบังคับแบบผสม
(mixed mode forced convection dryer)

เครื่องอบแห้งประเภทนี้จะมียังมีองค์ประกอบคล้ายกับแบบพาความร้อนตามธรรมชาติแบบผสม ต่างกันที่ประเภทนี้มีพัดลมสำหรับบังคับทิศทางการไหลของอากาศ ซึ่งมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 12 ตัวอย่างองค์ประกอบของเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนแบบบังคับแบบผสม
(Ekechukwu & Norton, 1999)

2.10 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาดอม (Parabola dome solar dryer)

เป็นเครื่องอบแห้งที่มีลักษณะเป็นรูปทรงพาราโบลาดอมโดยหลังคาทำจากแผ่นโพลีคาร์บอเนต (polycarbonate sheet) ภายในมีตะแกรงสำหรับวางวัสดุอบแห้ง ด้านหลังมีพัดลมดูดอากาศออกที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์และด้านหน้ามีช่องอากาศเข้า เมื่อเครื่องอบแห้งได้รับรังสีอาทิตย์ภายในห้องอบแห้งจะเกิดสภาวะเรือนกระจก (greenhouse) ทำให้มีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้น้ำในวัสดุระเหยและถูกระบายออกด้วยพัดลมดูดอากาศทำให้วัสดุแห้งเร็วกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ



รูปที่ 13 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม

โพลีคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมซึ่งแผ่นโพลีคาร์บอเนตเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีความแข็งแรงทนทานและโปร่งแสง นิยมใช้ในการทำเลนส์แว่นตา กระจกนิรภัย หน้ากากกันกระสุน ตัวอย่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตตันแสดงดังรูปที่ 14 แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบลูกฟูก หมายถึงแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่มีลักษณะเป็นชั้นบางหลายชั้นเรียงซ้อนกันดังรูปที่ 15 โดยโครงสร้างนี้ช่วยเสริมความแข็งแรง มีน้ำหนักเบาและสามารถทนต่อแรงที่มากระทำได้ดี ความโปร่งแสงทำให้อากาศส่องผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตเข้าไปในเครื่องอบแห้งได้ดีอีกทั้งยังมีความเป็นฉนวนความร้อนที่มีสภาพนำความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นสมบัติเชิงกลของโพลีคาร์บอเนตจะลดลงโดยเฉพาะ ค่าความเค้นคราก (yield stress), ค่าความเค้นดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) ซึ่งจะมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างพอลิเมอร์อ่อนตัวส่งผลให้วัสดุมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นแต่มีความแข็งแรงลดลง (van Houten, 1994)



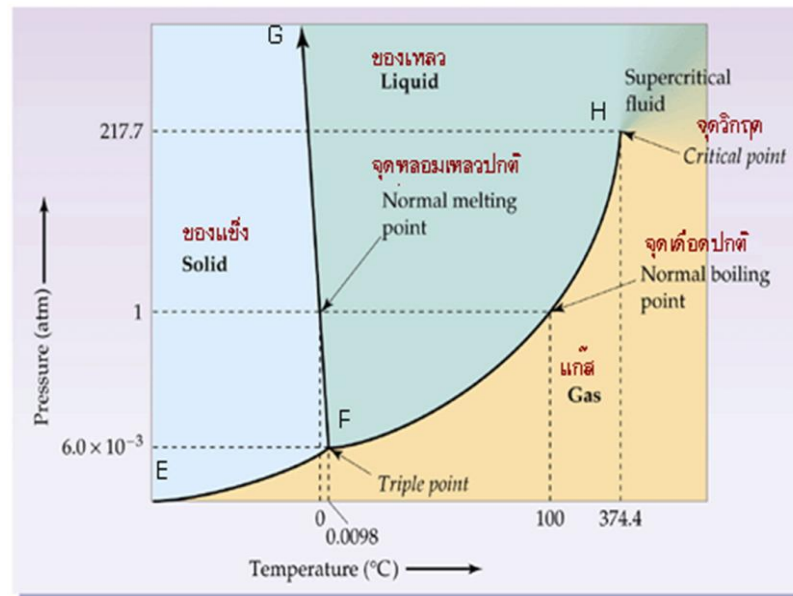
รูปที่ 14 แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบตัน (www.bing.com)



รูปที่ 15 แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบลูกฟูก (tse1.mm.bing.net)

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศและจุดเดือดของน้ำ

การประยุกต์ใช้ระบบสุญญากาศกับการอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการทำแห้งอาหาร เนื่องจากสภาวะสุญญากาศช่วยลดจุดเดือดของน้ำในวัสดุอบแห้ง ช่วยให้สามารถระเหยน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำและช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งส่งผลต่อการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดของน้ำกับความดันอากาศแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดเดือดและความดันอากาศ (il.mahidol.ac.th)

จากทฤษฎีแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas) เป็นแบบจำลองเพื่ออธิบายพฤติกรรมของแก๊สภายในสภาวะความดันอากาศและอุณหภูมิต่างๆ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแก๊สและความดันได้ดังสมการแก๊สในอุดมคติ (Ideal gas law) ดังนี้

$$PV = nRT \quad (19)$$

เมื่อ	P	คือ ความดันของแก๊ส	(Pa)
	V	คือ ปริมาตรของแก๊ส	(m ³)
	n	คือ จำนวนโมลของแก๊ส	(mol)
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส	8.314 (J mol ⁻¹ K ⁻¹)
	T	คือ อุณหภูมิ	(K)

2.12 ความดันและคุณสมบัติยืดหยุ่น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้พาราโบลาโดมที่ภายในมีความดันต่ำกว่าอากาศภายนอก ทำให้เกิดแรงกดต่อเครื่องอบแห้ง ดังนั้นโครงสร้างของเครื่องอบแห้งต้องมีความแข็งแรงเพื่อลดความเสียหายแก่เครื่องอบแห้ง การคำนวณแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต่างของความดันอากาศและความสามารถในการทนต่อแรงที่เกิดขึ้นของวัสดุเพื่อลดการเปลี่ยนรูปและความเสียหาย คำนวณได้ดังสมการที่ 20

$$\Delta P = \frac{F}{A} \quad (20)$$

เมื่อ ΔP คือ ความต่างของความดันอากาศ (Pa)

F คือ แรงเนื่องจากความดันอากาศ (N)

A คือ พื้นที่ผิว (m^2)

ความเค้น (Stress) คือ แรงที่กระทำกับวัตถุต่อพื้นที่

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (21)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (Nm^{-2})

ความเครียด (Stain) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือรูปร่างของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำหรือมีความเค้น

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (22)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียด (-)

มอดูลัสยัง (Young's Modulus) คือค่าที่แสดงถึงความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของวัสดุซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นต่อความเครียด

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (23)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้น (Stress) (Nm^{-2})

ε คือ ความเครียด (Stain) (-)

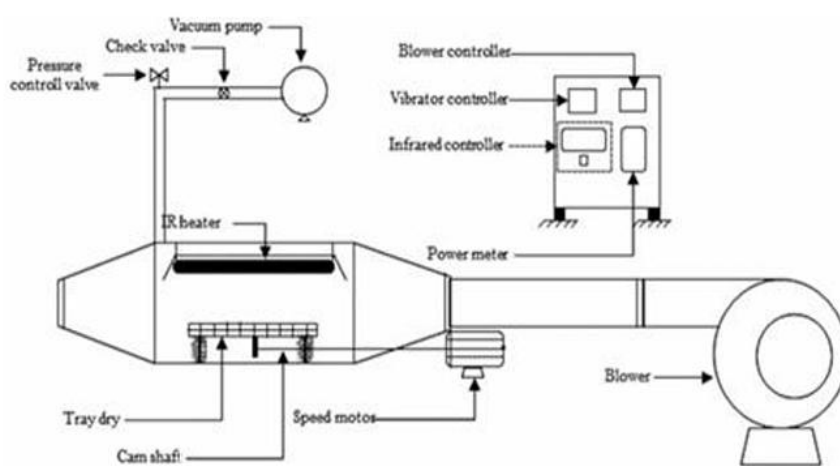
E คือ มอดูลัสยัง (Young's Modulus) (Nm^{-2})

ΔL คือ ความยาววัสดุที่เปลี่ยนไปเมื่อวัสดุเกิดความเครียด (m)

L_i คือ ความยาววัสดุเริ่มต้น (m)

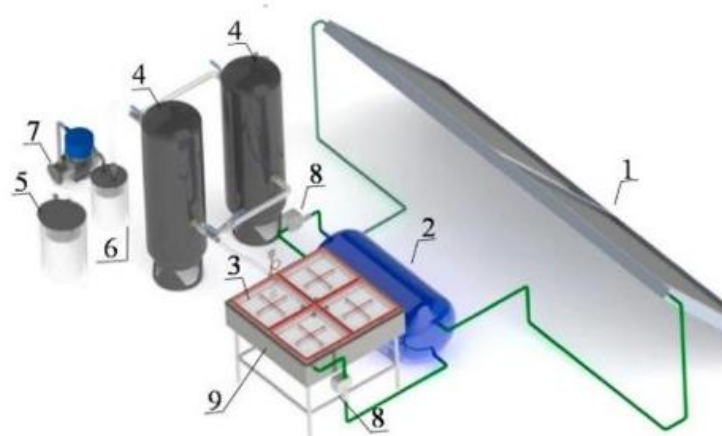
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Thanimkarn et al., 2019) ได้พัฒนาระบบอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรด (IR) อบแห้งเพชรสังฆาต(*Cissus quadrularis* Linn : CQ) ร่วมกับระบบอบแห้ง 4 แบบการทดลอง ได้แก่ การอบแห้งด้วยอินฟราเรด, การอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับระบบสั่นสะเทือน, การอบแห้งด้วยอินฟราเรดและระบบสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับระบบสั่นสะเทือนและระบบสุญญากาศ โดยมีวัตถุประสงค์คือศึกษาผลกระทบจากการอบแห้งจากทั้ง 4 ระบบ ซึ่งพบว่าการอบแห้งร่วมกับระบบสุญญากาศสามารถให้อัตราการแห้งได้สูงที่สุด (drying rate) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.258 \text{ g}_w/\text{g}_d \text{ min}$ ซึ่งการเพิ่มระบบสุญญากาศช่วยเพิ่มการแพร่กระจายความชื้น (effective moisture diffusivity) ซึ่งระบบอบแห้งแสดงดังรูป



รูปที่ 17 ระบบอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับระบบสุญญากาศ

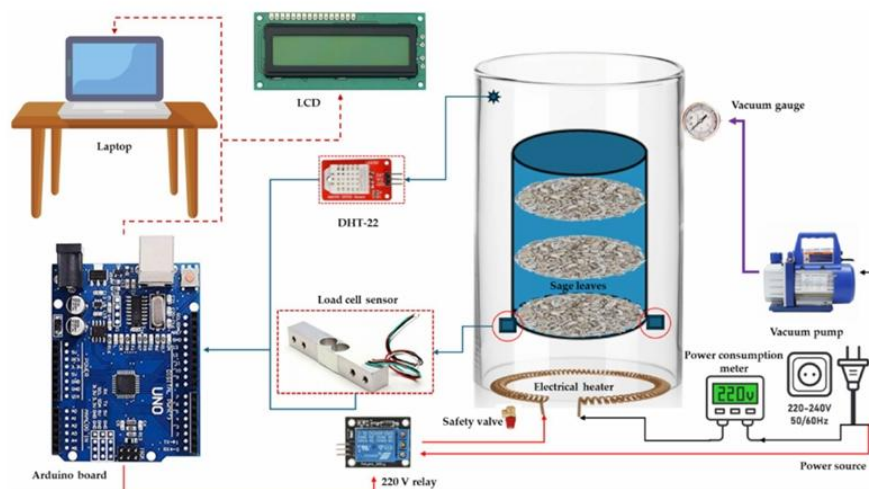
(Roratto et al., 2021) ได้ทำการศึกษาและสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดที่สุญญากาศ ซึ่งในงานนี้จะใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบทำความร้อนด้วยไฟฟ้าและระบบสุญญากาศ วัสดุอบแห้งที่จะคือกล้วยปลอกเปลือกหั่นหนาประมาณ 5 mm. เครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะต่อเข้ากับถังเก็บน้ำที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนและหุ้มด้วยฉนวนความร้อนซึ่งจะให้ความร้อนแก่น้ำจนน้ำมีอุณหภูมิ 90 °C เพื่อให้น้ำร้อนถ่ายเทความร้อนให้แก่ห้องอบแห้ง ระบบสุญญากาศต่อเข้ากับห้องอบแห้งเพื่อลดความดันอากาศให้เหลือ 4 kpa โดยใช้ปั๊มสุญญากาศและคอนเดนเซอร์ เพื่อให้จุดเดือดของน้ำในห้องอบแห้งและอ่างน้ำต่ำลง มีระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อให้ น้ำที่อุณหภูมิต่ำไปรับพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งผลที่ได้กล้วยสามารถแห้งและกรอบได้ภายในเวลา 3-4 ชั่วโมง



รูปที่ 18 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด

- (1) เครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, (2) ถังเก็บน้ำทำความร้อนไฟฟ้า, (3) ห้องอบแห้ง, (4) ถังสุญญากาศ, (5)คอนเดนเซอร์, (6) Air drying unit, (7) ปั๊มสุญญากาศ, (8) ปั๊มหมุนเวียนน้ำ, (9) อ่างฉนวนความร้อน

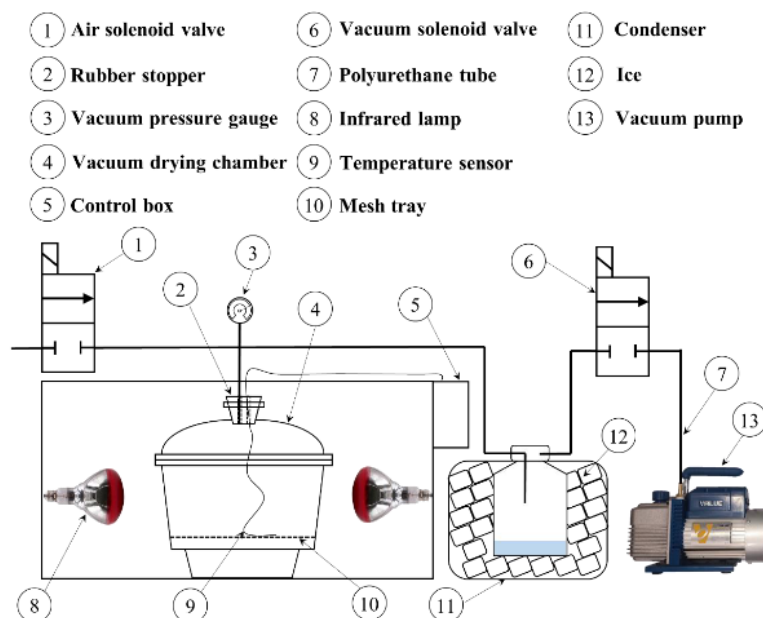
(Mansour et al., 2025) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งสุญญากาศของใบเสจที่ความดัน -5 kpa และ -10 kpa โดยอุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 40°C 50°C และ 60°C โดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ภายในเครื่องอบแห้งติดตั้งระบบวัดอุณหภูมิ ความชื้นและเซนเซอร์ซึ่งน้ำหนัก พบว่าอุณหภูมิและความดันมีผลโดยตรงต่อการอบแห้ง การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ที่ความดันอากาศ -10kpa ใช้ระยะเวลาอบแห้งน้อยที่สุดโดยใช้เวลาอบแห้ง 90 นาที ที่ความดัน -5 kpa ใช้เวลาอบแห้ง 120 นาที และที่ความดันบรรยากาศใช้เวลาอบแห้ง 240 นาที



รูปที่ 19 ระบบอบแห้งความดันต่ำอัตโนมัติโดยใช้ความร้อนจากพลังงานไฟฟ้า



(Chayaprasert et al., 2024) ได้พัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุนต่ำซึ่งแสดงดังรูปที่ 20 โดยการทดลองใช้ตะไคร้หั่นแฉลบเป็นวัสดุทดลองอบแห้ง โดยปรับสัดส่วนระยะเวลาการรักษาความดันสุญญากาศต่อระยะเวลาการคงความดันบรรยากาศเป็น 8 นาทีต่อ 4 นาที, 13 นาทีต่อ 4 นาที และ 18 นาทีต่อ 4 นาที ผลการวิจัยพบว่าสัดส่วน 8 นาทีต่อ 4 นาทีให้ผลดีที่สุด โดยสามารถลดความชื้นของตะไคร้จากประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์เหลือต่ำกว่า 11 % dry basis ภายในเวลาเพียง 180 นาที โดยกล่าวได้ว่าระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดดังกล่าวสามารถลดเวลาและพลังงานในการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ เหมาะสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนหรือชุมชน



รูปที่ 20 แผนภาพโครงสร้างและองค์ประกอบของระบบอบแห้งแบบ Pulsed vacuum infrared

(Vega-Gálvez et al., 2022) ได้ศึกษาการอบแห้งมะละกอดด้วยวิธีการอบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Vacuum Drying) ภายใต้ความดันอากาศคงที่ 1 kPa ที่อุณหภูมิต่ำ 10, 20, 30 และ 40°C เพื่อเปรียบเทียบผลการอบแห้ง คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเคมีของผลิตภัณฑ์ ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิต่ำช่วยรักษาสีและลดการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ได้ดี รวมทั้งคงไว้ซึ่งสารสำคัญทางชีวภาพ เช่น ฟีนอล ฟลาโวนอยด์ เบต้าแคโรทีน และวิตามินซี ได้มากกว่าวิธีอบแห้งทั่วไป แสดงให้เห็นว่าการอบแห้งสุญญากาศที่อุณหภูมิต่ำเป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน

(Barzee et al., 2021) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งละอองเกสรผึ้งด้วยวิธีลมร้อน (Hot Air Drying) และวิธีสุญญากาศ (Vacuum Drying) เพื่อศึกษาผลของออกซิเจนและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการอบแห้ง องค์ประกอบสารเคมี การเกิดสีน้ำตาล และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของละอองเกสรผึ้ง ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งแบบสุญญากาศสามารถลดเวลาในการอบได้มากกว่าเนื่องจากจุดเดือดของน้ำลดลงและความแตกต่างของความดันช่วยเร่งการระเหยของความชื้น อีกทั้งยังช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนสีน้อยและคงสารประกอบฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่า ขณะที่การอบด้วยลมร้อนซึ่งมีออกซิเจนมากกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและการเสื่อมสลายของสารสำคัญมากกว่า งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพและลดการเสื่อมของผลิตภัณฑ์จากความชื้นและออกซิเดชันได้อย่างมีนัยสำคัญ

(Le et al., 2025) ได้ศึกษาผลของการอบแห้งเนื้อข้าวโอ๊ต ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตนมข้าวโอ๊ต โดยเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot Air Drying: HAD) และการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Vacuum Drying: VD) ที่ความดัน 450 mmHg และอุณหภูมิ 70, 90 และ 110 °C โดยใช้ความหนาของชั้นเนื้อข้าวโอ๊ต 0.5 – 1.0 เซนติเมตร เพื่อประเมินอัตราการอบแห้ง คุณภาพทางกายภาพและเคมี ผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและชั้นตัวอย่างบางลง จะช่วยให้ระยะเวลาอบแห้งลดลงอย่างชัดเจน ที่อุณหภูมิเท่ากับ 110 °C ใช้เวลาเพียง 150 นาที สำหรับการอบลมร้อน และ 180 นาที สำหรับการอบในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งการอบแบบสุญญากาศแม้ใช้เวลา นานกว่า แต่ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้รักษาสารฟีนอลิกและสารต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่า ขณะที่การอบลมร้อนให้ประสิทธิภาพการกระจายความชื้นสูงกว่า หลังการอบทั้งสองวิธีได้ผลิตภัณฑ์ที่มี ค่า aw ประมาณ 0.33–0.35 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษาและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การอบลมร้อนที่ 110 °C เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง หรือการอบสุญญากาศที่ความดัน 450 mmHg เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดความชื้นรักษาคุณภาพของสารสำคัญและเพิ่มเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์เนื้อข้าวโอ๊ตแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวเป็นการอบแห้งที่สภาวะสุญญากาศโดยใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าซึ่งใช้พลังงานสูงในการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของความดันอากาศต่อการอบแห้งของผลิตภัณฑ์โดยสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมทำงานร่วมกับระบบสุญญากาศ ซึ่งในงานนี้แหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบความดันอากาศแต่สำหรับระบบทำความร้อนของการอบแห้งจะมาจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ช่วยประหยัดพลังงานในการสร้างความร้อนแก่ระบบอบแห้ง แต่การลดความดันอากาศในเครื่องอบแห้งจะส่งผลให้เกิดแรงกระทำต่อแผ่นโพลีคาร์บอเนตเนื่องมาจากผลต่างความดันอากาศ เพื่อป้องกันความเสียหายจากแรงกดอากาศ ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Solidwork 2022 จำลองความแข็งแรงของเครื่องอบแห้งภายใต้สภาวะเป็นสุญญากาศก่อนสร้างเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมขนาดเล็กเพื่ออบแห้งจริง



บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย

3.1 การทดลองผลกระทบความดันอากาศต่อการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ในขั้นตอนงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมและระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำโดยใช้หม้อความดันต่ำ เพื่อเปรียบเทียบความชื้นสุดท้ายและอัตราการลดลงของความชื้นแต่ละระบบ โดยทดสอบอบแห้งกล้วยและไพลเป็นเวลา 3 วัน

3.1.1 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม

การอบแห้งกล้วยและไพลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เครื่องอบแห้งพาราโบลาโดม แสดงดังรูปที่ 21 โดยมีหลังคาโค้งรูปทรงพาราโบลาทำด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate sheet) ภายในมีชั้นวางวัสดุที่ต้องการอบแห้ง ด้านหน้ามีช่องสำหรับอากาศเข้า ด้านหลังมีพัดลมดูดอากาศทำหน้าที่ดูดความชื้นและอากาศออก โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ เมื่อเครื่องอบแห้งได้รับรังสีอาทิตย์ภายในเครื่องอบแห้งจะเกิดปรากฏการณ์ลักษณะเรือนกระจก ส่งผลให้ภายในเครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิสูง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมขนาดเล็กซึ่งมีขนาดกว้าง 1.5 เมตร ยาว 2 เมตร โดยแสดงดังรูปที่ 21 และติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ Temperature and Relative Humidity Sensor E+E โดยบันทึกค่าที่วัดได้ใน data logger Yokogawa DC100 series



รูปที่ 21 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา



រូបថត 22 data logger Yokogawa DC100 series



រូបថត 23 Temperature and Relative Humidity Sensor E+E

3.1.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ

การอบแห้งระบบนี้ประกอบไปด้วยระบบอบแห้งและระบบทำสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 24 ผู้วิจัยทำการอบแห้งกล้วยและไพลด้วยหม้อดูดความชื้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ต่อเข้ากับชุดวัดความดันแมนนิโฟลด์เกจ (Manifold Gauge) ต่อชุดแมนนิโฟลด์เกจเข้ากับเครื่องปั๊มสุญญากาศประเภทโรตารี (Rotary Vane Vacuum Pump) DSZH รุ่น 115 ใช้กระแสไฟฟ้า 220V-240V/50HZ มอเตอร์ 1/4 HP สามารถดูดอากาศ 72 ลิตรต่อนาที และใช้ Digital Thermo-Hygrometer สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในหม้อดูดความชื้น



รูปที่ 24 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ



รูปที่ 25 Digital Thermo-Hygrometer

3.1.3 การทดสอบการอบแห้งด้วยระบบความดันต่ำโดยใช้หม้อดูดความชื้น

ผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งกล้วยและไพลเพื่อทดสอบผลกระทบของความดันอากาศต่อการอบแห้งโดยใช้วัสดุอบแห้งเป็นกล้วยและไพล

1. ปลอกเปลือกกล้วยน้ำว้าและหั่นไพลเป็นชิ้นบางนำวัสดุอบแห้งทั้งสองไปชั่งมวล เลือกมวลตัวอย่างสำหรับการอบแห้งในแต่ละเครื่องโดยให้มวลตัวอย่างแต่ละชนิดมีมวลใกล้เคียงกัน

2. นำวัสดุอบแห้งและมวลตัวอย่างแต่ละชนิดใส่เครื่องอบแห้งทั้งสองชนิด ต่อแมนนิโฟลด์เกจ (Manifold Gauge) เข้ากับหม้อดูดความชื้นและปั๊มสุญญากาศสำหรับลดความดันภายในหม้อดูดความชื้น

3. เริ่มการอบแห้งเวลา 9:00 น. โดยเปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อลดความดันอากาศในหม้อดูดความชื้น 0.6 bar รักษาความดันอากาศภายในให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นปิดระบบสุญญากาศเพื่อนำมวลตัวอย่างทั้งสองระบบออกมาชั่งมวลตัวอย่างพร้อมจดบันทึก

4. เริ่มกระบวนการอบแห้งใหม่อีกครั้งเป็นเวลา 3 วันหรือจนกว่ามวลจะแห้ง

5. นำมวลตัวอย่างมาอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้งของมวลตัวอย่างและความชื้นสุดท้ายของมวลตัวอย่าง



รูปที่ 26 มวลตัวอย่างในการอบแห้ง



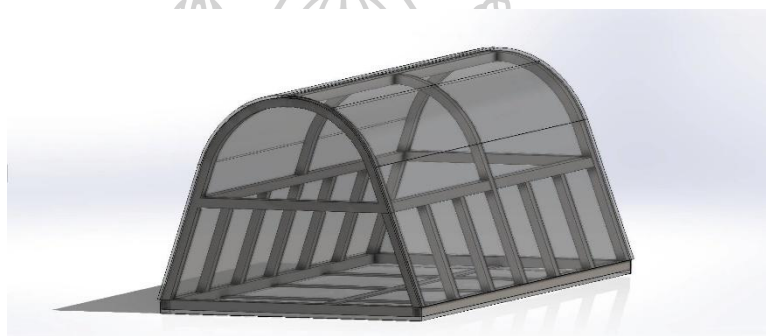
รูปที่ 27 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาและหม้อดูดความชื้นความดันต่ำ



รูปที่ 28 ตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 °C

3.2 การออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสำหรับใช้ในการอบแห้งที่ความดันต่ำ โดยใช้โปรแกรม Solidwork 2022 ในการออกแบบและจำลองแบบ (Simulation) ผลที่เกิดขึ้นต่อเครื่องอบแห้งเนื่องจากแรงกระทำต่อผนังเครื่องอบแห้งที่เกิดจากผลต่างของความดันอากาศภายในเครื่องอบแห้งและความดันอากาศภายนอกเครื่องอบแห้ง ก่อหน้าไปสร้างเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งในขั้นตอนต่อไป สำหรับโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง ผู้วิจัยเลือกใช้เหล็กกล่องขนาด 2 cm x 2 cm เป็นโครงและฐานของเครื่องอบแห้ง ขนาดของเครื่องอบแห้งคือด้านหน้ากว้าง 60 cm ยาว 100 cm สูง 45 cm และคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบลูกฟูกหนา 6 mm และสำหรับฐานล่างใช้ 8 mm แสดงรูปที่ 29



รูปที่ 29 แบบเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาสำหรับความดันต่ำ

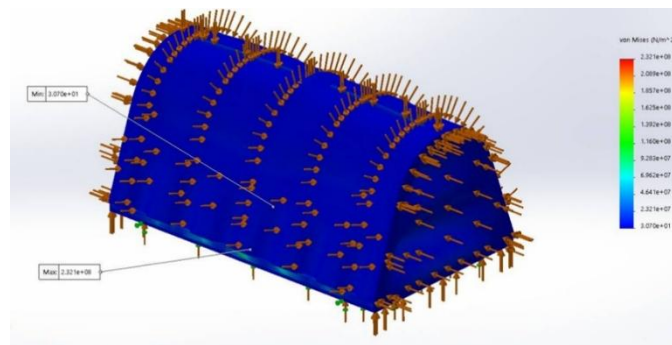
3.2.1 เงื่อนไขแบบจำลอง (simulation conditions)

เมื่อได้แบบของเครื่องอบแห้ง ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแบบเครื่องอบแห้งที่ได้รับแรงดันกระทำจากภายนอกเพื่อตรวจสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อเครื่องอบแห้งโดยมีเงื่อนไขดังนี้

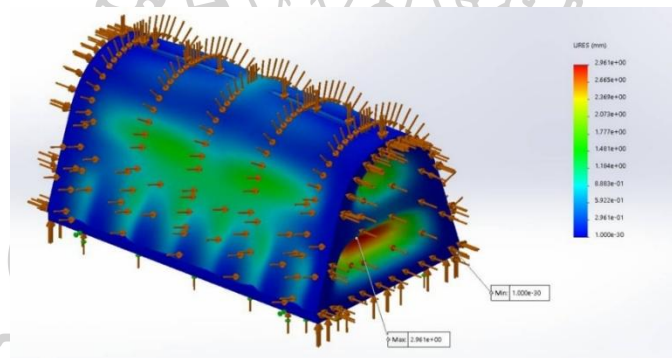
- เลือกจุดยึด (Fixed point) บริเวณขอบฐาน
- ผลต่างของความดันระหว่างภายในเครื่องอบแห้งและภายนอก เท่ากับ 40,000 Pa (0.4 bar)
- ขนาดของแรงดันเท่ากันทุกทิศทาง
- กำหนดขนาด Mesh มีขนาด 0.82-2.47 cm

3.2.2 ผลของแบบจำลอง

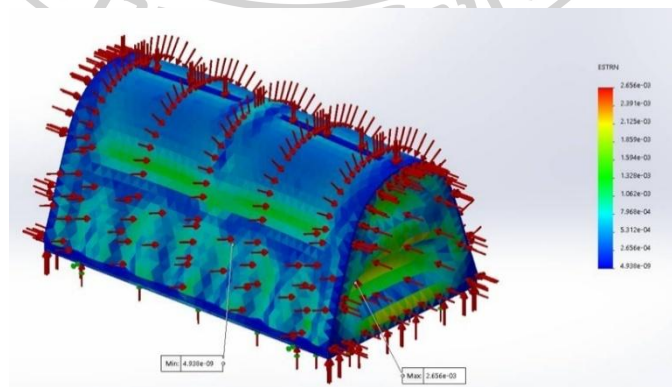
ผู้วิจัยได้นำแบบเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาสำหรับความดันต่ำไปทำการจำลองผลที่เกิดต่อเครื่องอบแห้งตามเงื่อนไขแบบจำลองซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 30



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 30 การจำลองความดันที่กระทำต่อพาราโบลาโดม (a) stress (b) displacement (c) strain

ผลของการจำลองพบว่าเกิดแรงกระทำจากภายนอกเนื่องจากผลต่างของความดันอากาศ $40,000 \text{ N/m}^2$ โดยตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงจะอยู่บริเวณโครงสร้างรับแรงและจุดยึด ค่าเฉลี่ยของความเค้นบริเวณผิวโค้งมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุโพลีคาร์บอเนตที่อยู่ในช่วง 60–70 MPa (Bendler, 1999) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic region) และไม่เกิดการเสีรูปลถวร ผลการกระจายของความเครียด (strain distribution) พบว่ามีค่าความเครียดสูงสุดเพียง 2.65×10^{-3} หรือประมาณ 0.27 % ซึ่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความสามารถในการยืดตัวของโพลีคาร์บอเนต ขณะที่ผลการกระจัดหรือการยุบตัวของแผ่นโพลีคาร์บอเนต (displacement) แสดงให้เห็นว่าเครื่องอบแห้งมีการโก่งตัวสูงสุดเพียง 2.96 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย โดยรวมจึงสรุปได้ว่าพาราโบล่าโดมสามารถรับแรงดันภายนอกได้โดยไม่เกิดการเสีรูปลถวรและรูปทรงโค้งของโดมช่วยกระจายแรงอัดที่กระทำจากภายนอกให้ลดลงทั่วทั้งพื้นผิวส่งผลให้โครงสร้างยังคงอยู่ในสภาวะสมดุลและปลอดภัยต่อการใช้งานภายใต้สภาวะแรงดันต่ำ



3.3 การสร้างเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสำหรับอบแห้งความดันต่ำ

จากการจำลองแบบเครื่องอบแห้งภายในสถานะแรงดันต่ำพบว่าเกิดการยุบตัวของแผ่นโพลีคาร์บอเนตบริเวณด้านข้างของเครื่องอบแห้ง ผู้วิจัยจึงทำการเสริมโครงเหล็กบริเวณด้านข้างในแนวตั้งเพื่อรองรับแผ่นโพลีคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 โครงเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งความดันต่ำ

ผู้วิจัยได้ใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตแบบลูกฟูกความหนา 6 mm และ 8 mm สำหรับส่วนฐานของเครื่องอบแห้งโดยผู้วิจัยได้ใช้กาวซิลิโคนแบบไร้กรดเพื่อปิดช่องว่างและรอยต่อด้านในของเครื่องอบแห้งเพื่อป้องกันการรั่วซึมของอากาศรวมทั้งใช้เทปกาวปิดตามรอยต่อด้านนอกระหว่างแผ่นโพลีคาร์บอเนตอีกชั้นจากนั้นนำไปทดสอบการรั่วซึมของอากาศซึ่งแสดงดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 เครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งที่ความดันต่ำ

3.3.1 ทดสอบการรั่วของอากาศเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาสำหรับอบแห้งความดันต่ำ

ในการทดสอบการรั่วของอากาศจากภายนอกสู่ภายในเครื่องอบแห้งผู้วิจัยได้ทำการเจาะแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านหน้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm ต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศเพื่อทดสอบการรั่วของอากาศ เมื่อปั๊มสุญญากาศทำงานความดันภายในเครื่องอบแห้งจะลดลง หากเกิดการรั่วของอากาศที่ทำให้อากาศด้านนอกสามารถเข้าไปด้านในห้องอบแห้งได้จะทำให้ไม่สามารถลดความดันอากาศภายในห้องอบแห้งได้ เพื่อหาจุดรั่วของอากาศผู้วิจัยจึงทำการทดสอบหาตำแหน่งที่เกิดการรั่วของอากาศด้วยการใช้น้ำและเครื่องเป่าลม ผู้วิจัยนำเครื่องอบแห้งวางในอ่างใส่น้ำและอัดอากาศเข้าไปในเครื่องอบแห้งเพื่อหาตำแหน่งฟองอากาศที่เกิดขึ้น บริเวณที่เกิดฟองอากาศแสดงถึงตำแหน่งรั่วของอากาศที่ทำให้ปั๊มไม่สามารถลดความดันภายในห้องอบแห้งได้ เมื่อทราบตำแหน่งรั่วแล้วจึงนำเทปปิดรอยนั้นอีกครั้ง



รูปที่ 33 ทดสอบการรั่วซึมของอากาศของโคมอบแห้ง

หลังจากดำเนินการอุดรอยรั่วเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำเครื่องอบแห้งนี้ไปทดสอบลดความดันอากาศภายในอีกครั้ง พบว่าขณะดูดอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ ความดันภายในเครื่องอบแห้งมีอัตราการลดลงของความดันอากาศช้าโดยใช้เวลาราว 15 นาที สำหรับการลดความดันอากาศลงเพียง -0.05 bar และพบว่าเครื่องอบแห้งมีการบีบตัวเนื่องจากผลต่างของความดันอากาศภายในและภายนอก การบีบตัวอาจทำให้เกิดรอยรั่วเพิ่มเติมได้ขณะทำการอบแห้งจริง เพื่อป้องกันการรั่วของอากาศขณะอบแห้งผู้วิจัยจึงใช้ถุงพลาสติกใสประเภท PE ขนาด 50 inch x 70 inch สวมโคมเพื่อป้องกันการรั่วของอากาศขณะอบแห้งอีกหนึ่งชั้น จากนั้นทำการลดความดันอากาศภายในเครื่องอีก

ครั้งพบว่าสามารถลดความดันอากาศลงได้โดยใช้เวลาประมาณ 3 นาทีและความดันอากาศภายในติดลบมากที่สุดเท่ากับ -0.10 bar ซึ่งหากลดความดันอากาศต่ำกว่านี้อาจเกิดการเสียหายต่อแผ่นโพลีคาร์บอเนตได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายและการรั่วของอากาศขณะอบแห้งผู้วิจัยจึงใช้พลาสติกใสสวมเครื่องอบแห้งความดันต่ำขณะอบแห้งที่ความดันอากาศ -0.07 bar และทำการเจาะด้านหน้าสำหรับเป็นช่องใส่วัสดุอบแห้งขนาด $35 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$



รูปที่ 34 ทดสอบการลดความดันอากาศภายในโคมอบแห้ง

3.3.2 ระบบสุญญากาศที่ใช้สำหรับการอบแห้ง

ระบบสุญญากาศที่ใช้ออบแห้งประกอบด้วย

1. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump DSZH 115)
 2. แมนนิโฟลด์
 3. เซนเซอร์วัดความดันอากาศ (Panasonic digital pressure sensor model DP-100 series)
 4. บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3)
 5. ตัวควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ (Relay module)
 6. power supply สำหรับจ่ายไฟให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และ DP-100
- อุปกรณ์ในระบบควบคุมความดัน



รูปที่ 35 ป้มสุญญากาศ (vacuum pump DSZH 115) (www.bing.com)



รูปที่ 36 เซนเซอร์วัดความดันอากาศ (Panasonic digital pressure sensor model DP-100 series)

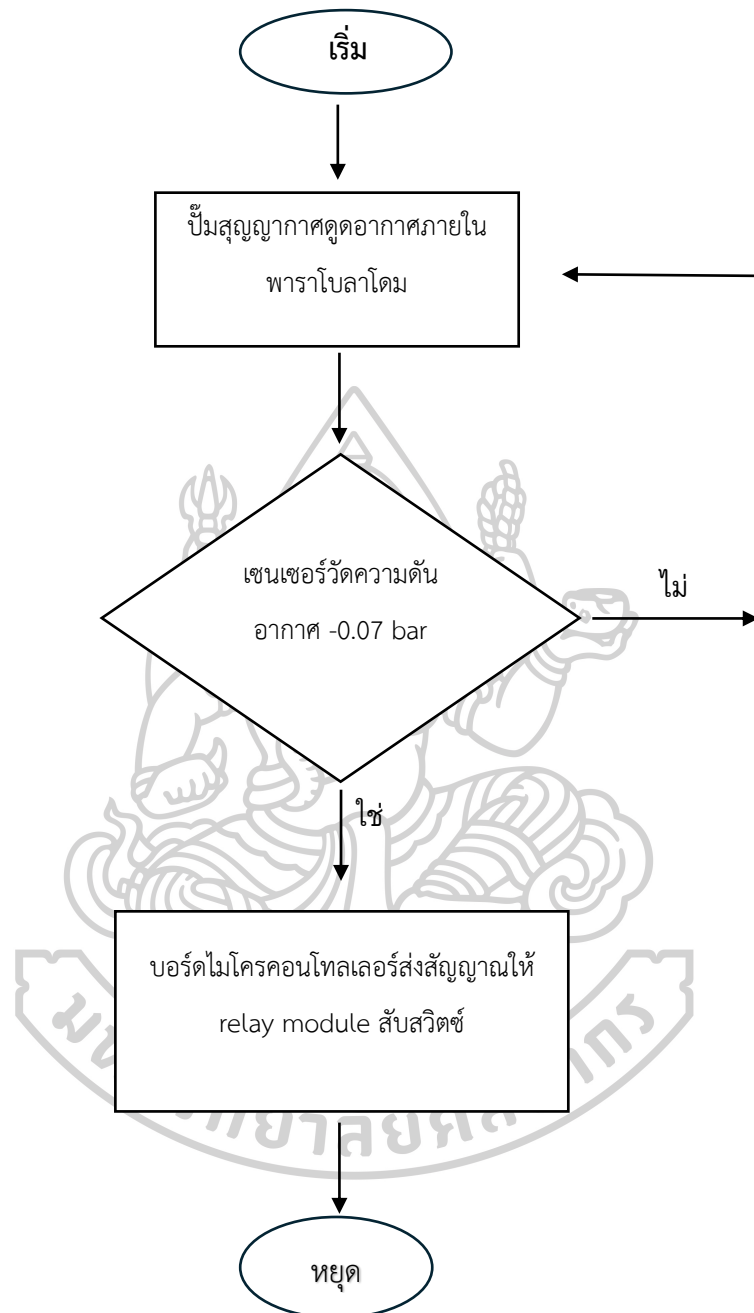


รูปที่ 37 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Uno R3) (tse2.mm.bing.net)



รูปที่ 38 Relay module (tse1.mm.bing.net)

3.3.3 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมความดัน



รูปที่ 39 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมความดัน

ระบบนี้จะทำงานโดยเริ่มจากปั๊มสุญญากาศดูดอากาศออกจากเครื่องอบแห้งซึ่งมีเซนเซอร์วัดความดันอากาศที่ติดอยู่กับเครื่องอบแห้งดังรูปที่ 40 แสดงค่าความดันอากาศภายในโดมอบแห้ง โดยเซนเซอร์จะส่งสัญญาณ output ที่วัดได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดเมื่อค่าความดันอากาศเท่ากับ -0.07 bar ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดจะทำการส่งสัญญาณไปยัง relay module เพื่อสับสวิทช์ส่งผลให้ปั๊มหยุดทำงานและเมื่อความดันอากาศเพิ่มขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดจะส่งสัญญาณไปยัง relay module ให้สับสวิทช์อีกครั้งเพื่อเปิดปั๊มสุญญากาศ



รูปที่ 40 ตำแหน่งเซนเซอร์วัดความดันอากาศภายในห้องอบแห้งและสายต่อปั๊มดูดอากาศในห้องอบแห้ง

หลังจากติดตั้งระบบควบคุมความดันอากาศเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยต้องการทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ซึ่งจะทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในระบบอบแห้งที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งแบบพาราโบลาตั้งเดิม

3.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าและบันทึกผล

ผู้วิจัยใช้ Temperature and Relative Humidity Sensor E+E สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาและเครื่องอบแห้งความดันต่ำ Pryano meter model CMP11 สำหรับความเข้มรังสีอาทิตย์ขณะอบแห้ง โดยข้อมูลดังกล่าวถูกบันทึกไว้ที่ data logger FX1000 series



(a)



(b)

รูปที่ 41 ตำแหน่งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ (a) สำหรับพาราโบลาโดม
(b) สำหรับพาราโบลาโดมความดันต่ำ



รูปที่ 42 data logger Yokogawa FX1000 series

3.5 ขั้นตอนการอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้กล้วยน้ำว้าสุกทั้งหมดจำนวน 5 กิโลกรัม สำหรับอบแห้งทั้ง 3 แบบ ได้แก่ การตากแห้งตามธรรมชาติ การอบแห้งพาราโบลาโดมและการอบแห้งความดันต่ำ โดยพาราโบลาโดมสำหรับความดันบรรยากาศที่ใช้มีขนาด 100 cm x 120 cm สูง 35 cm ด้านหน้ามีช่องสำหรับอากาศเข้า ขนาด 20 cm x 3.5 cm จำนวน 2 ช่องและด้านหลังมีพัดลมระบายอากาศสำหรับระบายความชื้น ซึ่งในกระบวนการอบแห้งกล้วยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีดังต่อไปนี้

1. ปอกเปลือกกล้วยพร้อมซังมวลก่อนการอบแห้ง
2. เลือกมวลตัวอย่างของผลิตภัณฑ์สำหรับนำมาบันทึกการเปลี่ยนแปลงของมวล
3. บรรจุผลิตภัณฑ์ในเครื่องอบแห้งแสดงดังรูป 43-44
4. เริ่มการอบแห้งเวลา 8.00 น. และซังมวลตัวอย่างทุก ๆ 1 ชั่วโมง ถึงเวลา 18.00 น.



รูปที่ 43 การอบแห้งกล้วยสำหรับพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 44 การอบแห้งกล้วยสำหรับพาราโบลาโดมความดันต่ำ



รูปที่ 45 การตากแห้งตามธรรมชาติ

เมื่อเริ่มทำการอบแห้งปื้มสุญญากาศดูอากาศภายในโดมอบแห้งความดันต่ำออกเพื่อให้ความดันภายในต่ำกว่าความดันบรรยากาศ -0.07 bar จากนั้นปื้มจะหยุดทำงาน เมื่อความดันอากาศภายในเพิ่มขึ้นปื้มจะเริ่มทำงานอีกครั้งเพื่อรักษาระดับความดันอากาศภายในห้องอบแห้งให้อยู่ในระดับ -0.07 bar

ขณะทำการอบแห้งเกิดความเสียหายของแผ่นโพลีคาร์บอเนตจากการบีบตัวของแผ่นโพลีคาร์บอเนตทำให้รอยแตกของแผ่นโพลีคาร์บอเนตด้านบนของเครื่องอบแห้ง แสดงดังรูปที่ 46 ทางผู้วิจัยจึงใช้เทปปิดรอยแตกชั่วคราวนี้และได้ทำการทดลองอบแห้งต่อไป ซึ่งผลที่ได้แผ่นโพลีคาร์บอเนตเกิดการบีบตัวจากแรงดันอากาศอีกครั้งซึ่งส่งผลให้โครงสร้างรับแรงเสียหายซึ่งแสดงดังรูปที่ 47

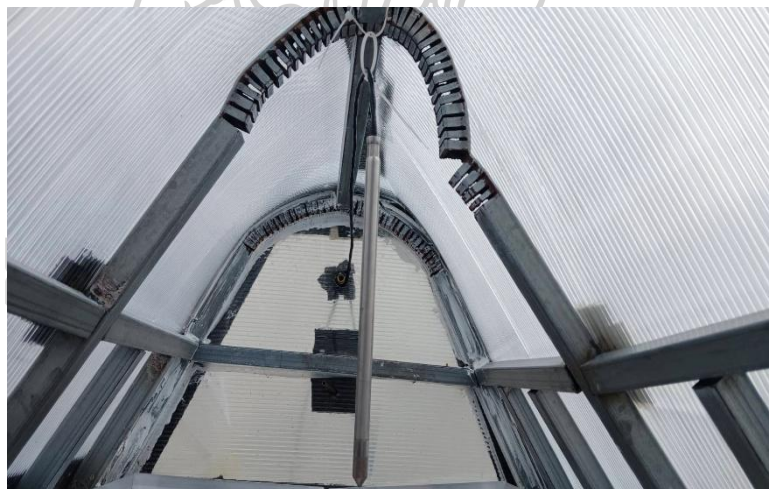
ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดต่อเครื่องอบแห้งพบว่าเกิดจากโครงสร้างส่วนโค้งงอบริเวณกลางเครื่องอบแห้งหักงอเนื่องจากการดัดโค้ง ส่งผลให้แผ่นโพลีคาร์บอเนตบริเวณนั้นบีบตัวและเสียหายในที่สุด



รูปที่ 46 รอยแตกของแผ่นโพลีคาร์บอเนต



(a)



(b)

รูปที่ 47 ความเสียหายต่อเครื่องอบแห้งความดันต่ำที่เกิดจากแรงดันอากาศขณะอบแห้ง
(a) ความเสียหายต่อแผ่นโพลีคาร์บอเนต (b) ความเสียหายต่อโครงสร้างเครื่องอบแห้ง

หลังจากตรวจสอบสาเหตุแล้วผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขส่วนของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายด้วยการเพิ่มเหล็กแบนกว้าง 1 inch ยาว 1 mหนา 3 mm จำนวน 2 เส้นพาดตามแนวยาวของเครื่องอบแห้งบริเวณใต้แผ่นโพลีคาร์บอเนตและเหล็กกลมตันเพื่อช่วยรับแรงกดบริเวณที่เกิดการหักของโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 48 จากนั้นได้ทำการเริ่มการอบแห้งใหม่ตั้งแต่ต้นอีกครั้งซึ่งลักษณะเครื่องอบแห้งความดันต่ำแสดงดังรูป 49



รูปที่ 48 แก้ไขโครงสร้างภายในหลังเกิดความเสียหายจากแรงดันอากาศ



รูปที่ 49 การอบแห้งกล้วยด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ

หลังจากแก้ไขความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อเครื่องอบแห้งความดันต่ำแล้วผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งใหม่อีกครั้งโดยเริ่มทำการอบแห้งที่เวลา 8:00 -18:00 น. ในเวลาทุกๆ 1 ชั่วโมงจะทำการเปิดเครื่องอบแห้งเพื่อนำมวลตัวอย่างไปชั่งและบันทึกการเปลี่ยนแปลงของมวลตัวอย่าง พร้อมทั้งเป็นการระบายความชื้นที่สะสมภายในห้องอบแห้งความดันต่ำด้วย

หลังจากกระบวนการอบแห้งผู้วิจัยได้นำมวลตัวอย่างทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ การตากแห้งตามธรรมชาติ การอบแห้งแบบพาราโบลาโดมและการอบแห้งแบบพาราโบลาโดมที่ความดันต่ำ ได้นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปหาค่า water activity ด้วย Rotronic Hygrolab water activity meter โดยการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งแต่ละเครื่องอบแห้งมาตัดเป็นชิ้นเพื่อวัดค่า water activity รูปที่ 49

นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละระบบอบแห้งไปวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์ด้วย Hunterlab miniscan EZ colorimeter แสดงดังรูปที่ 50 และนำมวลตัวอย่างไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไฟฟ้าที่ความร้อน 103 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหามวลแห้งสำหรับไปคำนวณความชื้นของผลิตภัณฑ์



(a)



(b)

รูปที่ 50 Rotronic Hygrolab water activity meter (a) ช่องใส่ตัวอย่าง (b) ขณะทำการวัดค่า



(a)



(b)

รูปที่ 51 Hunterlab miniscan-EZ colorimeter (a) หน้าจอแสดงผล (b) probe วัดสี



รูปที่ 52 นำมวลตัวอย่างอบแห้ง 103°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบผลของความดันอากาศต่อการอบแห้งกล้วยและไพล

ผู้วิจัยได้ทำการอบแห้งกล้วยและไพลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำด้วยหม้อดูดความชื้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการอบแห้งแต่ละระบบแสดงดังรูปที่ 53-54 อุณหภูมิและความชื้นขณะอบแห้งแสดงดังรูปที่ 55-56



(a) กล้วย



(b) ไพล

รูปที่ 53 มวลตัวอย่างของกล้วยและไพลที่ได้จากการอบแห้งพาราโบลาโดย



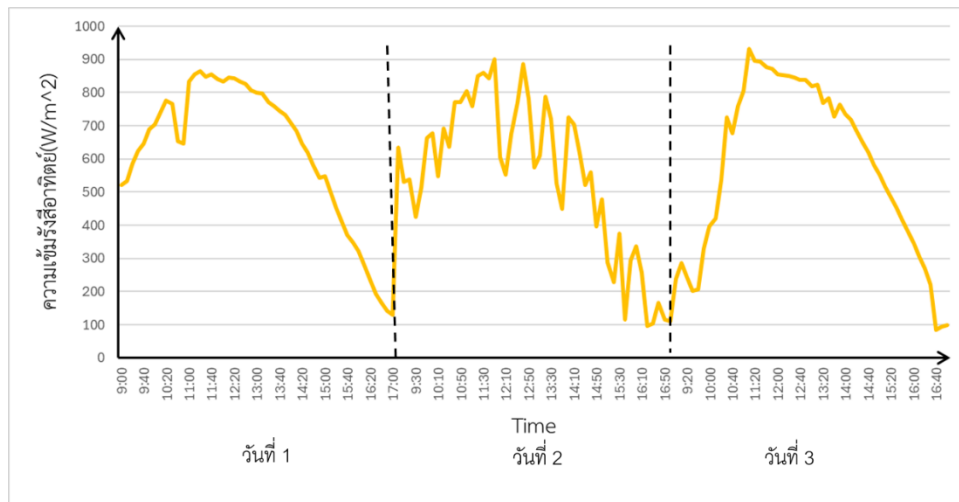
(a) กล้วย



(b) ไพล

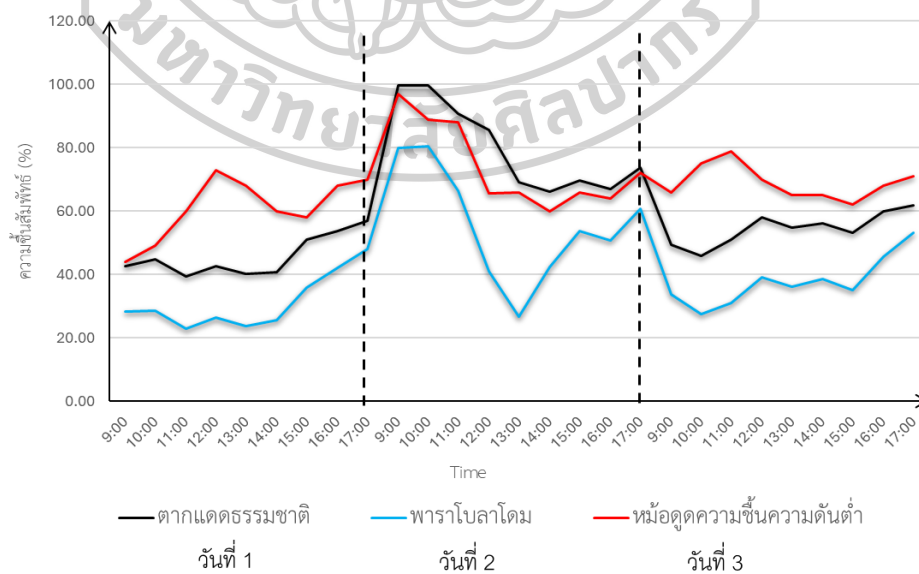
รูปที่ 54 มวลตัวอย่างของกล้วยและไพลที่ได้จากการอบแห้งหม้อความดันต่ำ

จากรูปที่ 53 และ 54 พบว่าสีของกล้วยและไพลที่ได้จากระบบความดันต่ำมีความเข้มกว่าสีของผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา เนื่องจากกล้วยในระบบความดันต่ำได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์และไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนด้วยการระบายอากาศภายในระบบ

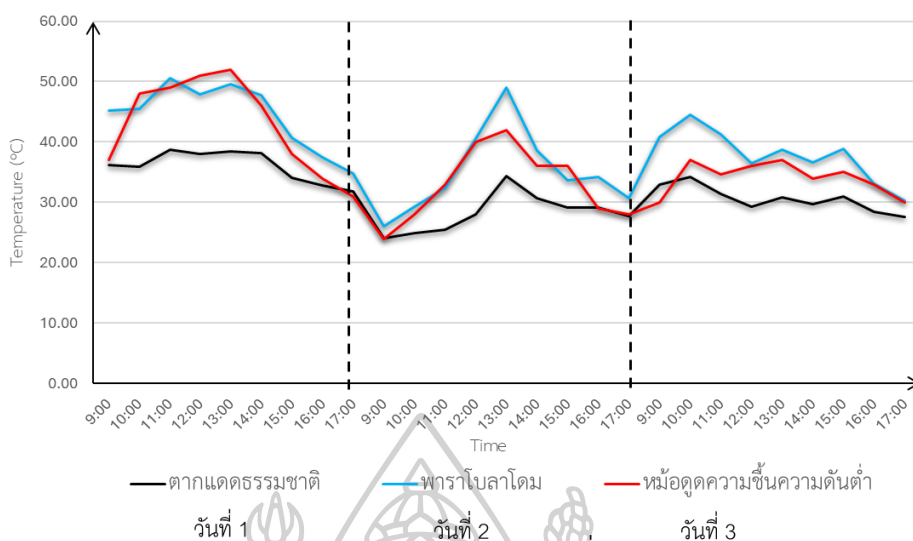


รูปที่ 55 กราฟแสดงความเข้มรังสีอาทิตย์ขณะอบแห้ง

จากกราฟแสดงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มีความเปลี่ยนแปลงมากเนื่องจากขณะอบแห้งเป็นวันที่มีเมฆมาก โดยในวันที่ 1 ของการอบแห้งความเข้มรังสีอาทิตย์เพิ่มสูงถึง 870 W/m^2 ในเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. จากนั้นมีการลดลงของความเข้มรังสีอาทิตย์เนื่องจากมีปริมาณเมฆมากตลอดถึง 17.00 น. สำหรับวันที่ 2 ของการอบแห้งมีฝนตกในช่วงเช้าตั้งแต่ 9.00 น. ถึง 11.00 น. และมีเมฆมากตลอดทั้งวัน สำหรับวันที่ 3 ของการอบแห้งมีค่าความเข้มรังสีสูงสุดที่ 920 W/m^2 ที่เวลา 11.00 น. และมีการลดของอย่างต่อเนื่องซึ่งแสดงดังรูปที่ 55



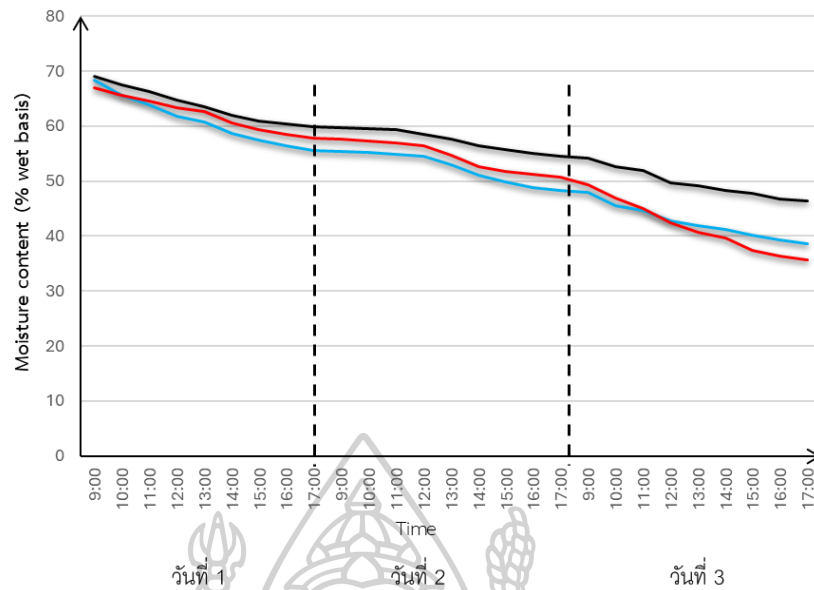
รูปที่ 56 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ขณะอบแห้งของการอบแห้งที่ความดันอากาศและความดันต่ำ



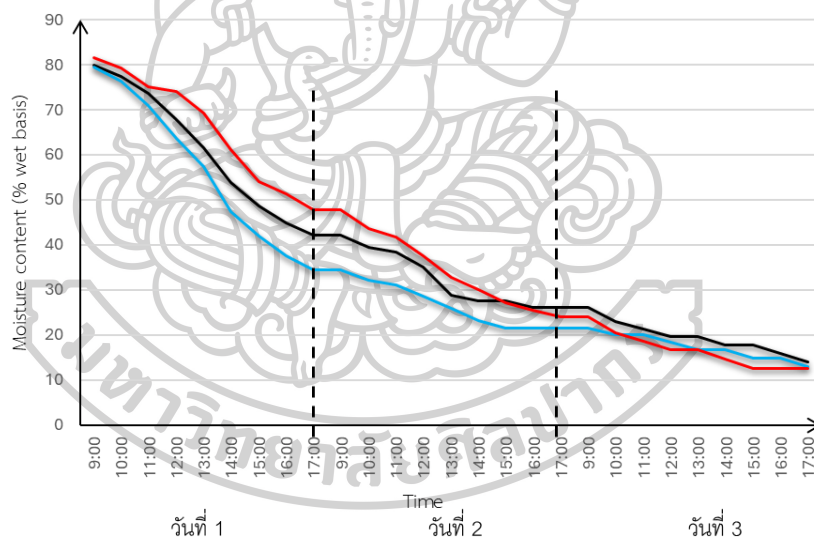
รูปที่ 57 กราฟแสดงอุณหภูมิขณะอบแห้งของการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำ

จากกราฟพบว่าพาราโบลาโดมให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดตลอดช่วงเวลาอบแห้งแสดงถึงการระบายความชื้นภายในห้องอบแห้งได้ดีด้วยพัดลมระบายอากาศส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำในผลิตภัณฑ์ได้อย่างต่อเนื่อง แต่สำหรับการอบแห้งด้วยหม้อดูดความชื้นความดันต่ำพบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการระเหยของน้ำในวัสดุอบแห้ง ซึ่งจากกราฟจะพบว่าความชื้นภายในระบบความดันต่ำจะอยู่ในช่วง RH 60-80% เนื่องจากไม่มีการระบายความชื้นที่เพียงพอซึ่งส่งผลต่ออัตราการลดลงของความชื้นมีค่าต่ำซึ่งแสดงดังรูปที่ 56 วันที่ 3 ของการทดลองพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในระบบความดันต่ำยังคงอยู่ในระดับ 60-80% แสดงถึงการระเหยน้ำของกล้วยและไพลยังมีอยู่ต่อเนื่องอันเนื่องมาจากความดันต่ำช่วยลดจุดเดือดของน้ำส่งผลให้ช่วงวันที่ 3 ของการอบแห้งระบบอบแห้งความดันต่ำมีอัตราการลดลงของความชื้นที่สูงกว่าและจากรูปที่ 57 พบว่าอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งความดันต่ำมีอุณหภูมิสูงกว่าในวันที่ 1 ของการอบแห้งเนื่องจากการสะสมของความร้อนมากซึ่งสูงที่สุดที่ 52 °C และในการอบแห้งทั้ง 3 วันอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมมีค่าสูงที่สุด

มวลตัวอย่างที่ได้แต่ละระบบถูกนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C ด้วยตู้อบไฟฟ้า 24 ชั่วโมง หลังจากได้มวลแห้งของผลิตภัณฑ์แต่ละระบบ ผู้วิจัยได้นำมาคำนวณความชื้นและการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลตัวอย่างแต่ละระบบ แสดงดังรูปที่ 58-59



รูปที่ 58 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยขณะอบแห้ง



รูปที่ 59 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของไพลขณะอบแห้ง

จากผลที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นของกล้วยและไพลทั้งสองระบบ พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลตัวอย่างอบแห้งของเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของมวลตัวอย่างในระบบอบแห้งความดันต่ำในช่วง 2 วันแรกของการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นที่สะสมในผลิตภัณฑ์มีปริมาณมาก ผลิตภัณฑ์จึงต้องการระบายความชื้นอย่างรวดเร็วทำให้เครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาสามารถระบายความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าระบบอบแห้งความดันต่ำและจากภายในห้องอบแห้งความดันต่ำมีความชื้นที่สูงมากเนื่องจากการระเหยของน้ำจากมวลตัวอย่างอย่างรวดเร็ว

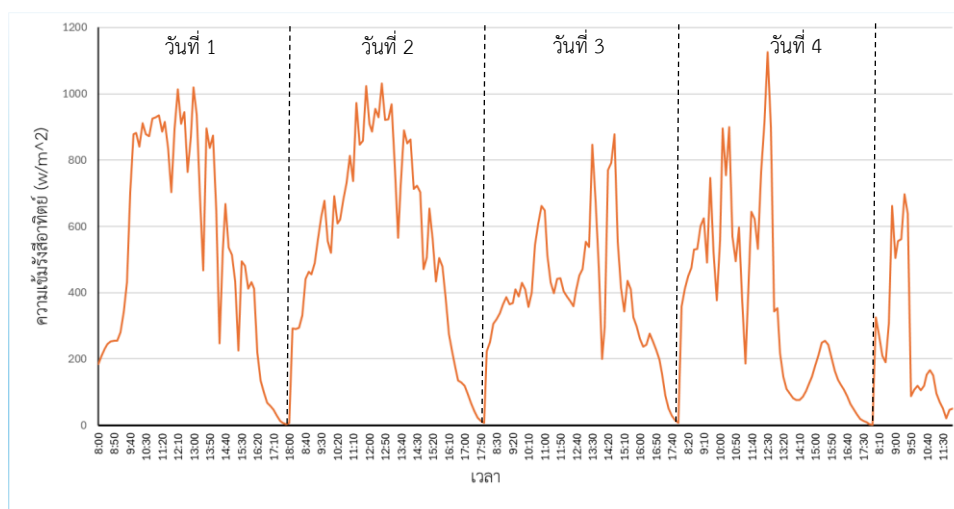
เนื่องจากจากจุดเดือดของน้ำที่ลดลงส่งผลให้อากาศภายในห้องอบแห้งนี้มีความชื้นสูงซึ่งส่งผลต่อการแห้งที่ช้าลง อย่างไรก็ตามในวันที่ 3 ผลการอบแห้งพบว่าความชื้นของมวลตัวอย่างในหม้อดูดความชื้นมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าซึ่งเกิดจากความชื้นในผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยทำให้การลดความดันส่งผลให้ความดันไอที่ผิวของผลิตภัณฑ์ในหม้อความดันต่ำลดลงความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายกว่าเครื่องอบแห้งปกติ

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการตากแห้งแบบธรรมชาติโดยนำผลิตภัณฑ์ตัวอย่างตากแดดโดยไม่สิ่งปกคลุมและทำการคำนวณความชื้นและอัตราการแห้งตามสมการข้างต้นด้วยเช่นเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบความชื้นสุดท้ายของการอบแห้งกล้วยและไพลในเวลา 3 วันพบว่าความชื้นสุดท้ายของกล้วยในการตากแดดธรรมชาติ การอบแห้งด้วยพาราโบลาโดมและการอบแห้งด้วยระบบความดันต่ำมีค่าเท่ากับ 46.38 % w.b., 38.51% w.b. และ 35.68 % w.b. ตามลำดับ และของไพลเท่ากับ 13.95 % w.b., 13.04 % w.b. และ 12.5 % w.b. ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดความดันอากาศในห้องอบแห้งช่วยให้วัสดุอบแห้งมีอัตราการลดลงของความชื้นมากขึ้นแต่ต้องมีระบบระบายความชื้นที่เหมาะสมเพื่อให้การระเหยของน้ำในวัสดุสามารถระเหยออกได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในขั้นต่อไปผู้วิจัยจะทำการทดลองการอบแห้งโดยใช้พาราโบลาโดมสำหรับอบแห้งที่ความดันต่ำโดยมีระบบควบคุมความดันที่สามารถทำงานได้เมื่อความดันภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นจากการระเหยของน้ำในวัสดุที่ส่งผลให้เกิดความดันไอที่มีขึ้นและส่งผลให้ความดันรวมภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งระบบควบคุมความดันจะสามารถช่วยดูดอากาศขึ้นออกจากห้องอบแห้งและคงระดับความดันไว้ที่ -0.07 bar



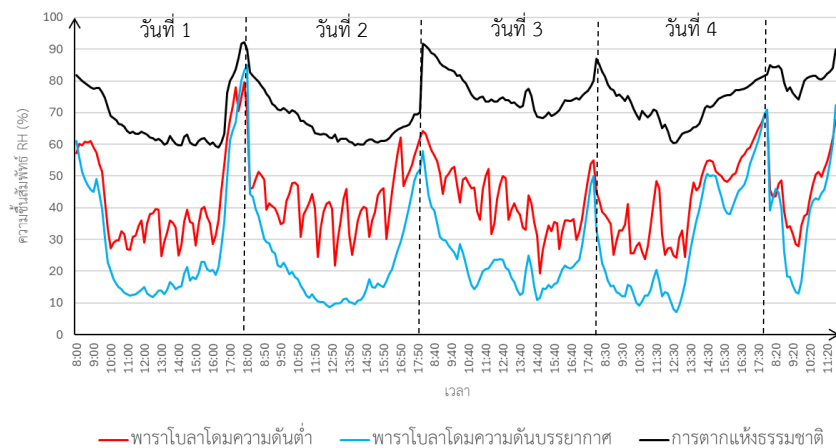
4.2 ผลการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ความดันต่ำ

ผลการวิจัยอบแห้งกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ความดันบรรยากาศและความดันต่ำ โดยในช่วงเวลาที่อบแห้งสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงมากส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงแสดงดังรูป 60 ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้ง

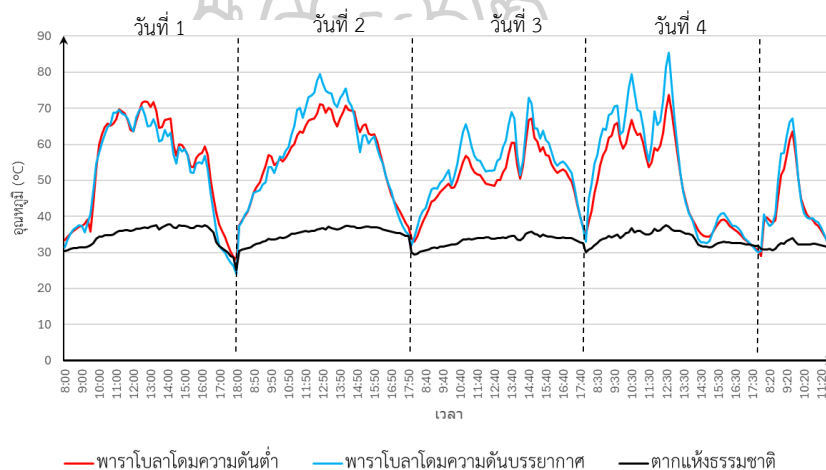


รูปที่ 60 กราฟแสดงความเข้มรังสีอาทิตย์ขณะทำการอบแห้ง

จากกราฟความเข้มรังสีอาทิตย์ขณะอบแห้ง พบว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากขณะอบแห้งมีปริมาณเมฆมากมาบดบังส่งผลให้ความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลง วันที่ 1 และ 2 ของการอบแห้งความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าสูงเป็นส่วนใหญ่ตลอดทั้งวัน และสำหรับวันที่ 3 ของการอบแห้งมีฝนตกเล็กน้อยและเมฆมากทำให้รังสีอาทิตย์ต่ำเป็นส่วนใหญ่ วันที่ 4 ของการอบแห้งมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงมากถึง $1,170 \text{ W/m}^2$ ในช่วง 11:30-12:30 น. และหลังจากนั้นความเข้มรังสีอาทิตย์ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งมีค่าต่ำสุด 150 W/m^2 ในช่วง 13:40 น. เนื่องจากเกิดฝนตกหนักจนถึงเวลา 18:00 น.



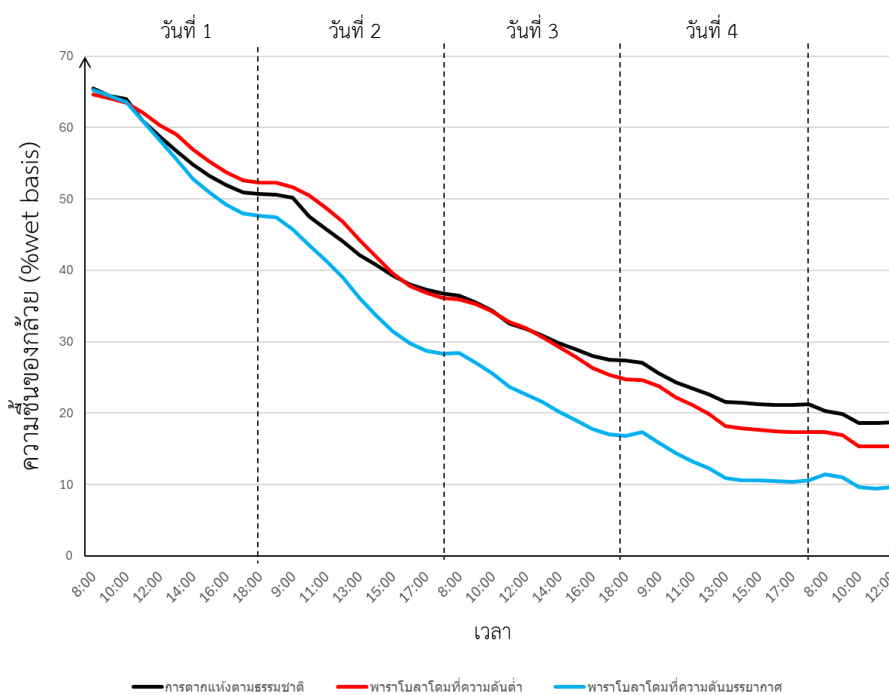
รูปที่ 61 กราฟแสดงความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละระบบ



รูปที่ 62 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งขณะอบแห้ง

จากกราฟความชื้นในการอบแห้งแต่ละระบบแสดงให้เห็นว่าความชื้นในเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศมีค่าต่ำกว่าเครื่องอบแห้งพาราโบลาโดมความดันต่ำอยู่มาก เนื่องจากความสามารถในการระบายอากาศที่ดี โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งของพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศมีค่าในช่วง 10-25% เป็นส่วนมาก และความชื้นภายในห้องอบแห้งความดันต่ำนั้นมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 25-50% ซึ่งจากกราฟความชื้นจะพบว่ามี การเพิ่มขึ้นและลดลงของความชื้นภายในห้องอบแห้งความดันต่ำในช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกัน อันเนื่องมาจากการเปิดฝาห้องอบแห้งเพื่อนำมวลตัวอย่างออกมาชั่งและจัดบันทึก ส่งผลให้ในช่วงนี้มีความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งความดันต่ำลดลง วันที่ 4 ของการอบแห้งจะพบว่าความเข้มข้นสีอาทิตย์มีค่าต่ำลงอย่างรวดเร็วในช่วง 12:00-18:00 น. ซึ่งส่งผลให้ความชื้นภายในห้องอบแห้งความดันต่ำมีค่าสูงขึ้นอัน

เนื่องจากความชื้นจากวัสดุอบแห้งและเป็นผลมาจากอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งที่ลดลงซึ่งส่งผลต่อค่าความดันไออิ่มตัวที่ลดลง จากกราฟอุณหภูมิในห้องอบแห้งพบว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งของพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งความดันต่ำระหว่างการอบแห้งมีช่วงอุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากมีฝนตกระหว่างการอบแห้งในช่วง 14:00-18:00 น. ของวันที่ 4 ซึ่งความต่างระหว่างอุณหภูมิของพาราโบลาโดมกับพาราโบลาโดมความดันต่ำมีต่างกันอย่างมากที่สุดถึง 10 °C ในวันที่ 2 และ 4 ของการอบแห้งในช่วง 12:00 น.



รูปที่ 63 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุอบแห้ง

จากกราฟพบว่าในวันแรกของการอบแห้งการลดลงของความชื้นของวัสดุอบแห้งของระบบความดันต่ำมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งวัสดุอบแห้งมีปริมาณความชื้นสูงส่งผลให้มีการระเหยของน้ำออกมามากและไม่สามารถระบายออกได้เพียงพอส่งผลให้การระเหยของน้ำช้าลง ในวันที่ 2 ของการอบแห้งระบบความดันต่ำมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในวัสดุอบแห้งที่สูงขึ้น ต่างจากการอบแห้งด้วยพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นที่ลดลงที่สูงกว่าและต่อเนื่องกว่า ซึ่งความชื้นสุดท้ายของวัสดุอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบการตากตามธรรมชาติ การอบแห้งด้วยพาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศและการอบแห้งด้วยเครื่องพาราโบลาโดมความดันต่ำ -0.07 bar มีค่าเท่ากับ 18.67, 9.70 และ 15.30 % w.b. ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งมีลักษณะดังรูปที่ 64



รูปที่ 64 ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้จากการตากตามธรรมชาติ พาราโบลาคิมที่มีความดันบรรยากาศและ พาราโบลาคิมความดันต่ำ

	การตากตามธรรมชาติ	พาราโบลาคิม	พาราโบลาคิมความดันต่ำ
L*	34.46	35.85	41.32
a*	10.38	9.08	14.77
b*	19.23	16.75	24.58
aw	0.637	0.548	0.605

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าสีและค่า water activity ของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

จากการวิจัยในส่วนของระบบทดสอบการอบแห้งด้วยหม้อความดันต่ำพบว่าความดันอากาศภายในห้องอบแห้งเท่ากับ 0.6 bar ส่งผลต่อการระเหยของน้ำในวัสดุอบแห้งโดยในช่วงแรกวัสดุอบแห้งมีการระเหยของน้ำภายในที่ค่อนข้างช้าเนื่องจากความชื้นสะสมภายในห้องอบแห้งแต่เมื่อช่วงท้ายของการอบแห้งพบว่าการเปลี่ยนแปลงของมวลวัสดุอบแห้งและความชื้นอย่างชัดเจนความชื้นสุดท้ายของกล้วยในการตากแดดธรรมชาติ การอบแห้งด้วยพาราโบลาโดมและการอบแห้งด้วยระบบความดันต่ำ มีค่าเท่ากับ 46.38 % w.b., 38.51% w.b. และ 35.68 % w.b. ตามลำดับ และของไหลเท่ากับ 13.95 % w.b., 13.04 % w.b. และ 12.5 % w.b. ตามลำดับ

ผู้วิจัยใช้การอบแห้งที่ระดับความดันต่ำกว่าบรรยากาศ -0.07 bar พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งกล้วยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่ำเนื่องจากกล้วยที่มีความชื้นสูงเกิดการระเหยน้ำและเกิดความชื้นสะสมภายในห้องอบแห้ง ถึงแม้จะมีระบบปั๊มดูดอากาศช่วยในการดูดอากาศขึ้นภายในออกเมื่อความดันภายในห้องอบแห้งเพิ่มขึ้นจากความดันไอ ซึ่งผลที่ได้ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งพาราโบลาโดมความดันต่ำมีค่ามากกว่าความชื้นสัมพัทธ์พาราโบลาโดมที่ความดันบรรยากาศอยู่ประมาณ 20 %-30 % และอุณหภูมิต่ำกว่ามากที่สุด 10 °C ความชื้นสุดท้ายของวัสดุอบแห้งจากการตากแห้งตามธรรมชาติ การอบแห้งด้วยพาราโบลาโดมและพาราโบลาโดมความดันต่ำเท่ากับ 18.67, 9.70 และ 15.30 % w.b. ตามลำดับ และค่า a_w เท่ากับ 0.637, 0.548, 0.605 แม้ว่าผลที่ได้แสดงถึงประสิทธิภาพในการระเหยน้ำของกล้วยสำหรับเครื่องอบแห้งความดันต่ำนี้น้อยกว่าเครื่องอบแห้งแบบพาราโบลา หากมีการปรับปรุงด้านการระบายความชื้นสะสมภายในห้องอบแห้งระบบนี้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งได้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

รายการอ้างอิง

- Baldet, P., & Colas, F. (2012). Utiliser la mesure de l'activité de l'eau pour mieux conserver les semences forestières: une coopération fructueuse entre Irstea et la Direction de la recherche forestière au Québec. *Sciences Eaux Territoires*(II), 20–25.
- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana Jr, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2020). *Water activity in foods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Barzee, T. J., Cao, L., Pan, Z., & Zhang, R. (2021). Fungi for future foods. *Journal of Future Foods*, 1(1), 25–37.
- Bendler, J. T. (1999). *Handbook of Polycarbonate Science and Technology*. CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482273694>
- Cedeño, S. d. M. R., Gámez, M. R., & Suárez, J. A. Solar drying and agribusiness.
- Chayaprasert, W., Pathaveerat, S., & Chotikasatian, C. (2024). การพัฒนาระบบอบแห้งด้วยสุญญากาศแบบพัลส์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดต้นทุ่น ต่ำ. *Recent Science and Technology*, 16(3), 572–590.
- Comer, D. C., & Harrower, M. J. (2013). *Mapping archaeological landscapes from space* (Vol. 5). Springer.
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615–655.
- Le, M. S., Hermansen, C., & Vuong, Q. V. (2025). The Impact of Hot Air Drying and Vacuum Drying on Oat Pulp Quality. *Food and Bioprocess Technology*, 18(7), 6726–6742.
- Madhumathy, S. (2021). Water activity and its impacts on food stability. *IJFANS International Journal of Food and Nutritional Sciences*, 10(12), 832–851.
- Mansour, N. E., Metwally, K. A., Tantawy, A. A., Elbeltagi, A., Salem, A., Dewidar, A. Z., Okasha, A. M., Moustapha, M. E., & Elwakeel, A. E. (2025). Automated vacuum drying kinetics, thermodynamics, and economic analysis of sage leaves. *Scientific Reports*, 15(1), 18779.

Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, 12(7), 409–417.

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(01\)00032-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9)

Roratto, T. B., Monteiro, R. L., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2021). An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. *LWT*, 140, 110777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110777>

Stevenson, A., Cray, J. A., Williams, J. P., Santos, R., Sahay, R., Neuenkirchen, N., McClure, C. D., Grant, I. R., Houghton, J. D., & Quinn, J. P. (2015). Is there a common water-activity limit for the three domains of life? *The ISME journal*, 9(6), 1333–1351.

Thanimkarn, S., Cheevitsopon, E., & Jongyingcharoen, J. S. (2019). Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of *Cissus quadrangularis* Linn. *Heliyon*, 5(6), e01999.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01999>

van Houten, J. (1994). Large strain behaviour of polycarbonate.

Vega-Gálvez, A., Uribe, E., Pastén, A., Vega, M., Poblete, J., Bilbao-Sainz, C., & Chiou, B.-S. (2022). Low-temperature vacuum drying as novel process to improve papaya (*Vasconcellea pubescens*) nutritional-functional properties. *Future Foods*, 5, 100117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fufo.2022.100117>

เสริม จันท์ฉาย. (2560). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ *Solar Drying Technology* หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

โทร. 034-270761



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชาญวิทย์ พลเยี่ยม
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2562 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2566 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
รางวัลที่ได้รับ	เข้าร่วมงานประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 16 วันที่ 27- 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2568 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม

