ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์และผสมผสาน ต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน

ปุณยาพร แสนแปง

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์และผสมผสาน ต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน

ปุณยาพร แสนแปง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์และผสมผสาน
ต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน

ปุณยาพร แสนแปง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ----------
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ----------
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ----------
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร ----------
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว ----------
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)
รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน
อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. .....

ชื่อเรื่อง ผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์และผสมผสาน ต่อคุณภาพของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงาน
ชื่อผู้เขียน นางสาวปุณยาพร แสนแปง
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของฮีตเตอร์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65 องศาเซลเซียส ต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดรวมทั้งค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง โดยผลการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งใบมะกรูดมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น และการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยสูงที่สุดในขณะที่ระบบปั๊มความร้อนมีอัตราการอบแห้งน้อยที่สุดจึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานสั้นกว่าระบบปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน ส่วนผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดหลังการอบแห้งพบว่า การใช้ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีค่าสีดีที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากปริมาณของสารและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระพบว่า ใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะนั้นพบว่า การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ใช้พลังงานมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการศึกษาโดยรวมทั้งหมด สามารถสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของฮีตเตอร์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 นาที ส่งผลให้ใบมะกรูดอบแห้งมีสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดีที่สุดโดยที่ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยที่สุด นอกจากนี้ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบาง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด

คำสำคัญ : ปั๊มความร้อน, พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ, สี, สารต้านอนุมูลอิสระ, ฮีตเตอร์

Title EFFECTS OF DRYING WITH HEAT PUMP, HEATER AND HYBRID SYSTEMS ON QUALITY OF KAFFIR LIME LEAVES AND ENERGY CONSUMPTION

Author Miss Poonyaporn Sanpang

Degree Master of Engineering in Food Engineering

Advisory Committee Chairperson Assistant Professor Dr. Yardfon Tanongkankit

ABSTRACT

The objectives of this research were to study the effects of drying kaffir lime leaves using heat pump, heater and hybrid system of heater and heat pump at temperatures of 45, 55 and 65°C on physical and chemical properties and specific energy consumption. The results showed that increase in drying rate occurred when drying temperature was higher. Among three heating systems at the same drying temperature, an average drying rate of hybrid system exhibited the highest value resulting in shorter drying time than heat pump and heater system. For the result of color of kaffir lime leaves after drying, it was found that dried kaffir lime leaves with either heater or hybrid system at either 45 or 55°C provided the best color value. Moreover, when considering the antioxidant content and activity, the results showed that dried kaffir lime leaves with either heater or hybrid system at 55°C contained the highest content of beta-carotene and phenolic compounds and antioxidant activity. However, the result of energy usage revealed that heater had the highest specific energy consumption. Therefore, overall results indicated that drying with hybrid system of heater and heat pump at 55°C for 330 min led to dried kaffir lime leaves with the best of physical and chemical properties and the lowest energy consumption. Moreover, the study of empirical mathematical model for thin layer drying revealed that Page's model was the most suitable for predicting drying behavior.

Keywords : Antioxidant, Color, Heater, Heat pump, Specific energy consumption

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นผลงานที่ผู้วิจัยได้ทุ่มเทความตั้งใจ สติปัญญา กำลังกายและกำลังใจจนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หยาดฝน ทนงการกิจ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร. ชนวัฒน์ นิทัศน์วิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางในการทำงานวิจัยและตรวจสอบความบกพร่องในการเขียนวิทยานิพนธ์ จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปริญ คงกระพันธ์ และวิทยาลัยทดแทนพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ เครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดระยะเวลาที่เข้าทำการทดลอง และให้คำปรึกษา แนะนำ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย "ทุนวิจัยบัณฑิตศึกษา ด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปี 2563" ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบกราบขอพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ และครอบครัว ที่ส่งเสริมการศึกษา เป็นพลังเป็นกำลังใจที่ดี ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน จนทำให้ประสบความสำเร็จในการเรียนในครั้งนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆและผู้เกี่ยวข้องทุกคนที่คอยช่วยเหลือให้กำลังใจในการทำโครงงานวิจัยจนสำเร็จ ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ปุณยาพร แสนแปง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

ที่มาและความสำคัญ 1

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

ขอบเขตของงานวิจัย 2

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร 4

มะกรูด 4

การทำแห้ง 8

การอบแห้งลมร้อน 17

การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน 18

การอบแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying) 23

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง 24

แบบจำลองการอบแห้ง 26

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ 28

ค่าสี (Color) 30

สารต้านอนุมูลอิสระ.....32
คลอโรฟิลล์.....34
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....36
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....41
วัตถุดิบ.....41
อุปกรณ์และเครื่องมือ.....41
สารเคมี.....42
แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....43
เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานที่ใช้ในการทดลอง.....46
1. ระบบให้ความร้อนด้วยปั๊มความร้อน.....47
2. ระบบให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์.....48
3. ระบบหมุนเวียนอากาศและกระจายอากาศ.....49
4. ระบบตรวจวัดและควบคุม.....50
การศึกษาการทดลองอบแห้งใบมะกรูด.....52
1.การเตรียมตัวอย่าง.....52
2. การอบแห้ง.....53
3. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC).....53
4. การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR).....54
5. การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity, a_w).....54
6. การตรวจสอบอัตราส่วนการคืนตัว (Rehydration Ratio, RR).....54
7. การวิเคราะห์ค่าสี.....55
8. การหาปริมาณคลอโรฟิลล์.....55
9. การหาปริมาณเบต้าแคโรทีน.....56
10. การสกัดตัวอย่าง.....56

11. การหาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC).....56
12. การหาปริมาณฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (DPPH radical scavenging activity).....57
13. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (Specific Energy Consumption, SEC) 57
การศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง.....58
การวิเคราะห์ทางสถิติ.....58
สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....59
1. เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานที่ใช้ในการทดลอง.....59
2. การทดลองการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์.....64
2.1 สมบัติทางกายภาพของใบมะกรูดอบแห้ง.....64
2.2 สมบัติทางเคมีของใบมะกรูดอบแห้ง.....70
2.3 ผลของการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน.....73
3. การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์.....75
3.1 แบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน.....75
3.2 การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์.....78
3.3 การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์.....80
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....82
สรุปผลการศึกษา.....82
ข้อเสนอแนะ.....84
บรรณานุกรม.....86

ภาคผนวก 90
ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และรูปการณ์ทดลอง 91
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 100
การวิเคราะห์ความแปรปวน (ANOVA) 101
การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น 107
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่ 109
ประวัติผู้วิจัย 120

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของใบมะกรูด 7

ตารางที่ 2 สารสำคัญที่พบในใบ และเปลือกผลมะกรูด 8

ตารางที่ 3 รูปแบบสมการของแบบจำลองการอบแห้งแบบต่างๆ..... 26

ตารางที่ 4 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 39

ตารางที่ 5 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ) 40

ตารางที่ 7 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12%$_{wb}$ ปริมาณความชื้นสุดท้าย และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของใบมะกรูดอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน.67

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์สีของใบมะกรูดสดและอบแห้ง ที่ทำการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน..... 70

ตารางที่ 9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบมะกรูดสดและอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างกันของระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน..... 71

ตารางที่ 10 ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของใบมะกรูดสดและอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน 72

ตารางที่ 11 แสดงผลการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน..... 74

ตารางที่ 12 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน..... 76

ตารางที่ 13 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ 78

ตารางที่ 14 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ (ต่อ)..... 79

ตารางที่ 15 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและ ฮีตเตอร์..... 80

ตารางที่ 16 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ (ต่อ)..... 81

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ลักษณะของใบมะกรูด 4

ภาพที่ 2 ก).ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นในการอบแห้ง ข).ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการอบแห้ง 10

ภาพที่ 3 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) 12

ภาพที่ 4 การอ่านค่าสมบัติความชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart) 14

ภาพที่ 5 กลไกการถ่ายเทมวลหรือน้ำของใบมะกรูดในการอบแห้งด้วยลมร้อน 17

ภาพที่ 6 ปั๊มความร้อน 1) เครื่องอัดไอ (Compressor) 2) เครื่องควบแน่น (Condenser) 18

ภาพที่ 7 T-s ไดอะแกรมของปั๊มความร้อน 18

ภาพที่ 8 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน 21

ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารทั่วไป 29

ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหาร ที่มีความชื้นต่ำ 29

ภาพที่ 11 แผนภาพสีแดง Hue Value และ Chroma 31

ภาพที่ 12 CIE Lab แสดง L*, a*, b* Color space 32

ภาพที่ 13 โครงสร้างทางเคมีของโพลีฟีนอล 33

ภาพที่ 14 แผนผังการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด 45

ภาพที่ 15 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองอบแห้งระบบผสมผสาน 46

ภาพที่ 16 แสดงตำแหน่งส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง 1) โซนห้องอบแห้ง 2) พัดลมดูดอากาศ 3) ท่อลม 4) มอเตอร์สำหรับหมุนถาด 5) ช่องระบายอากาศชื้น 6) ปั๊มความร้อน 7) ฮีตเตอร์ 8) ถาดสำหรับใส่ผลิตภัณฑ์ 47

ภาพที่ 17 ปั๊มความร้อน 48

ภาพที่ 18 ฮีตเตอร์ 49

ภาพที่ 19 ระบบท่อหมุนเวียนลมร้อน.....50

ภาพที่ 20 ชุดกระจายลมร้อน.....50

ภาพที่ 21 ก.) การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ และความเร็วลม, ข.) อุปกรณ์ควบคุมรอบมอเตอร์หมุนถาดอบแห้งและพัดลมหมุนเวียนอากาศ.....51

ภาพที่ 22 ก.) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, ข.) อุปกรณ์ตรวจวัดการใช้พลังงาน.....51

ภาพที่ 23 การคัดคุณภาพ และล้างทำความสะอาดใบมะกรูด.....52

ภาพที่ 24 การผึ่งใบมะกรูดก่อนนำมาใช้ในการทดลอง.....52

ภาพที่ 25 การเตรียมตัวอย่างวัดความชื้น.....53

ภาพที่ 26 การไหลเวียนอากาศในระบบอบแห้ง.....59

ภาพที่ 27 สมบัติของอากาศแวดล้อม อากาศก่อนอบแห้ง และอากาศหลังอบแห้ง.....60

ภาพที่ 28 ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วย ก.) ระบบปั๊มความร้อน ข.)ระบบฮีตเตอร์ และค.) ระบบผสมผสาน.....65

ภาพที่ 29 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างการอบแห้งของใบมะกรูดด้วย ก.) ระบบปั๊มความร้อน ข.) ระบบฮีตเตอร์ และ ค.)ระบบผสมผสาน.....66

ภาพที่ 30 อัตราส่วนการคืนตัวของใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน ด้วย ก.) ระบบปั๊มความร้อน ข.) ระบบฮีตเตอร์ และ ค.)ระบบผสมผสาน.....68

ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ระบบปั๊มความร้อนเทียบกับแบบจำลอง Page.....77

ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ระบบฮีตเตอร์เทียบกับแบบจำลอง Page.....79

ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์เทียบกับแบบจำลอง Page.....81

บทที่ 1
บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ใบมะกรูด (Citrus hystrix D.C.) เป็นพืชสมุนไพรที่ถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบอย่างแพร่หลายในอาหารเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากใบมะกรูดมีกลิ่นหอมเฉพาะตัวและให้รสชาติที่โดดเด่นแก่อาหาร นอกจากนี้ยังมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญเช่น สารเบต้าแคโรทีนและสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งมีฤทธิ์ในการป้องกันโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็ง โรคหัวใจ และโรคหลอดเลือด (Tirawanchai et al., 2020; Venkatachalam, 2019) แต่อย่างไรก็ตามใบมะกรูดนั้นเป็นพืชที่เน่าเสียได้ง่าย เมื่อพิจารณาจากสีและสาระสำคัญที่เปลี่ยนแปลงไป ใบมะกรูดจะมีอายุการเก็บรักษาเพียง 3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และ 18 วัน ที่อุณหภูมิ 8°C (Tasirin et al., 2014; Venkatachalam, 2019) ซึ่งอายุการเก็บรักษาที่สั้นนี้อาจเป็นข้อจำกัดหากจะนำใบมะกรูดมาใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมหรือเพื่อการส่งออก ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการยืดอายุการเก็บรักษาใบมะกรูดโดยการอบแห้ง เนื่องจากมีงานวิจัยของ อิศรพงษ์ (2553) ที่รายงานว่า ใบมะกรูดแห้งที่เก็บไว้ในถุงอะลูมิเนียมฟอยล์ ที่อุณหภูมิห้องจะมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 133 วัน เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของสารสำคัญ

ในปัจจุบันผู้บริโภคมีบทบาทที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแปรรูปต้องมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูง ปลอดภัย และมีอายุการเก็บรักษาที่นาน กระบวนการทำแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของอาหารสด หรือแปรรูปอาหารเหลวให้เป็นอาหารผง เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา สะดวกในการจัดเก็บ ขนส่ง เพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร และเพิ่มความสะดวกในการนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน (ชาลีดา, 2555) การทำแห้งมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป เช่น การใช้ลมร้อนเป็นวิธีในการทำแห้งโดยทั่วไป ทำได้โดยการตากแดด หรือใช้เครื่องทำแห้งลมร้อนแบบต่าง ๆ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นกระบวนการที่ใช้กันทั่วไปในการลดความชื้นลงจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการเน่าเสียได้ (Phungamgnoen et al., 2021) อากาศร้อนในเครื่องอบแห้งลมร้อนเกิดขึ้นได้จากแหล่งความร้อนหลายชนิด เช่น ฮีตเตอร์เชื้อเพลิงชีวมวล และก๊าซ เป็นต้น โดยฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนที่นิยมใช้กันมากที่สุด สามารถทำให้เกิดความร้อนโดยการให้ไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูงจนเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งระบบนี้มีข้อดีคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สม่ำเสมอตามต้องการและมีอัตราการเพิ่มขึ้น

ของอุณหภูมิที่ค่อนข้างเร็ว แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูง ดังนั้นจึงมีการนำระบบปั๊มความร้อนซึ่งใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อน ซึ่งต่างจากฮีตเตอร์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนโดยตรง จึงทำให้ช่วยประหยัดพลังงานในการอบแห้ง (Tunckal and Doymaz, 2020) จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Taseria et al. (2018) ได้รายงานว่ากากองุ่นที่ทำให้แห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนใช้พลังงานในการอบแห้งลดลงประมาณ 51% เมื่อเทียบกับระบบฮีตเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อจำกัดคืออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนจะช้ากว่าการใช้ฮีตเตอร์ เพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว เมื่อพิจารณาจากข้อดีและข้อจำกัดของการให้ความร้อนทั้งสองระบบจะเห็นได้ว่า หากนำระบบให้ความร้อนทั้งสองแบบมาผสมผสานกันก็อาจจะช่วยทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยและการใช้พลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการศึกษาผลของการอบแห้งใบมะกรูดที่มีแหล่งความร้อนเป็นฮีตเตอร์ ปั๊มความร้อนและระบบผสมผสานของฮีตเตอร์และปั๊มความร้อนต่ออัตราการอบแห้งเฉลี่ย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ และฮีตเตอร์ร่วมปั๊มความร้อน

2. เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน คุณภาพทางกายภาพและเคมีของใบมะกรูดในระหว่างการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ฮีตเตอร์ และฮีตเตอร์ร่วมปั๊มความร้อน

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ใบมะกรูดที่ใช้ในการศึกษาจากแหล่งปลูกในอำเภอพร้าว จ.เชียงใหม่
2. อุณหภูมิอบแห้งที่ใช้ในการศึกษา 45 55 และ 65°C
3. ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า 12%$_{wb}$

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบวิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด
2. ทราบพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งในแต่ละระบบการอบแห้ง

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร

มะกรูด

มะกรูด (Kaffir lime) เป็นพืชตระกูลส้ม และมะนาว (Citrus family) ที่เป็นพืชพื้นเมืองในแถบประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยจัดเป็นไม้ผลและพืชผักสมุนไพรที่นิยมปลูกไว้ตามบ้านและสวน เพื่อใช้สำหรับประกอบอาหาร เนื่องจากใบและผลมีน้ำมันหอมระเหยที่ให้กลิ่นหอมช่วยในการดับกลิ่นคาว และเพิ่มรสให้แก่อาหารได้เป็นอย่างดี รวมถึงมีองค์ประกอบของสารสำคัญหลายชนิดที่มีคุณสมบัติทางยา และคุณสมบัติทางด้านความสวยความงาม ดังภาพที่ 1

ชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Citrus hystrix DC.*

วงศ์ : Rutaceae

ชื่อพ้อง : – Citrus echinata St. Lag.
– Citrus latipes Hook. F.& Thoms.
– Citrus papidia Miq

ชื่อสามัญ : – Kaffir lime
– Porcupine orange
– Leech lime
– Mauritrus papeda

ชื่อท้องถิ่น : มะกรูด ส้มมั่วผี มะหูด ส้มมะกรูด ส้มกรูด มะขุน มะขูด หมากกรูด เป็นต้น

ภาพที่ 1 ลักษณะของใบมะกรูด

1. ลักษณะทั่วไป

ลำต้นมะกรูด เป็นไม้ยืนต้นขนาดเล็ก เนื้อไม้เป็นเนื้อแข็ง เปลือกเรียบมีสีน้ำตาลอ่อน ลำต้นแตกกิ่งก้านจำนวนมากตั้งแต่ระดับล่างของลำต้น ทำให้มีลักษณะเป็นพุ่มตามลำต้น และกิ่งมีหนามแหลมยาว

ใบมะกรูด เป็นใบประกอบออกเป็นใบเดี่ยว มีก้านใบแผ่ออกเป็นครีบคล้ายแผ่นใบ ใบมีลักษณะหนา เรียบ มีผิวมัน สีเขียวและเขียวเข้มตามอายุของใบ ใบมีคอกิ่วที่กลางใบทำให้ใบแบ่งออกเป็น 2 ตอน หรือคล้ายใบไม้ 2 ใบต่อกัน ขนาดใบกว้างประมาณ 2.5-5 cm ยาวประมาณ 5-12 cm ใบมีกลิ่นหอมมากเพราะมีต่อมน้ำมันอยู่

ผลมะกรูดหรือลูกมะกรูด มีลักษณะค่อนข้างกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-7 cm ผลคล้ายผลส้มซ่า ผลมีขนาดใหญ่กว่าลูกมะนาวเล็กน้อย ลักษณะของผลมีรูปร่างแตกต่างกันไปแล้วแต่พันธุ์ เปลือกผลค่อนข้างหนา ผิวเปลือกมีสีเขียวเข้ม ผิวขรุขระเป็นลูกคลื่นหรือเป็นปุ่มนูน ภายในเปลือกมีต่อมน้ำมันหอมระเหยเป็นจำนวนมาก มีจุกที่หัว และท้ายของผล เมื่อสุกผลจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ด้านในผลประกอบด้วยเนื้อฉ่ำน้ำ มีเมล็ดแทรกบริเวณกลางผล 5-10 เมล็ด เนื้อผลมีรสเปรี้ยวปนขมเล็กน้อย (ชลลดา, 2546)

2. การใช้ในตำรับยา และประโยชน์ทั่วไป

2.1 น้ำมะกรูด ช่วยบำรุงสุขภาพเหงือก และฟัน เนื่องจากมีวิตามินซีในปริมาณมาก โดยในประเทศไทยมีการนำน้ำมะกรูดไปใช้สำหรับเป็นยาขับเสมหะ แก้ไอ แก้โรคเลือดออกตามไรฟัน นำมาดองยารับประทานเป็นยาฟอกโลหิตสตรี ผสมกับปูนแดงทาแก้ปวดท้อง นอกจากนั้น มีการนำน้ำมะกรูดไปใช้เป็นยาฟอกขาวตามธรรมชาติสำหรับกำจัดคราบรอยด่าง รวมไปถึงการนำไปใช้สำหรับฆ่าทากตามพื้นดิน

2.2 ผิวมะกรูด นำไปใช้เป็นยาขับลมในลำไส้ แก้แน่นท้อง แก้วิงเวียน เป็นยาบำรุงหัวใจ ใช้กระตุ้นและรักษาอาการปวดท้อง นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตภัณฑ์น้ำยาบ้วนปาก ในประเทศไทยมีการนำผิวมะกรูดแห้งให้แก่หญิงที่เพิ่งคลอดบุตร และใช้เป็นยาเร่งประจำเดือน ส่วนประเทศอินเดียนิยมใช้ผิวมะกรูดสำหรับใช้เป็นยาฆ่าแมลงด้วย ส่วนในตำรับยาของชาวมาเลเซียมีการใช้ผลสดทั้งผลสำหรับการเตรียมยาสำหรับใช้ภายใน ซึ่งจะเป็นใบสั่งยาเกี่ยวกับโรคความเจ็บปวดในช่องท้อง และใช้เป็นยาขับลมแก้ท้องเฟ้อ (ชลลดา, 2546)

3. การใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม

ใบมะกรูดมักถูกนำไปใช้ในหลายประเทศสำหรับใช้เป็นสารกันเสียในผลิตภัณฑ์อาหาร (Preserve foods) และยังทำให้เกิดความอยากอาหาร

น้ำมะกรูด และผิวผลมะกรูดโดยส่วนมากจะใช้ปรับปรุงรสชาติและกลิ่นรสของอาหารในภูมิภาคเอเชีย เช่น ในประเทศอินโดนีเซีย มักนิยมใช้ใบมะกรูดเพื่อกลิ่นรสที่จำเพาะ เช่น เครื่องปรุงและเครื่องดื่ม

ในประเทศไทยใช้ผิวมะกรูดเป็นเครื่องเทศ โดยใช้เป็นส่วนผสมของน้ำพริกแกงหลายชนิด น้ำมะกรูดถูกนำไปใช้สำหรับเตรียมเป็นเครื่องดื่ม และสำหรับปรุงอาหารเพื่อให้มีรสเปรี้ยว และดับกลิ่นคาวปลา นิยมใส่น้ำมะกรูดในปลาร้าหลน แกงส้ม แกงคั่ว ฯลฯ และมีการนำไปใช้กันมากสำหรับเป็นเครื่องปรุงเนื้อ ส่วนในทางการค้าด้วยลักษณะที่โดดเด่น และมีรสชาติจำเพาะ จึงมักใช้สำหรับตำรับอาหารจำพวกแกงเผ็ด ซุป และกูไล (Gulai) ซึ่งเป็นแกงพื้นเมืองชนิดหนึ่งของประเทศอินโดนีเซีย เป็นต้น (ชลลดา, 2546)

4. การใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

เนื่องจากมะกรูดมีสมบัติในการช่วยบำรุงหนังศีรษะและกระตุ้นการงอกของรากผม ช่วยขจัดรังแคที่มีสาเหตุมาจากเชื้อจุลินทรีย์ แก้คันศีรษะ และช่วยหล่อลื่นผมทำให้ผมดกดำเป็นเงางาม รากผมแข็งแรง ไม่หลุดร่วงง่าย ส่วนน้ำมะกรูดมีสมบัติเป็นกรดตามธรรมชาติเหมาะสำหรับหนังศีรษะไม่ทำให้เกิดการระคายเคือง ช่วยในการทำความสะอาดเส้นผม และหนังศีรษะ และช่วยในการชำระล้างคราบสบู่และแชมพู ดังนั้น จึงนิยมนำมะกรูดไปใช้เป็นส่วนผสมสำหรับการเตรียมผลิตภัณฑ์แชมพูผสมมะกรูด ชาวพม่า และชาวมาเลเซีย ใช้น้ำมะกรูดเป็นแชมพูธรรมชาติสำหรับสระผม และชำระล้างส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย นอกจากนี้ ยังมีการนำน้ำมะกรูด และผลมะกรูดไปใช้สำหรับแต่งกลิ่นในผลิตภัณฑ์แชมพูสระผม รักษาชันนะตุ รังแค และทำให้ผมสะอาด รวมถึงมีการนำไปใช้เป็นครีมทาผิวด้วย ส่วนประเทศฟิลิปปินส์นิยมใช้ผลมะกรูดผสมกับเปลือกสะบ้ามอญสระผม (ชลลดา, 2546)

5. คุณค่าทางโภชนาการของใบมะกรูด (100 g)

ให้พลังงานต่อร่างกาย 138 Kcal ประกอบด้วยน้ำ คาร์โบไฮเดรต และกากใย นอกจากนี้ยังประกอบด้วยเกลือแร่ชนิดต่าง ๆ เช่น โพแทสเซียม โซเดียม เหล็ก และสังกะสี และเบต้าแคโรทีน โดยในใบกึ่งอ่อนกึ่งแก่มีปริมาณ 173.60 ± 34.06 µg ต่อใบสด 1 g (Siripongvutikorn และคณะ, 2005) สำหรับกลิ่นรสของใบมะกรูดเกิดจากน้ำมันหอมระเหยมีปริมาณ 1.10% โดยมีสาระสำคัญได้แก่ Citronellal, β-pinene, Citronellyl Acetate, Citronellol, Geranyl acetate, δ-cadinene, Isopulegol, Caryophyllene โดยมี Citronellal เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยประมาณ 65% ของปริมาณน้ำมันหอมระเหยทั้งหมด ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของใบมะกรูด

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ/100 g
น้ำ	57.1 g
คาร์โบไฮเดรต	20.8 g
โปรตีน	6.80 g
ไขมัน	3.10 g
ใยอาหาร	8.20 g
แคลเซียม	1.67 g
ฟอสฟอรัส	20 µg
เหล็ก	3.8 µg
วิตามิน บี 1	0.2 µg
วิตามิน บี 2	0.35 µg
วิตามิน ซี	20 µg
ไนอาซิน	1.0 µg
โพแทสเซียม	352 µg
โซเดียม	23 µg
สังกะสี	0.5 µg

ที่มา: ดัดแปลงจาก กรมอนามัย (2544)

6. สาระสำคัญที่พบ

น้ำมันหอมระเหยมะกรูดประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ สารในกลุ่มเทอร์พีน (Terpenes) และสารที่ไม่ใช่กลุ่มเทอร์พีน (Non-terpene) หรือ Oxygenated compounds

สารเทอร์พีนเป็นสารพวก Unsaturated hydrocarbons ซึ่งเป็นสารที่ไม่คงตัว สามารถเกิดปฏิกิริยา Photochemical และปฏิกิริยา Oxidation ได้ง่าย ทำให้น้ำมันหอมระเหยเสื่อมลงอย่างช้า ๆ

โมโนเทอร์พีน (Monoterpene, C_{10}) เป็นเทอร์พีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม คือ Acyclic, Monocyclic และ Bicyclic เช่น Ocimene, Di-limonene และ Camphene ตามลำดับ

เซสควิเทอร์พีน (Sesquiterpenes, C_{15}) เป็นองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยที่มีจุดเดือดสูง เป็นสารประกอบไม่อิ่มตัวประเภท Acyclic หรือ Cyclic เช่น Farnesol และ D-bisabolene

ตามลำดับ ส่วน Non-terpenes เป็นส่วนเฉพาะที่ทำให้เกิดกลิ่นเฉพาะตัวของน้ำมันหอมระเหย ได้แก่ สารประกอบอัลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ คีโตน อีเธอร์ กรดคาร์บอกซิลิค และเอสเทอร์ เป็นต้น สารเหล่านี้ ได้แก่ Geraniol, Linalool เป็นต้น โดยสารสำคัญที่พบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สารสำคัญที่พบในใบ และเปลือกผลมะกรูด

β-pinene	Limonene	Sabinene
Citronellal	α-pinene	Myrcene
1,8 cineol	α-terpineol	Trans-sabinene hydrate
Copaene	Linalool	β-cubenene
Geranyl acetate, Citronellol	Caryophyllene	Elemol
δ-cardinene	Citronellene	Terpinen-4-ol
Camphene	γ-terpinene	Terpinolene
Nerolidol	P-elemene	Acetate

ที่มา: ดัดแปลงจาก ชลลดา (2546)

การทำแห้ง

การทำแห้งหรือการอบแห้ง (Drying) คือ กระบวนการนำน้ำออกจากวัตถุดิบที่ต้องการทำให้ปริมาณน้ำในวัตถุดิบลดลง (ความชื้นลดลง) โดยส่วนใหญ่น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุนั้นอาจจะไม่ต้องระเหยที่จุดเดือดแต่ใช้อากาศพัดผ่านวัตถุดิบเพื่อดึงน้ำออกมา เมื่อทำให้ของเหลวในวัตถุดิบระเหยเป็นไอ จะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่มีสัดส่วนของเหลวต่ำลง โดยส่วนใหญ่กระบวนการทำแห้งมักจะเป็นส่วนสุดท้ายของกระบวนการผลิต ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำแห้งแล้วจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จทันที ดังนั้น การทำแห้งไม่สม่ำเสมอ เช่น ผลิตภัณฑ์ไม่แห้งหรือแห้งเกินไป หรือรูปร่างของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งปริมาณผลผลิตที่ได้จึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2547)

การอบแห้งมีด้วยกันหลายวิธี โดยทั่วไปทำได้โดยการตากแดด หรือใช้เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อน การใช้การอบแห้งแบบต่าง ๆ นี้ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก (ชาลีดา, 2555) พลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งและให้ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรม นับวันพลังงานมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการนำพลังงานมาใช้จึงมีการคิดค้นกระบวนการต่าง ๆ ที่จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสุดและสูญเสียน้อยที่สุด (วิโรจน์ และคณะ, 2551)

1. หลักการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นหน่วยปฏิบัติการทางวิศวกรรมอาหารซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนไปยังอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพที่มีความชื้นสูงเพื่อไล่ความชื้นหรือน้ำออกจากอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพโดยการระเหยน้ำ ทั้งนี้คุณภาพของอาหารจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทั้งนี้ความร้อนเกิดการถ่ายเทได้ 3 วิธีได้แก่

1.1 การนำความร้อน (Conduction) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการเคลื่อนที่โดยตรงจากพลังงานของโมเลกุลภายในของแข็ง

1.2 การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยกลุ่มโมเลกุลที่เกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกัน

1.3 การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทางโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางเป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีที่เกิดในช่วงความยาวช่วงคลื่น 0.1-100 μm จัดเป็นรังสีความร้อน (Thermal radiation)

การเคลื่อนที่ของน้ำเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากภายในชิ้นอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพออกมาบริเวณผิว ประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่ด้วยแรงผ่านช่องแคบ (Capillary force) เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเซลล์โปร่ง และมีช่วงว่างระหว่างเซลล์ต่อเนื่องกันเป็นทางแคบ ๆ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันของน้ำขึ้นมาตามท่อ การเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้สะดวกรวดเร็วแต่จะหยุดเมื่อน้ำในทางแคบ ๆ ขาดตอนลง และการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ผ่านเซลล์เป็นการเคลื่อนที่ในอาหารที่มีเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ หรือเกิดในอาหารที่อบแห้งไประยะหนึ่งแรงที่ผ่านไปในช่องแคบหมดไปแล้ว น้ำจะต้องแพร่ผ่านเซลล์จึงทำให้เคลื่อนที่ได้ช้า (วิไล, 2547)

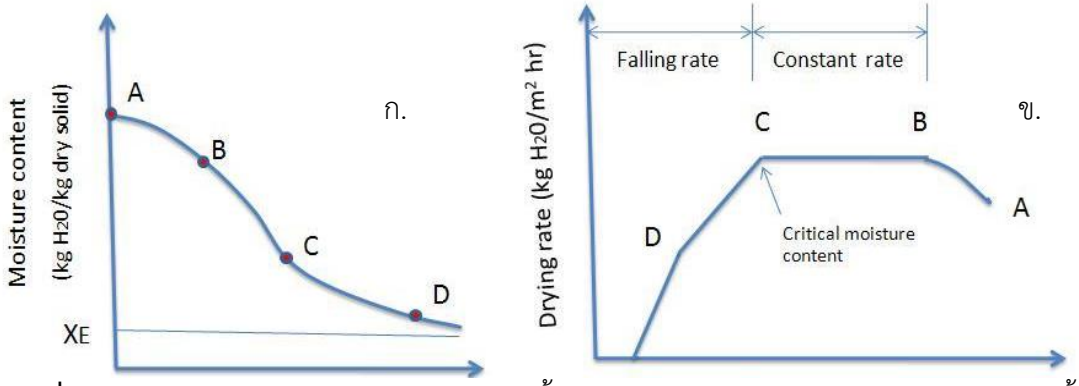
2. อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

อัตราการอบแห้ง คือ อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลาระหว่างการทำแห้ง (Dehydration) ซึ่งอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสมบัติของอาหารเริ่มต้นก่อนการทำแห้งของอาหารนั้น ๆ เช่น ความหนาแน่น ความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสมดุล ภายใต้สภาวะการอบแห้งนั้น ๆ และสภาวะแวดล้อมระหว่างการทำแห้ง เช่น ชนิดของเครื่องทำแห้ง (Drier) อุณหภูมิ เวลา ความชื้นสัมพัทธ์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) เป็นต้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความชื้นเพื่อดูการลดความชื้นในช่วงเวลาอบแห้งในแต่ละชั่วโมง อยู่ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งคงที่ เช่น มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมคงที่ การเปลี่ยนแปลงมวล และอุณหภูมิของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ดังในแสดงภาพที่ 2 ระหว่างอัตราการทำแห้งและความชื้นในสารนั้น (Moisture content) แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

2.1. ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period-AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหารมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลาง อัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

2.2. ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า พลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุอย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลงความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

2.3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการอบแห้งจะลดลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว, 2554)



ภาพที่ 2 ก).ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความชื้นในการอบแห้ง ข).ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและอัตราการอบแห้ง

ที่มา: นิตยา และพิมพ์เพ็ญ (2552)

3. ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

1. ลักษณะธรรมชาติของอาหาร อาหารที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความพรุน (Porosity) มากจะมีอัตราการอบแห้งเร็ว เนื่องจากน้ำในอาหารสามารถเคลื่อนจากภายในออกมาภายนอกได้ง่าย

นอกจากนี้อาหารที่มีพื้นที่ผิวมาก อัตราการอบแห้งสามารถเกิดได้เร็วเช่นกัน ทั้งนี้ก็เนื่องจากพื้นที่การระเหยของน้ำในวัสดุเพิ่มขึ้นมากนั่นเอง

2. ขนาด รูปร่าง ปริมาตร และพื้นที่ผิวของอาหาร เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหารที่มีผลต่อการทำแห้ง อาหารที่มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากจะมีพื้นที่ระเหยน้ำมาก จะมีอัตราการทำแห้งเร็วขึ้น ดังนั้นหากอาหารที่มีความหนามากอัตราการอบแห้งจะช้ากว่าอาหารที่มีความหนาน้อยกว่า เนื่องจากอัตราการทำแห้งจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของอาหาร

3. ปริมาณของอาหารที่นำมาอบแห้ง อาหารที่นำมาอบแห้งในปริมาณมาก ๆ จะมีอัตราการอบแห้งที่ช้า เนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถสัมผัสกับอาหารที่นำมาอบแห้งได้อย่างทั่วถึง จึงไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอาหารได้จึงทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง

4. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และความชื้นจำเพาะ (Specific humidity) ของอากาศเป็นสิ่งสำคัญมาก การระเหยน้ำออกจะทำได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับความชื้นของอากาศและความเร็วลม

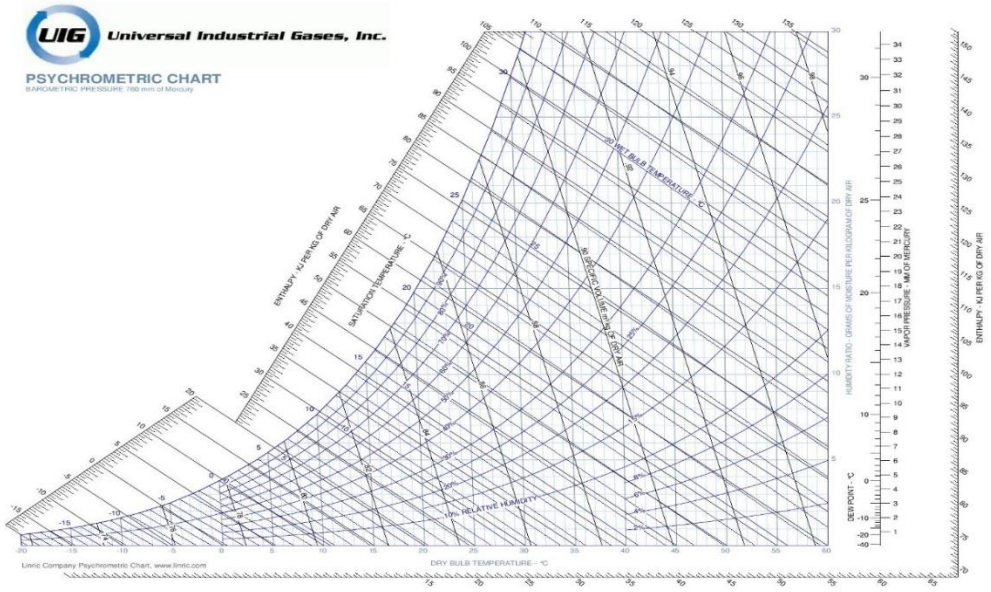
5. ความดัน เกี่ยวเนื่องกับการระเหยของน้ำ เนื่องจากในที่ความดันต่ำ ๆ ลงมา น้ำจะเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ดังนั้นการทำแห้งภายใต้ความดันจะทำให้อัตราการทำแห้งเร็วขึ้น

โดยคุณสมบัติของอากาศชื้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

- ความดันไอ (P_v) หมายถึง ส่วนของความดันย่อยที่กระทำต่อโมเลกุลของไอน้ำในอากาศชื้น ถ้าอากาศนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำจะเรียกความดันไอชนิดนี้ว่า ความดันไออิ่มตัว (P_{vs}) มีหน่วยเป็น kPa
- ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำในอากาศต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน มีหน่วยเป็น %RH
- เอนทาลปี (h) หมายถึง ปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศ มีหน่วยเป็น kJ/kg
- ปริมาตรจำเพาะ (V) หมายถึง ปริมาตรอากาศต่อหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น m^3/kg
- อัตราส่วนความชื้น (w) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวลมีหน่วยเป็น $kg_{water}/kg_{dry\ air}$
- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (T_{db}) หมายถึง อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไปโดยปกติเมื่อกล่าวถึงอุณหภูมิโดยทั่วไปจะหมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) หมายถึง อุณหภูมิที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่มีกระเปาะหุ้มด้วยสำลีหรือผ้าชุบน้ำ มีหน่วยเป็น $^{\circ}C$

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_{dp}) หมายถึง อุณหูมิที่ไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเป็นหยดน้ำเมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็นลง มีหน่วยเป็น °C

การวิเคราะห์คุณสมบัติของอากาศชื้นในทางปฏิบัติสามารถอ่านค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นได้จากแผนภูมิอากาศชื้น ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติอากาศ 7 ค่า ได้แก่ 1) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง 2) อุณหภูมิกระเปาะเปียก 3) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง 4) อัตราส่วนความชื้น 5) ความชื้นสัมพัทธ์ 6) ปริมาตรจำเพาะ และ 7) เอนทาลปี โดยตัวอย่างของแผนภูมิอากาศชื้นแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

ที่มา: Brooker et al. (1992)

จากภาพที่ 3 การอ่านค่าคุณสมบัติอากาศชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้นข้างต้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติอากาศชื้นเริ่มต้น 2 ค่า จากสมบัติอากาศชื้น 7 ค่าจุดตัดของทั้ง 2 นั้นแสดงดังภาพที่ 4 ที่ตำแหน่ง ก ลากเส้นความสัมพันธ์จากจุดตัดบนแผนภูมิอากาศชื้น (Brooker et al., 1992) ตัวแปรต่างๆที่เหลือสามารถอ่านค่าได้ดังนี้

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature; T_{db}) คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ทั่วไปมีหน่วยเป็น °C หรือ °F การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งบนแผนภูมิอากาศชื้นนั้นได้จากการเส้นตรงในแนวดิ่งโดยตัวเลขของอุณหภูมิจะอยู่ด้านล่างของแผนภูมิ ดังภาพที่ 4 (ก)

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature; T_{dp}) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศชื้นเริ่มกลั่นตัวเป็นหยดน้ำบนพื้นผิวที่อากาศชื้นนั้นสัมผัสมีหน่วยเป็น °C หรือ °F โดยจะอ่านค่าได้จากเส้นตรงในแนวนอน ตัวเลขที่แสดงใช้ตัวเลขเดียวกันกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่แสดงอยู่บนส่วนโค้งด้านซ้ายของแผนภูมิหรือเส้นความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 100% ดังภาพที่ 4 (ข)

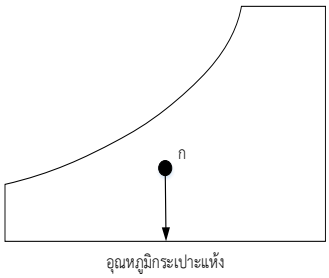
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature; T_{wb}) คือ อุณหภูมิของอากาศที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์ที่หุ้มด้วยสำลีหรือผ้าชุ่มน้ำ โดยอุณหภูมินี้จะอ่านค่าได้ต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งเมื่อวัดในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อน้ำระเหยจากผ้าสู่บรรยากาศจะดึงเอาความร้อนไปด้วยทำให้ผ้าที่หุ้มกระเปาะอยู่เย็นตัวลง สำหรับในกรณีที่อากาศมีไอน้ำอิ่มตัวแล้วหรือความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH น้ำจะไม่สามารถระเหยจากผ้าได้ทำให้ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่อ่านได้จะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง อุณหภูมิกระเปาะเปียกมีหน่วยเป็น °C หรือ °F ในแผนภูมิอากาศชื้นอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะแห้งไปตัดเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 100%RH แล้วลากลงตั้งฉากกับแกนราบ อ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกจากแกนราบ ดังภาพที่ 4 (ค)

- เอนทาลปี (Enthalpy; h) คือ ค่าปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในอากาศขณะนั้น มีหน่วยเป็น $kJ/kg_{\ dry\ air}$ ในแผนภูมิอากาศชื้นจะใช้เส้นที่ลากขนานกับเอนทาลปีซึ่งเป็นเส้นในแนวเดียวกับเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกไปตัดเส้นเอนทาลปี ดังภาพที่ 4 (ง)

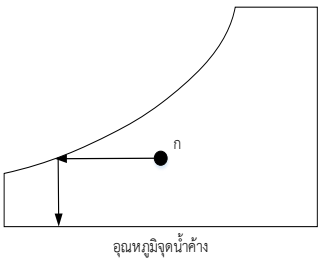
- อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio; w) คือ ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวล มีหน่วยเป็น $kg_{\ water}/kg_{\ dry\ air}$ โดยค่าอัตราส่วนความชื้นนี้จะบอกถึงปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งค่านี้จะมีความสำคัญที่จะบอกว่าอากาศนั้น ๆ จะสามารถรับน้ำได้อีกเท่าใด ในแผนภูมิอากาศชื้นอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับแกนราบให้ไปตัดเส้นอัตราส่วนความชื้นที่แกนอัตราส่วนความความชื้นทางขวามือ อ่านค่าอัตราส่วนความชื้นจากแกนอัตราส่วนความชื้น ดังภาพที่ 4 (จ)

- ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume; V) คือ ปริมาตรของอากาศต่ออากาศแห้ง มีหน่วยเป็น $m^3/kg_{\ dry\ air}$ จากแผนภูมิอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นปริมาตรจำเพาะผ่านจุดที่กำหนด การอ่านค่าปริมาตรจำเพาะจะใช้วิธีการประมาณค่าจากตำแหน่งระหว่างเส้นปริมาตรจำเพาะ 2 เส้น ดังภาพที่ 4 (ฉ)

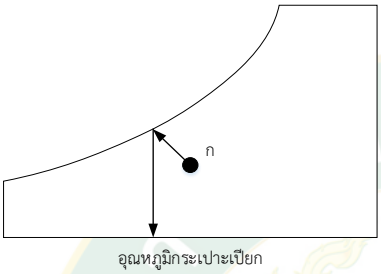
- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศขณะนั้นกับความดันไอน้ำที่มีมากที่สุดอากาศนั้นจะสามารถรับไว้ได้ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%RH) จากแผนภูมิอ่านได้จากเส้นที่ลากขนานกับเส้นความชื้นสัมพัทธ์ผ่านจุดที่กำหนดการอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์จะใช้วิธีประมาณค่าจากตำแหน่งระหว่างเส้นความชื้นสัมพัทธ์ 2 เส้น เช่นเดียวกับการอ่านค่าปริมาตรจำเพาะ ดังภาพที่ 4 (ช)



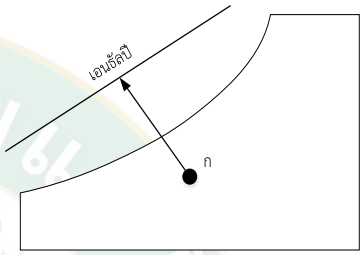
(ก) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง



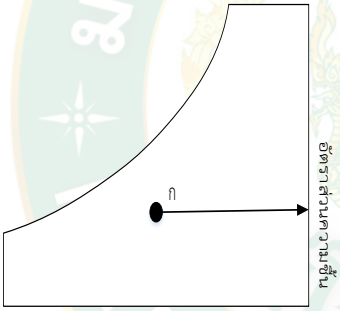
(ข) การอ่านค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง



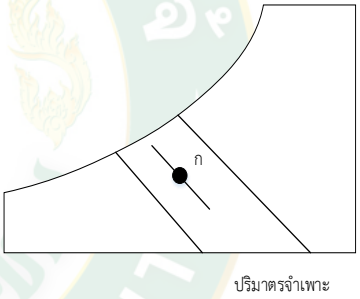
(ค) การอ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก



(ง) การอ่านค่าเอนธัลปี



(จ) การอ่านค่าอัตราส่วนความชื้น



(ฉ) การอ่านค่าปริมาตรจำเพาะ

(ช) การอ่านค่าความชื้นสัมพัทธ์

ภาพที่ 4 การอ่านค่าสมบัติความชื้นจากแผนภูมิอากาศชื้น (Psychrometric chart)

ที่มา: Brooker et al. (1992)

4. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content)

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพซึ่งโดยทั่วไปจะบอกได้ 2 แบบ คือเมื่อเทียบกับมวลทั้งหมดของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เรียกว่าความชื้นน้ำหนักเปียก และเมื่อเทียบกับมวลแห้งของอาหารหรือวัสดุทางชีวภาพ เรียกว่าความชื้นน้ำหนักแห้ง ซึ่งสมการ (1)-(2) แสดงการคำนวณค่าความชื้นทั้งสองมาตรฐาน ซึ่งความชื้นน้ำหนักแห้งนิยมใช้ในเอกสารวิชาการเนื่องจากน้ำหนักแห้งจะมีค่าคงที่เสมอไม่เปลี่ยนไปตามระยะเวลาการอบแห้งดังนั้นจึงง่ายในการอ้างอิง

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{W - D}{W} \times 100 \tag{1}$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_D = \frac{W - D}{D} \times 100 \tag{2}$$

เมื่อ M_w คือ มวลของน้ำในอาหาร (%)

M_D คือ มวลของแข็งในอาหาร (%)

W คือ มวลของวัสดุเปียก (g)

D คือ มวลของวัสดุแห้ง (g)

สำหรับหน่วยของความชื้นนั้นสามารถบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ตัวย่อด้านท้ายคือ $\%_{wb}$ หมายถึงเปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียก) และ $\%_{db}$ หมายถึงเปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) และปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยจากวัสดุ

$$m_w = m - d \tag{3}$$

เมื่อ m_w คือ ปริมาณน้ำที่ต้องการระเหยออกจากวัสดุ (g)

m คือ มวลของวัสดุก่อนการอบแห้ง (g)

d คือ มวลของวัสดุหลังการอบแห้ง (g)

5. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content)

ความชื้นสมดุล หมายถึง ปริมาณความชื้นของวัสดุที่อยู่ในสภาวะสมดุลกับสิ่งแวดล้อมภายนอก วัตถุชื้นจะไม่มีการดูดและคายความชื้นจากอากาศรอบๆจึงมีอัตราการทำแห้ง (drying rate) เป็นศูนย์ มีค่าความชื้นคงที่ ความชื้นจะไม่ลดลงอีก ภาวะสมดุลจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ถ้าต้องการให้ความชื้นลดลงจากนี้ต้องเปลี่ยนสภาวะการอบ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุ เช่น ลดขนาด (นิตยา และพิมพ์เพ็ญ, 2559)

6. ประโยชน์ของการอบแห้ง โดยทั่วไปแล้วการอบแห้งมีประโยชน์ดังนี้

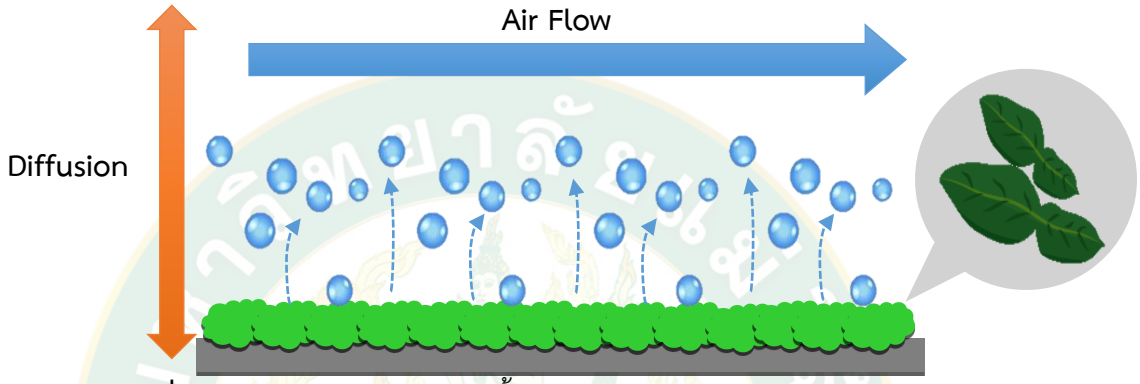
6.1. เพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักขณะก่อน และหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรขณะที่ยังมีความสดสามารถลดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการร่วงหล่น การถูกสัตว์ เช่น นก หนู กินเป็นอาหาร นอกจากนั้นยังช่วยลดระยะเวลาในการเพาะปลูก ทำให้เกษตรสามารถที่จะปลูกพืชครั้งต่อไปได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์จากที่ดินอย่างคุ้มค่า

6.2. เพื่อลดการเสื่อมคุณภาพของผลผลิตขณะเก็บรักษา โดยเฉพาะผลผลิตที่มีความชื้นสูง เช่น ผัก และผลไม้ ซึ่งมีโอกาสเสี่ยงที่จะถูกทำลายได้ง่ายจากเชื้อราและจุลินทรีย์และความร้อนที่เกิดจากการหายใจของผลผลิตทางการเกษตร ทำให้จุลินทรีย์ต่าง ๆ เจริญเติบโตได้รวดเร็ว

6.3. เพื่อช่วยให้เกษตรกร ขายผลผลิตได้ในราคาที่สูงขึ้น ป้องกันปัญหาการล้นตลาดของผลผลิต ช่วยเพิ่มอำนาจการต่อรองของเกษตรกรกับพ่อค้าคนกลางได้มากยิ่งขึ้น และยังทำให้มีผลผลิตบริโภคได้ตลอดทั้งปี นอกจากนั้นแล้วการอบแห้งยังเป็นการลดปริมาตรและน้ำหนักของผลผลิต ซึ่งทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการเก็บรักษา (จิรภรณ์ และอรวรรณ, 2540)

การอบแห้งลมร้อน

การอบแห้งลมร้อนนี้เป็นวิธีการอบแห้งที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีความสะดวกต่อการปฏิบัติและง่ายต่อการควบคุม โดยจะทำการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารและปริมาณน้ำอิสระ (Water activity: a_w) เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ส่งผลให้อาหารเสื่อมเสีย ทำให้สามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนานขึ้น

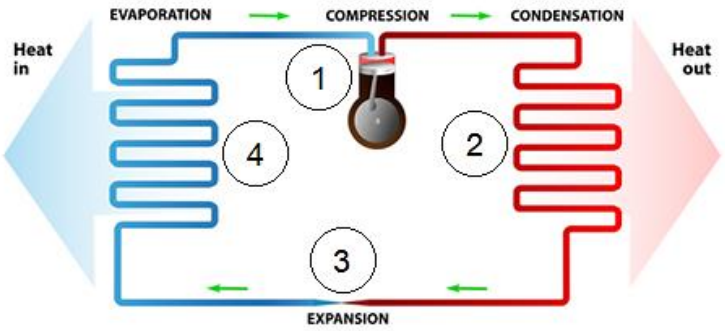


ภาพที่ 5 กลไกการถ่ายเทมวลหรือน้ำของใบมะกรูดในการอบแห้งด้วยลมร้อน

กลไกลการถ่ายเทมวลของการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงดังภาพที่ 5 จะเริ่มจากการถ่ายเทพลังงานจากลมร้อนไปสู่อาหารโดยการพาความร้อน ส่งผลทำให้ความชื้นที่ผิวหน้าเข้าสู่อุณหภูมิระเหย ส่วนความชื้นที่อยู่ภายในจะค่อย ๆ แพร่กระจายมายังผิวโดยอัตราการแพร่กระจายความชื้นจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของการถ่ายเทความร้อน และความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อความชื้นลดลงจนเข้าสู่ค่าความชื้นวิกฤติ และชั้นความแห้งเกิดขึ้นประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานลดต่ำลงอย่างมาก แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนต้องมีตัวกลางทางความร้อนเพื่อถ่ายเทพลังงานไปสู่ความชื้นภายในผลผลิต ทำให้ต้องใช้เวลายาวนานในการระเหยความชื้นจากชั้นในโครงสร้างเซลล์ และยังส่งผลต่อ คุณภาพอาหารในด้านต่าง ๆ เช่น อาหารเกิดการหดตัว การเกิดเปลือกแข็ง การสูญเสียคุณค่าทางอาหาร สารระเหย การเปลี่ยนแปลงสี และการเกิดสีน้ำตาล เป็นต้น

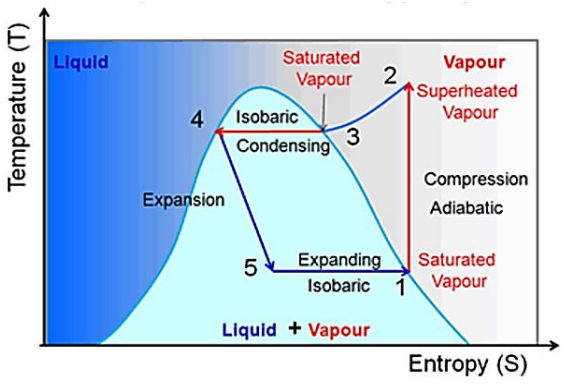
การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อน คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างความร้อน มีหลักการทำงานเหมือนระบบทำความเย็นแบบอัดไอ (Vapor Compression Cooling) ทั่วไป ปั๊มความร้อนประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชิ้น คือ1) เครื่องอัดไอ (Compressor) 2) เครื่องควบแน่น (Condenser) 3) วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) และ 4) เครื่องระเหย (Evaporator) ดังภาพที่ 6 และวัฏจักรทำงานของปั๊มความร้อนสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ปั๊มความร้อน 1) เครื่องอัดไอ (Compressor) 2) เครื่องควบแน่น (Condenser) 3) วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) และ 4) เครื่องระเหย (Evaporator)

ที่มา: EDF Energy (2021)



ภาพที่ 7 T-s ไดอะแกรมของปั๊มความร้อน

ที่มา: Woodbank Communications (2005)

1. กระบวนการภายในเครื่องอัดไอ (Compressor)

กระบวนการภายในเครื่องอัดไอ คือ กระบวนการ 1 - 2 เครื่องอัดไอทำการอัดสารทำความเย็นจากสถานะไออิ่มตัว (Saturated Vapour) ด้วยกระบวนการเอนทาลปีคงที่ (Isentropic) ทำให้สารทำความเย็นมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นจนเปลี่ยนสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapour) และไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่น (Condenser) จากภาพที่ 7 พลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$W_{com} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_1) \tag{4}$$

เมื่อ W_{com} คือ พลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ หน่วย kW

$\dot{m}_{ref}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน หน่วย kg/s

h_2 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่เครื่องอัดไอ หน่วย kJ/kg

h_1 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่เครื่องควบแน่น หน่วย kJ/kg

2. กระบวนการภายในเครื่องควบแน่น (Condenser)

กระบวนการภายในเครื่องควบแน่น คือ กระบวนการ 2-3 สารทำความเย็นสถานะไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapour) ไหลเข้าสู่เครื่องควบแน่นและถ่ายเทความร้อนออกสู่น้ำหรืออากาศที่ไหลผ่านควบแน่นทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิลดลงภายใต้สภาวะความดันคงที่ (Isobaric) จนเปลี่ยนสภานะเป็นไออิ่มตัว

กระบวนการ 3-4 สารทำความเย็นสถานะไออิ่มตัวภายในเครื่องควบแน่นถ่ายเทความร้อนออกและควบแน่นภายใต้สภาวะความดันคงที่จนเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid) จากภาพที่ 7 ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5)

$$Q_{con} = \dot{m}_{ref}(h_2 - h_4) \tag{5}$$

เมื่อ Q_{con} คือ ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่น หน่วย kW

$\dot{m}_{ref}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน หน่วย kg/s

h_2 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่เครื่องควบแน่น หน่วย kJ/kg

h_4 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่วาล์วลดความดัน หน่วย kJ/kg

3. กระบวนการภายในวาล์วลดความดัน (Expansion Valve)

กระบวนการภายในวาล์วลดความดัน คือ กระบวนการ 4-5 สารทำความเย็นสถานะของเหลวอิ่มตัว (Saturated Liquid) ไหลเข้าสู่วาล์วลดความดันและขยายตัวอย่างรวดเร็วทำให้ความดันและอุณหภูมิลดลงจนเปลี่ยนสถานะเป็นของผสมอิ่มตัว (Saturated Mixtures) พบว่าการทำงานของวาล์วลดความดันเป็นตามกระบวนการทรอทลิ่ง ซึ่งเป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ดังสมการที่ (6)

$$h_4 = h_5 \tag{6}$$

เมื่อ h_4 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่วาล์วลดความดัน หน่วย kJ/kg

h_5 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่เครื่องระเหย หน่วย kJ/kg

4. กระบวนการภายในเครื่องระเหย (Evaporator)

กระบวนการภายในเครื่องระเหย คือ กระบวนการ 5-1 สารทำความเย็นสถานะของผสมอิ่มตัว (Saturated Mixtures) อุณหภูมิต่ำไหลเข้าสู่เครื่องระเหยและรับความร้อนภายใต้สภาวะความดันคงที่จนเปลี่ยนสถานะเป็นไออิ่มตัวทั้งหมดไหลเข้าสู่เครื่องอัดไอและดำเนินกระบวนการเป็นวัฏจักรต่อไป) จากภาพที่ 7 ความร้อนที่รับเข้าจากเครื่องระเหยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (7)

$$Q_{evap} = \dot{m}_{ref}(h_1 - h_5) \tag{7}$$

เมื่อ Q_{evap} คือ ความร้อนที่รับเข้าจากเครื่องระเหย หน่วย kW

$\dot{m}_{ref}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำงาน หน่วย kg/s

h_1 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่เครื่องอัดไอ หน่วย kJ/kg

h_5 คือ เอนทาลปีของสารทำงานขณะเข้าสู่เครื่องระเหย หน่วย kJ/kg

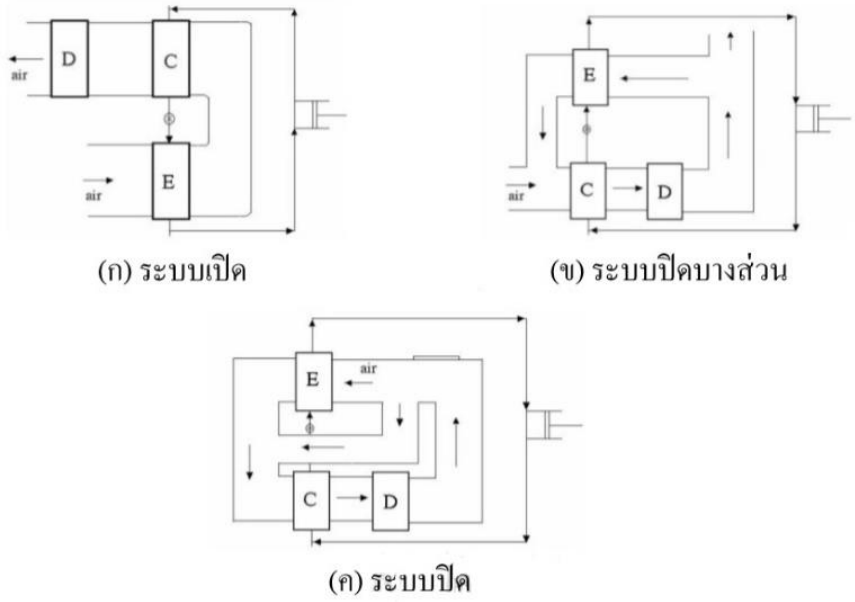
ความร้อนที่ได้จากปั๊มความร้อนเกิดขึ้นบริเวณเครื่องควบแน่น (Condenser) โดยสารทำความเย็นที่ถูกอัดจากเครื่องอัดไอเข้าสู่เครื่องควบแน่นจะมีความดันและอุณหภูมิสูง เครื่องควบแน่นนี้ทำหน้าที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) โดยไอสารทำความเย็นอุณหภูมิสูงดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำหรืออากาศที่ไหลผ่านเครื่องควบแน่นทำให้น้ำหรืออากาศนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

การอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงาน ได้ 3 ระบบคือ

1.การอบแห้งระบบเปิด (Open system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำ ถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วทำ ให้มีความชื้นสูงขึ้น อากาศนี้จะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศทั้งหมด ซึ่งการอบแห้งระบบเปิดนี้จะมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนในการอุ่นอากาศเพียงอย่างเดียวหรืออาจมีการลดความชื้นอากาศก่อนปล่อยสู่บรรยากาศก็ได้ลักษณะการอบแห้งระบบเปิดแสดงในภาพี่ 8 (ก)

2. การอบแห้งระบบปิดบางส่วน (Partial closed system) เมื่ออากาศร้อนซึ่งมีความชื้นต่ำถูกนำไปใช้อบแห้งแล้วจะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งจะถูกลดความชื้นก่อนนำกลับมาใช้ผสมกับอากาศใหม่ การอบแห้งรูปแบบนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและลดความชื้นอากาศลักษณะการอบแห้งระบบปิดบางส่วนแสดงในภาพที่ 8 (ข)

3. การอบแห้งระบบปิด (Closed system) การอบแห้งรูปแบบนี้จะนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด โดยอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกจะถูกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนหนึ่งจะนำมาผสมกับอากาศส่วนแรกที่ผ่านการลดความชื้นแล้วการอบแห้งระบบปิดนี้จึงมีการใช้ประโยชน์จากระบบปั๊มความร้อนทั้งการอุ่นอากาศและการลดความชื้น ลักษณะการอบแห้งระบบปิดแสดงในภาพที่ 8 (ค)



ภาพที่ 8 ระบบการทำงานของเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน

ที่มา: เทวรัตน์ (2555)

เนื่องจากเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเป็นการรวมเอาส่วนประกอบหลักสองส่วนเข้าด้วยกันคือ ส่วนอบแห้งกับระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นการออกแบบระบบปั๊มความร้อนจึงต้องมีความสัมพันธ์กับส่วนอบแห้ง สำหรับการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนแบบปิด เมื่อพิจารณาที่วงจรอากาศ ภาพที่ 8 (ค) จะพบว่าอากาศหลังการอบแห้งที่เวียนกลับมาใช้ใหม่จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปลดความชื้นที่เครื่องทำระเหย อีกส่วนจะไหลข้ามเครื่องทำระเหย (Bypass) ไปผสมกับอากาศส่วนแรก แล้วนำไปอุ่นที่เครื่องควบแน่นต่อไป (เทวรัตน์, 2555)

การอบแห้งแบบผสมผสาน (Hybrid Drying)

การอบแห้งแบบผสมผสานเป็นการใช้เครื่องอบแห้งหลายลักษณะหรือหลายขั้นตอนในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบขั้นตอนเดียว โดยมีลักษณะการทำงานหลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกันแต่มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของการทำแห้งในแต่ละขั้นตอน การเปลี่ยนความดัน หรือการพักในที่อับอากาศระหว่างการอบแห้ง หรือการนำวิธีการทำแห้งแบบต่าง ๆ หรือใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันมาใช้ร่วมกัน เพื่อผสมผสานข้อดีของเครื่องอบแห้งแต่ละชนิด โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มอัตราการอบแห้ง อีกทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดการใช้พลังงาน (Kudra and Mujumdar, 2009) การทำแห้งแบบผสมผสานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่

1. Combined modes of heat transfer คือ การผสมผสานลักษณะการถ่ายเทความร้อนหลาย ๆ ประเภทเข้าด้วยกัน แบ่งเป็นลักษณะต่างๆ เช่น

- Convection and Conduction คือ การพาความร้อนร่วมกับการนำความร้อน
- Convection and Microwave/Radio-frequency/Infrared radiation คือ การพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสี เช่น คลื่นไมโครเวฟ, คลื่นวิทยุ, รังสีอินฟราเรด

2. Multistage dryer คือ การทำแห้งแบบหลายขั้นตอน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

-Each stage same dryer type คือ การทำแห้งหลายขั้นตอนโดยแต่ละขั้นตอนจะใช้เครื่องอบแห้งชนิดเดียวกัน

- Each stage a different dryers คือ การทำแห้งหลายขั้นตอนโดยใช้เครื่องอบแห้งหลายชนิด

- Different drying technologies per stage คือ การใช้เครื่องอบแห้งต่างชนิดกันในแต่ละขั้นตอน

3. Multiprocessing dryer คือ การทำแห้งร่วมกับกระบวนการอื่น ๆ เช่น

- Drying and Cooling คือ การอบแห้งร่วมกับการทำเย็น
- Drying and Granulation/Agglomeration คือ การอบแห้งร่วมกับการขึ้นรูปเป็นอนุภาค
- Drying and Coating คือ การอบแห้งร่วมกับการเคลือบ
- Drying and Filtration คือ การอบแห้งร่วมกับการกรอง

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งสามารถพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

1. ค่าอัตราการอบแห้ง (Drying Rate; DR) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อระยะเวลาในการอบแห้ง หรือปริมาณความชื้นต่อระยะเวลาในการอบแห้ง โดยค่าอัตราการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$DR = \frac{w_i - w_f}{t} \tag{8}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg $_{water}$/h หรือ $\%_{db}$/h)
w_i คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (kg)
w_f คือ น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)
t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2. ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific Moisture Extraction Rate, SMER) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมดตลอดการอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9

$$SMER = \frac{w_i - w_f}{P_E} \tag{9}$$

เมื่อ $SMER$ คือ อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (kg $_{water}$/kWh)
P_E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh)

3. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ค่าที่แสดงถึงพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งเป็นค่าส่วนกลับของ SMER สามารถคำนวณจากสมการที่ 10

$$SEC = \frac{3.6 P_E}{w_i - w_f} \tag{10}$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kg $_{water}$)

4) ประสิทธิภาพของระบบอบแห้ง (Effectiveness) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$\eta_{system} = \frac{m_w h_{fg}}{E_{total}} \times 100\% \quad (11)$$

เมื่อ η_{system} คือ ประสิทธิผลของระบบอบแห้ง (%)

m_w คือ มวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัตถุดิบ (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)

E_{total} คือ พลังงานไฟฟ้ารวมที่ป้อนให้กับระบบ (kJ)

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

แบบจำลองการอบแห้ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของการออกแบบวิธีการอบแห้งให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องทั้งในด้านวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ ผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตตภัณฑ์ ดังนั้นการทดลองเพื่อหาสภาวะอบแห้ง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบระบบการอบแห้งแบบต่าง ๆ เนื่องจากสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลสารและความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งตลอดจนการหาสภาวะอบแห้งที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งแบบต่าง ๆ ได้ดี ปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งจะถูกนำไปใช้ในการจำลองสภาวะการอบแห้งและการศึกษาผลกระทบของปัจจัยด้านต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งตลอดจนการทดสอบและเปรียบเทียบเงื่อนไขในการอบแห้งแบบต่าง ๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งแทนการทดลองจริง ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง จึงมีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบเงื่อนไขในการอบแห้ง (ปองพล, 2557)

จากการสำรวจเอกสารของรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแบบจำลองทางคณิตตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับกระบวนการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร มักจะเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบจำลองเอมไพริคอล (Emperical model) เช่น แบบจำลองของ Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page เป็นต้น ซึ่งรูปแบบความสัมพันธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รูปแบบสมการของแบบจำลองการอบแห้งแบบต่างๆ

Model name	Model expression	References
Newton	$MR = exp\ (-kt)$	Ayensu, 1997
Page	$MR = exp\ (-kt^n)$	Simal, Femenia, 2005
Henderson and Pabis	$MR = a\ exp\ (-kt)$	Yaldiz, Ertekin and Uzun, 2001
Logarithmic	$MR = a\ exp\ (-kt) + c$	Togrul and Pehlivan, 2003
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Ozdemir, Devres, 1999

หมายเหตุ เมื่อ $a\ b\ c\ g\ h\ k_1\ k_2\ n$ คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ และ k คือ สัมประสิทธิ์การอบแห้ง และ t คือ เวลา

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมของการอบแห้งใบมะกรูด สามารถทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เวลาใด ๆ จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation) ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบางใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) มีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการร คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคสแคร์ (Chi-square, χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, *RMSE*) ดังสมการต่อไปนี้

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(MR_{pre,i} - MR_{\exp,i} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(MR_{pred} - MR_{per,i} \right)^2} \right) \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(MR_{\exp,i} - MR_{pre,i} \right)^2}{N - z} \quad (13)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{n} \left(MR_{pre,i} - MR_{\exp,i} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

เมื่อ $MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนาย

$MR_{\exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

MR_{pred} คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการประมาณ

N คือ จำนวนข้อมูลจากการทดลอง

z คือ พารามิเตอร์ในแต่ละแบบการทดลอง

ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

แอคติวิตี้ของน้ำ หรือวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity, a_w) เขียนย่อว่า a_w เป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำ ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้เป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ เราสามารถใช้ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ในการประเมินว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิดใดเป็นหรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเสีย ตลอดจนใช้ในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ เพราะเชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ภายใต้ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ที่จำกัด โดยเราจะทำให้อาหารมีค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ต่ำกว่าที่เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียเกือบทุกชนิดไม่สามารถเจริญเติบโตได้ที่ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ต่ำกว่า 0.9 และราส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ต่ำกว่า 0.7

วอเตอร์แอคทีวิตี้มีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหารในอาหารจะประกอบด้วยน้ำอยู่ 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งเป็นน้ำที่อาหารยึดไว้ เรียกว่า Bound moisture content จุลินทรีย์จะนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างยาก อีกส่วนหนึ่งคือน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ องค์ประกอบของสารอาหารเรียกน้ำส่วนนี้ว่า น้ำที่เป็นประโยชน์ (Available water) หรือวอเตอร์แอกติวิตี จุลินทรีย์สามารถนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้ ซึ่งค่าวอเตอร์แอกติวิตี สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 15

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{E.R.H.}{100} \qquad (15)$$

เมื่อ a_w คือ Water activity, decimal

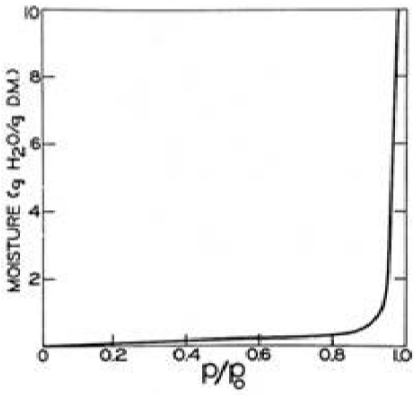
P คือ ความดันไอของน้ำของเหลวในอาหารที่ต้องการทราบ

P_0 คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน

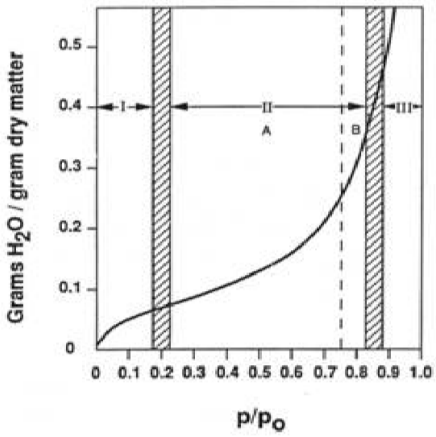
$E.R.H.$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ที่จุดสมดุล (Equilibrium relative humidity)

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตีออกมาเป็นกราฟเรียกว่า กราฟไอโซเธอร์มการดูดซับความชื้น (Moisture sorption isotherm) ถ้าอาหารมีความชื้นน้อยจะดูดความชื้นจากอากาศเรียก Adsorption isotherm ถ้าอาหารมีความชื้นมากจะสูญเสียความชื้นแก่ อากาศเรียกว่า Desorption isotherm น้ำที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีสูงสุด ได้แก่ น้ำ

บริสุทธิ์และเมื่อมีชีวะสารปนอยู่ในน้ำจะทำให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตีในอาหารลดลง ดังภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกติวิตีในอาหาร และปริมาณความชื้นในอาหารจำพวกอาหารสด และภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวอเตอร์แอกติวิตี ในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารเมื่อมีความชื้นต่ำ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงน้ำในบริเวณ I ของกราฟจะเป็นส่วนที่ถูกเกาะเกี่ยวไว้อย่างแน่นหนา มีการเคลื่อนที่ไว้น้อยที่สุดไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้ที่ -40°C เป็นน้ำโมโนเลเยอร์ ส่วนน้ำในบริเวณ II ของกราฟส่วนใหญ่ไม่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งได้ที่ -40°C แต่เมื่อรวมกับของแข็งแล้วทำให้เกิดลักษณะพลาสติกเป็นน้ำในมัลติเลเยอร์และน้ำในแคพพิลลารี่ น้ำจากทั้ง 2 บริเวณนี้มีน้อยกว่า 5% ของอาหารสดที่มีความชื้นสูงทั่วไป น้ำในบริเวณที่ III สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งได้ทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายได้และทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ ดังนั้นค่าวอเตอร์แอกติวิตีจึงเป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดที่มีอยู่เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนั้นยังมีผลกระทบต่อการทำงานของเอ็มไซม์และวิตามินในอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหารได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารและค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารทั่วไป



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแอกติวิตีของน้ำในอาหารและปริมาณความชื้นในอาหารที่มีความชื้นต่ำ

ค่าสี (Color)

สีเป็นสมบัติทางกายภาพของอาหารด้านสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (Optical properties) ที่มีผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค สีของอาหารและผลิตผลทางการเกษตรเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่ง ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติเชิงเรขาคณิต คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากสีเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการรับรู้สัญญาณในรูปของคลื่นแสงที่ตกกระทบดวงตาของมนุษย์ซึ่งมีเซลล์รับและส่งสัญญาณผ่านไปยังสมอง และแปลงค่าเป็นค่าสีต่าง ๆ ตามที่แต่ละบุคคลมีอยู่ในระบบความทรงจำ สีของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร เป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับและไม่ยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตรผิดปกติไป ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับโดยอาจไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่น เช่น กลิ่น รสชาติ หรือเนื้อสัมผัสเลย การเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งเกิดขึ้นได้จากการระเหยของน้ำออกจากผิววัสดุระหว่างการอบแห้ง รวมถึงการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น Enzymatic browning Non-enzymatic browning และ Caramelization reactions โดยปกติแล้วการเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการอบแห้ง เช่น ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง หรือการใช้สารป้องกันการเปลี่ยนแปลงของสี (Color protective agent) หรือ การอบแห้งเป็นช่วง ๆ (Intermittent drying)

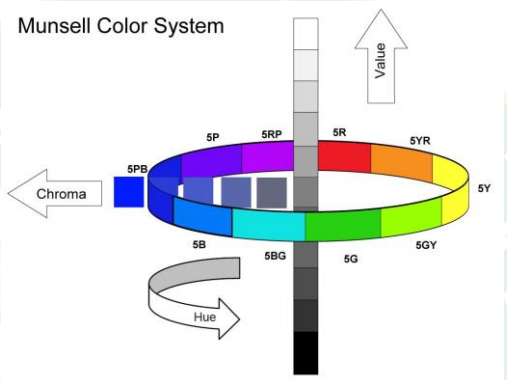
1. การวิเคราะห์สีระบบ CIE L* a* b* (CIE LAB)

ในธรรมชาติแสงเป็นพลังงานที่มีสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีความยาวคลื่นที่ตามองเห็นอยู่ในช่วง 380-780 nm โดยระบบสีที่นิยมใช้ ได้แก่ CIE หรือ Tristimulus system ระบบนี้เป็นระบบที่ Commission International de l’ Eclairage (CIE) ได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี การวัดสีระบบนี้มีข้อดี คือ เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล เป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลข เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณ ดังนั้นการมองเห็นสีของวัตถุที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสีและสายตามนุษย์ ถ้าเราสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขได้ ก็สามารถวัดค่าสีออกมาเป็นตัวเลขได้ โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะ คือ Hue, Value และ Chrome (อนุสรา, 2554)

- Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น (เฉดสี) เป็นชื่อของสีหลักที่แตกต่างกันในระบบ Munsell จะแบ่งออกเป็น 5 สี คือ แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน ม่วง

- Value (Lightness) หมายถึง ความสว่างของสีหรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ หากมีปริมาณแสงที่สะท้อนออกมามากจะทำให้เห็นสีสว่าง ถ้าปริมาณแสงสะท้อนน้อยจะทำให้เห็นสีเข้มหรือมืด มีค่าตั้งแต่ 0 = Black (หมายถึง วัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = White (หมายถึง วัตถุขาวสมบูรณ์)

- Chroma (Saturation) หมายถึง ค่าความบริสุทธ์ (Purtiy) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือ สีที่ไม่มีแสงสีเทามาผสม ซึ่งได้แก่ สีหลัก (Hue) ทั้ง 100 สี แบ่งสเกล เป็น 0 ถึง 100 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเท่าที่ Lightness เดียวกัน



ภาพที่ 11 แผนภาพสีแดง Hue Value และ Chroma

ที่มา: อนุสรา (2554)

ระบบ CIE L* a* b* เป็นระบบสีที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

L* ใช้กำหนดค่าความสว่าง

L = 0 = Perfect black sample

L = 100 = Perfect white sample

a* ใช้กำหนดสีแดง หรือสีเขียว

a เป็น + วัตถุมีสีออกแดง

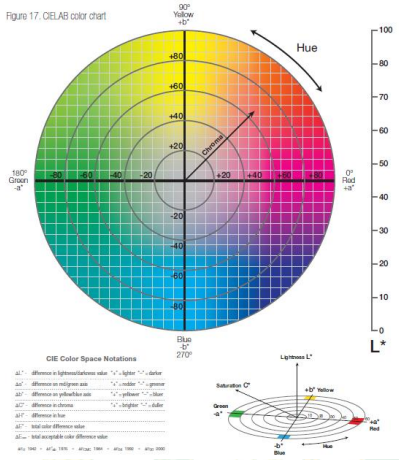
a เป็น – วัตถุมีสีออกเขียว

b* ใช้กำหนดสีเหลือง หรือสีน้ำเงิน

b เป็น + วัตถุมีสีออกเหลือง

b เป็น – วัตถุมีสีออกน้ำเงิน

และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลขนั้น เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 11 จะพบว่าจุด ๆ หนึ่งใน Space นั้นเป็น L^*_1 a^*_1 b^*_1 และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้อีกจุดใน Space เป็น L^*_2 a^*_2 b^*_2 ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันใน Space เท่าไร ก็จะบ่งบอกถึงความแตกต่างของสี



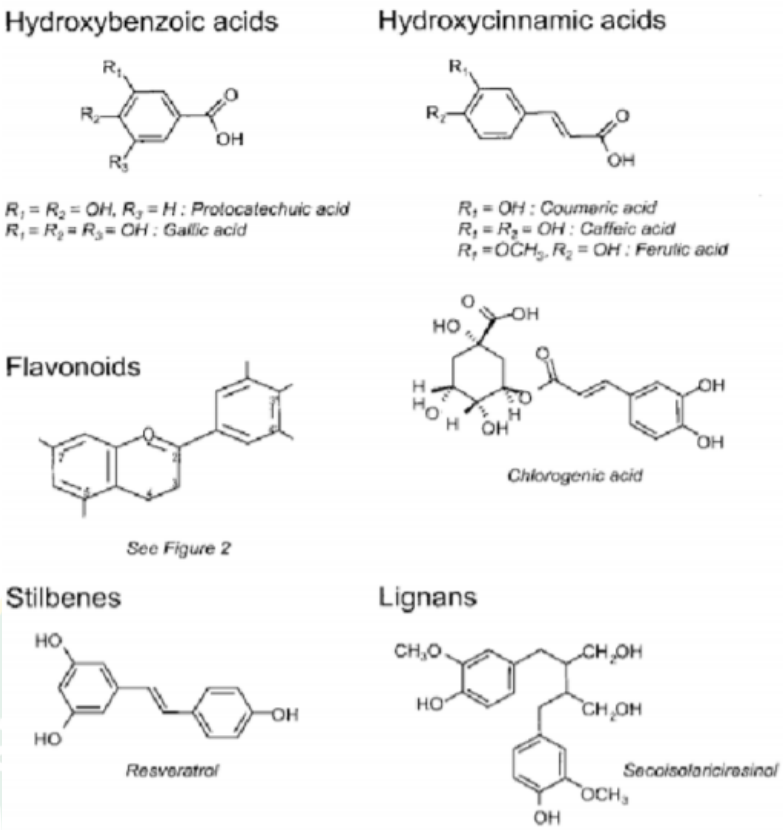
ภาพที่ 12 CIE Lab แสดง L*, a*, b* Color space

ที่มา: อนุสรา (2554)

สารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระ คือโมเลกุลของสารที่สามารถจับกับตัวรับและสามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลสารอื่น ๆ ได้ ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวเนื่องกับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่และทำลายเซลล์ของร่างกาย สารต้านอนุมูลอิสระจะเข้ายุติปฏิกิริยาลูกโซ่เหล่านี้ด้วยการเข้าจับกับสารอนุมูลอิสระและยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยถูกออกซิไดซ์ ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงถือเป็นตัวรีดิวซ์ อาทิ ไธออล กรดแอสคอร์บิก และโพลีฟีนอล (สารานุกรมเสรี, 2562)

โพลีฟีนอล (Polyphenols) เป็นไฟโตนิวเทรียนท์ที่พบได้ทั่วไปในผัก ผลไม้ ธัญพืช พืชตระกูลถั่ว และพืชที่ให้ฝักนอกจากนี้ยังพบใน ไวน์ น้ำส้มสายชูหมัก เบียร์ ชา และโกโก้เป็นต้น จัดเป็นสารประกอบฟีนอลิก โครงสร้างประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกจับกับหมู่ไฮดรอกซิลตั้งแต่ 2 วงขึ้นไปจำแนกได้ตามจำนวนของวงแหวนฟีนอลและธาตุที่มาจับกับวงแหวนนั้น ๆ อาทิ กรดฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ สติลบีน และลิกแนน (Bravo, 1998)



ภาพที่ 13 โครงสร้างทางเคมีของโพลีฟีนอล

ที่มา: Bravo (1998)

โพลีฟีนอล มีคุณสมบัติที่ดีต่อสุขภาพคือ ต้านอนุมูลอิสระ ต้านมะเร็ง ลดระดับของคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน ต้านแบคทีเรีย ไวรัส ป้องกันฟันผุ ฯลฯ คุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ สารจำพวกคาเทชินซึ่งเป็นสารในชาที่มีศักยภาพในด้านประโยชน์กับสุขภาพมากที่สุด ฤทธิ์ของสารพวกนี้ คือ เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยจัดการไอออนของโลหะหนักชนิดของออกซิเจนและอนุมูลอิสระ จากการศึกษาพบว่า EGCG สามารถยับยั้งการทำงานของลิพอกซีเจเนสในถั่วเหลือง (IC 50=10-20 μMn) นอกจากนั้น EGCG ยั้งสามารถยับยั้งการเปลี่ยนแปลงของเบสในดีเอ็นเอของ Hela cells ยับยั้งการเกิดออกซิเดชั่นของ Low-Density Lipoprotein (LDL) ลดการเกิดเปอร์ออกซิเดชันของไขมัน ยับยั้งการสร้าง Reactive oxygen species (ROS) ที่ได้จาก NADPH EGCG ที่เข้มข้นต่ำ ๆ ยังสามารถยับยั้งการเกิดความเสียหายดีเอ็นเอของ Jurkat T-cell โดย Hydrogen peroxide และ 3-morpholinosyd nonimine อย่างไรก็ตาม EGCG ที่มีความเข้มข้นสูงสามารถจะทำให้เกิดการทำลายดีเอ็นเอของเซลล์ได้

โพลีฟีนอลมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตชาและโกโก้ พบว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโพลีฟีนอลในขั้นตอนการหมักวัตถุดิบและการ

เก็บรักษาผลิตภัณฑ์จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีรสชาติและสีที่จำเพาะและเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังมีบทบาทต่อการใช้เป็นสีผสมอาหารและสารกันหืนอีกด้วยโพลีฟีนอลสามารถใช้รักษาโรคได้หลายชนิด อาทิ โรคหัวใจ โรคมะเร็ง โรคเบาหวานโรคอ้วน เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จึงช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคดังกล่าว โพลีฟีนอลยังช่วยป้องกันฟันผุ และต้านเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดได้อีกด้วย

คลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุหรือสารสีเป็นสารประกอบที่พบได้ในส่วนที่มีสีเขียวของพืช โดยพบมากที่ใบของพืชนอกจากนี้ยังพบได้ที่แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ และยังพบได้ในสาหร่ายเกือบทุกชนิด นอกจากนี้คลอโรฟิลล์ทำหน้าที่เป็นโมเลกุลรับพลังงานจากแสง และนำพลังงานดังกล่าวไปใช้ในการสร้างพลังงานเคมีโดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เพื่อสร้างสารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล และนำไปใช้เพื่อการดำรงชีวิต คลอโรฟิลล์อยู่ในโครงสร้างที่เรียกว่า เยื่อหุ้มไทลาคอยด์ ซึ่งเป็นเยื่อหุ้มที่อยู่ภายในคลอโรพลาสต์ คลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงได้ดีที่ช่วงคลื่นของแสงสีฟ้าและสีแดง แต่ดูดกลืนช่วงแสงสีเหลืองและเขียวได้น้อย ดังนั้นเมื่อได้รับแสงจะดูดกลืนแสงสีฟ้าและสีแดงไว้ ส่วนแสงสีเขียวที่ไม่ได้ดูดกลืนจึงสะท้อนออกมา ทำให้เห็นคลอโรฟิลล์มีสีเขียว (ภาคภูมิ, 2550)

ในธรรมชาติมีคลอโรฟิลล์อยู่หลายชนิดด้วยกันซึ่งแต่ล่ะชนิดมีโครงสร้างหลักที่เหมือนกันคือวงแหวนไพรอล 4 วง แต่โซ่ข้างของคลอโรฟิลล์แต่ละชนิดจะมีลักษณะที่ต่างกันออกไป เช่น คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll *a*) และคลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll *b*) มีโครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกันเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น นั่นคือ ที่วงแหวนไพรอล วงที่สองของคลอโรฟิลล์ เอ มีโซ่ข้างเป็นหมู่เมททิล ($-CH_3$) ส่วนของคลอโรฟิลล์ บี เป็นหมู่อัลดีไฮด์ ($-CH_0$) ซึ่งการที่โครงสร้างที่ต่างกันนี้ก็ทำให้มีคุณสมบัติแตกต่างกัน รวมทั้งคุณสมบัติการดูดกลืนแสงก็ต่างกันด้วย และทำให้คลอโรฟิลล์ทั้งสองชนิดนี้มีสีต่างกันเล็กน้อย โดยที่คลอโรฟิลล์ เอ มีสีเขียวเข้ม ส่วนคลอโรฟิลล์ บี มีสีเขียวอ่อน

การสร้างคลอโรฟิลล์เริ่มจากการสร้าง Tetrapyrrole ที่เป็นวง โดยใช้กรดอะมิโน 5-Aminolevulinic acid (ALA) เป็นสารตั้งต้น ในแบคทีเรียสีม่วงบางชนิดสร้างกรดอะมิโนชนิดนี้ขึ้นมาจาก Succinyl CoA และไกลซีน ในไซยาโนแบคทีเรีย และพืชชั้นสูงจะสร้าง ALA โดยใช้กลูตาเมตในรูป Glutamyl-tRNA เป็นสารตัวกลาง การสร้างคลอโรฟิลล์ในพืชเป็นวิถีที่ต้องมีการควบคุมอย่างมาก ในพืชมีดอกและพืชชั้นต่ำและสาหร่ายบางชนิด เช่น ยูกลีนา การเปลี่ยนรูปของ Protochlorophyllidae ไปเป็น Chlorophyllide *a* เป็นขั้นตอนที่เมื่อมีแสง ในอีทิโอพลาสต์ของใบที่เจริญในที่มืด จะสะสม Protochlorophyllidae ในระดับที่ต่ำมาก เมื่อใบพืชได้รับแสง

Protochlorophyllidae จะเปลี่ยนไปเป็น Chlorophyllide *a* อย่างรวดเร็วจนหมด และสร้าง Protochlorophyllidae ขึ้นมาใหม่ ใบที่ถูกแสงจึงกลายเป็นสีเขียวและถ้ามี Protochlorophyllidae เหลืออยู่ การสังเคราะห์จะหยุดลงโดย Protochlorophyllidae จะไปยับยั้งที่ปฏิกิริยาแรกคือยับยั้งการสร้าง ALA แต่ถ้าเพิ่ม ALA จากภายนอกเข้าไปจะเกิดการสังเคราะห์ Protochlorophyllidae ขึ้นได้ (Ford, 1996)

การสลายตัวคลอโรฟิลล์อาจเกิดจากมลพิษได้โดยโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนทำให้คลอโรฟิลล์บีในพืชลดลง ส่วนสารมลพิษที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบและสารกำจัดวัชพืช เช่น ไกลโฟเสตทำให้คลอโรฟิลล์เอลดลง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wannee et al. (2012) ทำการศึกษาสารระเหย สารประกอบอะโรมาและกลิ่นหลักในใบมะกรูดสดและอบแห้ง โดยทำการอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่า Citronellal และ L-linalool เป็นกลิ่นหลักในใบมะกรูด และตัวอย่างใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50°C ไม่ส่งผลต่อกลิ่นหลักในใบมะกรูดเมื่อเทียบกับตัวอย่างใบมะกรูดสด แต่ที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C ส่งผลให้มีการสูญเสียกลิ่นหลักที่สำคัญในใบมะกรูดอย่างชัดเจน และความเข้มข้นของ citronellal และ L-linalool ซึ่งเป็นสารประกอบอะโรมาหลักของใบมะกรูด ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 60 และ 70 °C ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Nurul et al. (2013) ศึกษาผลของการอบแห้งลมร้อน ได้แก่ เวลาในการอบแห้ง 3 - 5 h อุณหภูมิ 40 - 80°C และกำลังการผลิต 0.5 – 2 kg/m^2 ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของใบมะกรูด ประเมินคุณภาพของใบมะกรูดอบแห้งได้แก่ ปริมาณความชื้น กิจกรรมของน้ำ เนื้อสัมผัส (ความเปราะบาง) และค่าสี L, a, b ผลการศึกษาพบว่าสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อน เวลาและอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของใบมะกรูดอบแห้ง และสภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งใบมะกรูดคือ เวลาอบแห้ง 4.9 h อุณหภูมิ 60°C และกำลังการผลิต 1.4 kg/m^2

วศิน (2548) ได้ศึกษาสมรรถนะการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนตลอดจนต้นทุนในการอบแห้ง ซึ่งเครื่องอบแห้งเป็นเครื่องที่ใช้ในอุตสาหกรรมอบแห้งสมุนไพรขนาดเล็กโดยห้องอบมีขนาด 0.83 × 0. 75 × 0.91 m^3 บรรจุถาดอบแห้งได้ 15 ถาด เป็นระบบปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-22 โดยทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 45 และ 50°C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 0.6 m/s สัดส่วนข้ามเครื่องทำระเหยที่ 82% ในงานวิจัยนี้ใช้ใบมะกรูดจำนวน 7.5 kg เป็นวัสดุทดสอบ ความชื้นเริ่มต้น 238%$_{db}$ และอบจนมีความชื้นสุดท้าย 10%$_{db}$ พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C สีใบมะกรูดหลังอบแห้งจะมีสีเหลือง และน้ำตาลบางส่วน ซึ่งไม่ตรงกับความต้องการของตลาด แต่การการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45°C ใบมะกรูดอบแห้งมีสีเขียวใกล้เคียงใบมะกรูดสด ซึ่งคุณภาพจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก โดยใช้เวลาอบแห้ง 12 h โดยมีความชื้นสุดท้าย 10.4%$_{db}$ และอัตราอบแห้งเฉลี่ย 0.41 kg_{water}/h

นัฐราช และคณะ (2013) ประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ระบบปรับอากาศของรถยนต์มาประยุกต์เป็นแหล่งความร้อน ห้องอบมีขนาด 0.6 x 0.6 x 0.8 m^3 ใช้มอเตอร์ 3 แรงม้า เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้ง คือ อัตราการอบแห้ง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ จากการทดสอบอบแห้งขมิ้นชันความชื้นเริ่มต้นประมาณ 525 – 565%$_{db}$ ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 10%$_{db}$ การอบแห้งใช้อุณหภูมิอากาศ 45 50 และ 55°C ที่ความเร็วลม 0.5 m/s ผลการทดลองพบว่า อัตราการ

อบแห้งเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55°C ใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด 360 min และมีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงที่สุด คือ 0.014 $kg_{water\ evap}$/kW-h สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 และ 50°C มีค่าอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกัน คือ 0.57 และ 0.55 $kg_{water\ evap}$/h ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45°C มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุดเป็น 2.257 MJ/$kg_{water\ evap}$.

เทวรัตน์ (2555) ทำการออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูป เครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาดปริมาตรภายใน 70 x 70 x 85 cm^3 ชั้นถาดบรรจุถาดซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม เจาะรูขนาด 50 x 60 cm^3จำนวน 10 ถาด ระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอขนาด 13900 BTU/h อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ 0.51 m^3/s อัตราส่วนอากาศข้ามเครื่องทำระเหย 80% ทำการทดสอบอบแห้งแครอท หอมสับ และข้าวโพดหวานที่อุณหภูมิอบแห้ง 45 50 และ 55°C พบว่า วัสดุต่างชนิดกันมีอัตราการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยแครอทมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าหอมสับ และข้าวโพดหวานเมื่อทำการอบแห้งที่สภาวะเดียวกัน เมื่อพิจารณาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งด้านสี พบว่า ผลิตภัณฑ์แครอทอบแห้งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างจากสีของแครอทสด (ΔE) อยู่ในช่วง 12.08 - 12.38 และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งเมื่อทำการคืนตัวในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90°C พบว่ามีอัตราส่วนการคืนตัว 4.14 - 4.61 และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด 3.37 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50°C สำหรับการอบแห้งหอมสับพบว่า คุณภาพด้านสีของหอมสับมีการเปลี่ยนแปลงสีแตกต่างจากหอมสับสดอยู่ในช่วง 5.58 - 7.34 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งเมื่อทำการคืนตัวด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 90°C พบว่ามีอัตราส่วนการคืนตัว 5.04 - 5.13 โดยอุณหภูมิของการอบแห้งไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการคืนตัวของหอมสับที่ระดับความเชื่อมัน 95% ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดคือ 7.26 MJ/kg_{water} ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50°C

ฤทธิชัย และคณะ (2557) ศึกษาผลของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกดอกเก๊กฮวย นำมาอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80°C ด้วยความเร็วลมคงที่ 1.0 m/s และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของดอกเก๊กฮวยทั้งแบบลวกและไม่ลวกได้เหมาะสมที่สุด และอัตราการอบแห้งของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้นมีอัตราการอบแห้งที่เร็วกว่าอัตราการอบแห้งดอกเก๊กฮวยสด เท่ากับ 1.14 1.42 1.43 และ 1.46 เท่า ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80°C ตามลำดับ และค่าพลังงานกระตุ้นของดอกเก๊กฮวยที่ผ่านการเตรียมขั้นต้น และที่ไม่ผ่านกระบวนการเตรียมขั้นต้น

S.M. et al. (2014) ศึกษาลักษณะการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด ที่มีอนุภาคเฉื่อยที่ความเร็วลมต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page ใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของใบมะกรูดได้เหมาะสมที่สุด และใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดจะมีสีที่สว่างกว่า และมีความแตกต่างจากใบสดน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างใบมะกรูดที่ใช้วิธีการตากแดดและวิธีการอบแห้งลมร้อน และไม่มีการสูญเสียองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหย ปริมาณวิตามินซีและวิตามินเอ และสีของใบมะกรูด เมื่ออบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

ดังนั้นจึงนำข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาเปรียบเทียบดังแสดงตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
Wannee et al. (2012)	Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (Citrus hystrix D.C., Rutaceae) leaves	ใบมะกรูด	ศึกษาผลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อสารระเหยสารประกอบอะโรมาและกลิ่นหลักในใบมะกรูดสดและอบแห้ง	อบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
Nurul et al. (2013)	Effect of hot-air drying on the physicochemical properties of kaffir lime leaves (Citrus hystrix)	ใบมะกรูด	ศึกษาผลของการอบแห้งลมร้อน ได้แก่ เวลาในการอบแห้ง 3 - 5 h อุณหภูมิ 40 - 80°C และกำลังการผลิต 0.5 – 2 kg/m2 ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของใบมะกรูดประเมินคุณภาพของใบมะกรูดอบแห้ง	ใช้เวลาในการอบแห้ง 3 - 5 h อุณหภูมิอบแห้ง 40 - 80°C
วศิน เรืองกำเนิด	การประเมินสมรรถนะการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน	ใบมะกรูด	ศึกษาสมรรถนะการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนตลอดจนต้นทุนในการอบแห้ง โดยทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง 45°C และ 50°C ความเร็วลมก่อนเข้าห้องอบแห้ง 0.6 m/s ใช้ใบมะกรูด จำนวน 7.5 kg เป็นวัสดุทดสอบ ความชื้น เริ่มต้น 238%$_{db}$.และอบจนมีความชื้นสุดท้าย 10%$_{db}$	วิเคราะห์สมรรถนะการอบแห้งสมุนไพร ที่อุณหภูมิอบแหงที่ 45°C และ 50°C

ตารางที่ 5 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้แต่ง	ชื่อเรื่อง	ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษา	สิ่งที่ศึกษา	การทดสอบ
นัฐราช และคณะ	การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน	ขมิ้นชัน	ประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ระบบปรับอากาศของรถยนต์มาประยุกต์เป็นแหล่งความร้อน ห้องอบมีขนาด 0.6 x 0.6 x 0.8 m^3 ใช้มอเตอร์ 3 แรงม้า	อุณหภูมิอากาศ 45 50 และ 55 ℃ ที่ความเร็วลม 0.5 m/s
เทวรัตน์ (2555)	การคงคุณภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งปั๊มความร้อน	แครอท ใบหอม ข้าวโพด	ทำการออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้งผักกึ่งสำเร็จรูป เพื่อพิจารณาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งด้านสี อัตราส่วนการคืนตัว และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	ทำการอุณหภูมิอบแห้ง 45 50 และ 55℃
ฤทธิชัย และคณะ (2557)	ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและแบบจำลองการอบแห้งดอกเก๊กฮวย	ดอกเก๊กฮวย	ศึกษาผลของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกดอกเก๊กฮวย ที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80℃ ด้วยความเร็วลมคงที่ 1.0 m/s และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	อบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 70 และ 80℃ ด้วยความเร็วลมคงที่ 1.0 m/s
S.M. et. Al (2014)	Drying of kiffir lime leaves in a Fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality de termination		ศึกษาการอบแห้งใบมะกรูดด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่มีอนุภาคเฉื่อยที่ความเร็วลมต่างๆต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของใบมะกรูดและสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	อบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 50℃ และอบแห้งแบบตากแดด และอบแห้งแบบตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 60℃

บทที่ 3
วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

วัตถุดิบ

ตัวอย่างใบมะกรูดสดที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ซื้อมาจากแหล่งปลูกมะกรูดในจังหวัดเชียงใหม่

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานของฮีตเตอร์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่ใช้ในการทดลอง
2. ตู้อบหาความชื้นแบบลมร้อน (Hot air oven) ใช้สำหรับอบตัวอย่างเพื่อหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้าย ยี่ห้อ Binder รุ่น FD 115 ประเทศเยอรมนี
3. เครื่องหาความชื้นแบบอินฟราเรด
4. อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Hot wire anemometer)
5. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP 3202s ประเทศ สหรัฐอเมริกา
6. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical Balance) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ OHAUS PIONEER รุ่น PA214 ประเทศ สหรัฐอเมริกา
7. ถาดสแตนเลส
8. โถดูดความชื้น
9. หลอดทดลอง
10. เครื่องวัดสี (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น MiniScan XE plus ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
11. เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w meter) ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3TE ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
12. เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Labomed, inc. รุ่น Spectro SC series 002416 ประเทศ สหรัฐอเมริกา
13. เครื่องหมุนเหวี่ยง ยี่ห้อ Germany industria corp. รุ่น PLCc-012e ประเทศ ไต้หวัน
14. เครื่องวัดค่าพลังงาน (Energy meter) ยี่ห้อ Hidance

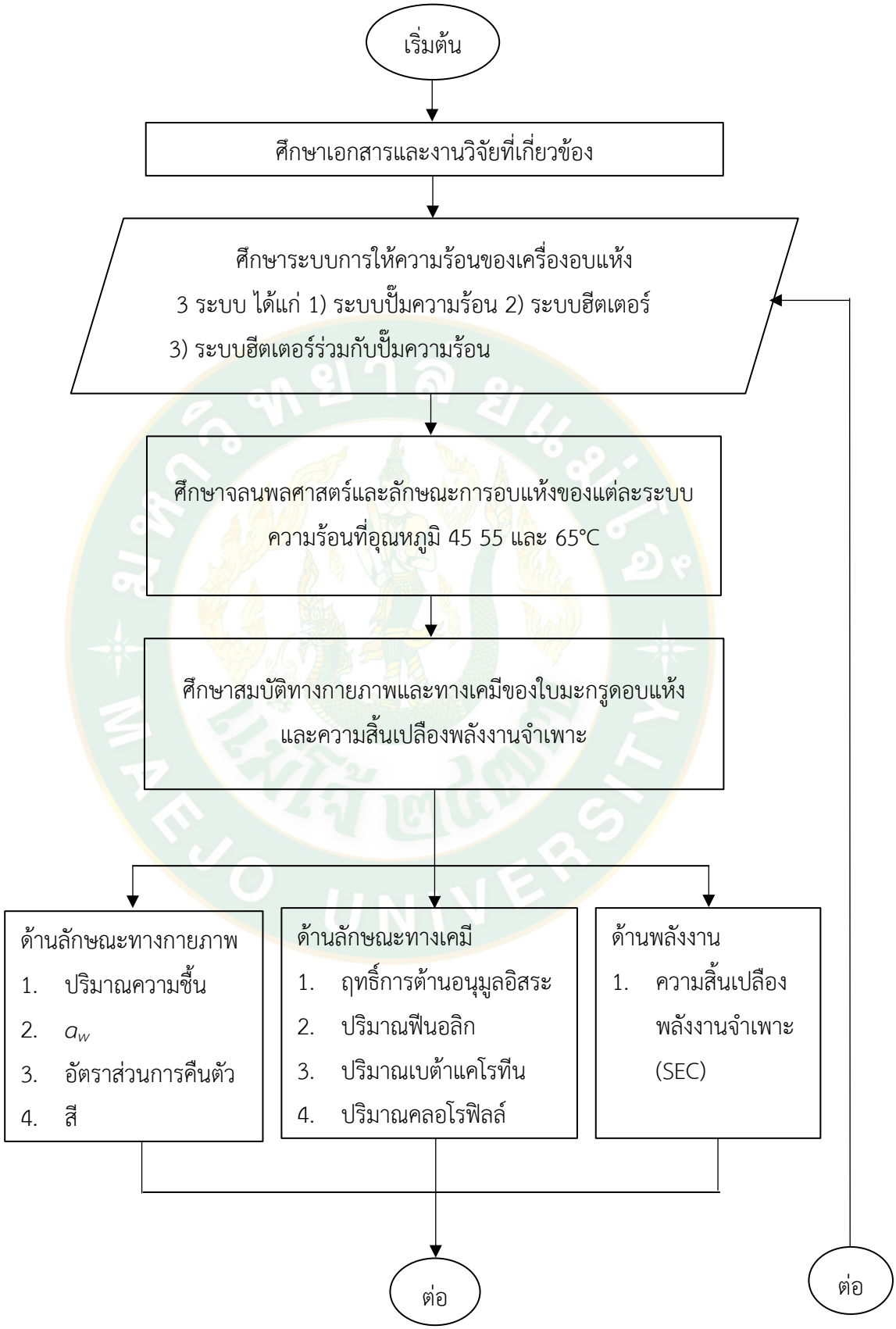
15. ภาชนะบรรจุใบมะกรูดที่ผ่านการทำแห้ง ถุงพลาสติกชนิด LDPE และลามิเนตฟอยล์

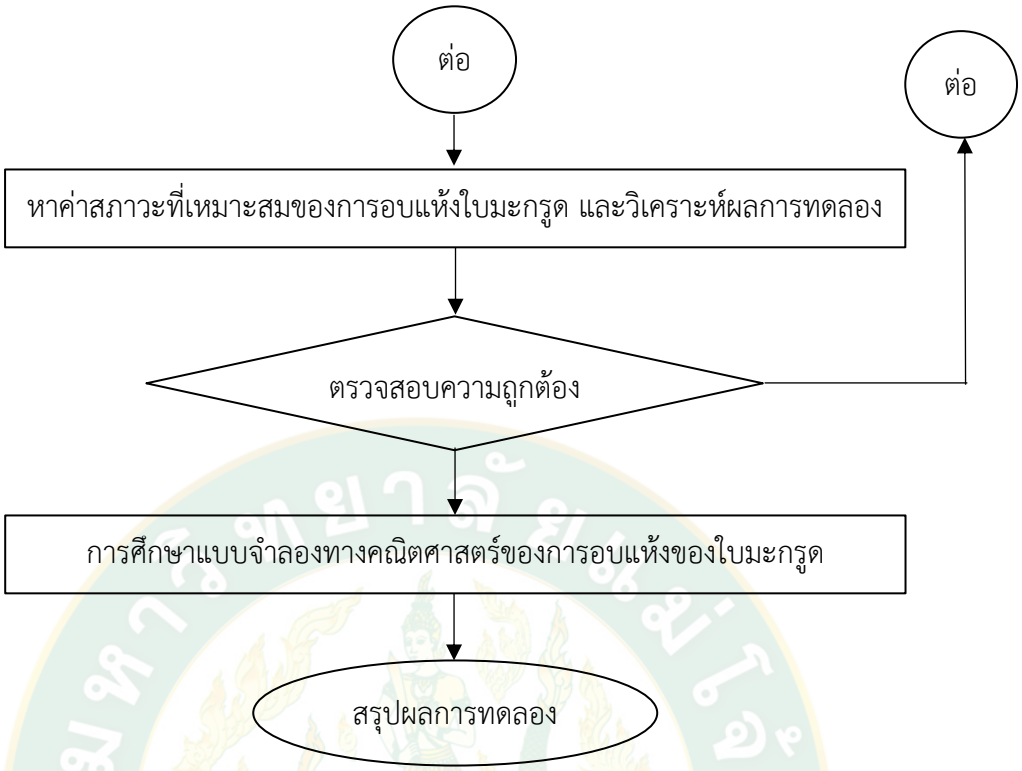
สารเคมี

1. สารละลาย DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhrdrazyl) บริษัท Aldrich ประเทศ เยอรมนี
2. สารละลายเอทานอล (Ethanol alcohol: C_2H_5OH) บริษัท RCI-labscan ประเทศ ไทย
3. สารละลายเมทานอล (Methanol alcohol: CH_3OH) บริษัท RCI-labscan ประเทศ ไทย
4. สารละลาย Folin-Ciocalteu reagent บริษัท Lobachemie ประเทศ อินเดีย
5. สารละลายโซเดียมคาร์บอเนท (Sodium Cabonate: Na_2CO_3) บริษัท Ajax finechem ประเทศ ออสเตรเลีย
6. สารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) บริษัท Merck ประเทศ เยอรมนี

แผนผังการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยศึกษาผลของสมบัติทางเคมีกายภาพและการใช้พลังงานของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานของฮีตเตอร์และปั๊มความร้อน เริ่มจากการศึกษาระบบการให้ความร้อนของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง เพื่อทำการวางแผนการทดลองอบแห้งใบมะกรูด โดยการทดลองจะทำการทดสอบอบแห้งใบมะกรูดด้วยแหล่งให้พลังงานความร้อน 3 ระบบ ได้แก่ ระบบปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว ระบบฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว และระบบผสมผสานของฮีตเตอร์ร่วมกับปั๊มความร้อน ในการทดลองนี้จะทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิที่ 45 55 และ 65°C เนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการอบแห้งใบมะกรูดที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°C นั้นจะส่งผลให้กลิ่น และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของใบมะกรูดที่ลดลงซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Wannee et al., 2012) ในการทำการทดลองอบแห้งทั้ง 3 ระบบนี้จะทำการศึกษาถึงจนลพลศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูดที่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ อัตราส่วนการคืนตัว ค่าสี ปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และศึกษาด้านความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบมะกรูดในแต่ละระบบ และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูด จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง โดยแผนผังการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 14


เริ่มต้น
ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
ศึกษาระบบการให้ความร้อนของเครื่องอบแห้ง
3 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบปั๊มความร้อน 2) ระบบฮีตเตอร์
3) ระบบฮีตเตอร์ร่วมกับปั๊มความร้อน
ศึกษาจลนพลศาสตร์และลักษณะการอบแห้งของแต่ละระบบ
ความร้อนที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C
ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของใบมะกรูดอบแห้ง
และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ
ด้านลักษณะทางกายภาพ
1. ปริมาณความชื้น
2. a_w
3. อัตราส่วนการคืนตัว
4. สี
ด้านลักษณะทางเคมี
1. ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ
2. ปริมาณฟีนอลิก
3. ปริมาณเบต้าแคโรทีน
4. ปริมาณคลอโรฟิลล์
ด้านพลังงาน
1. ความสิ้นเปลือง
พลังงานจำเพาะ
(SEC)
ต่อ
ต่อ

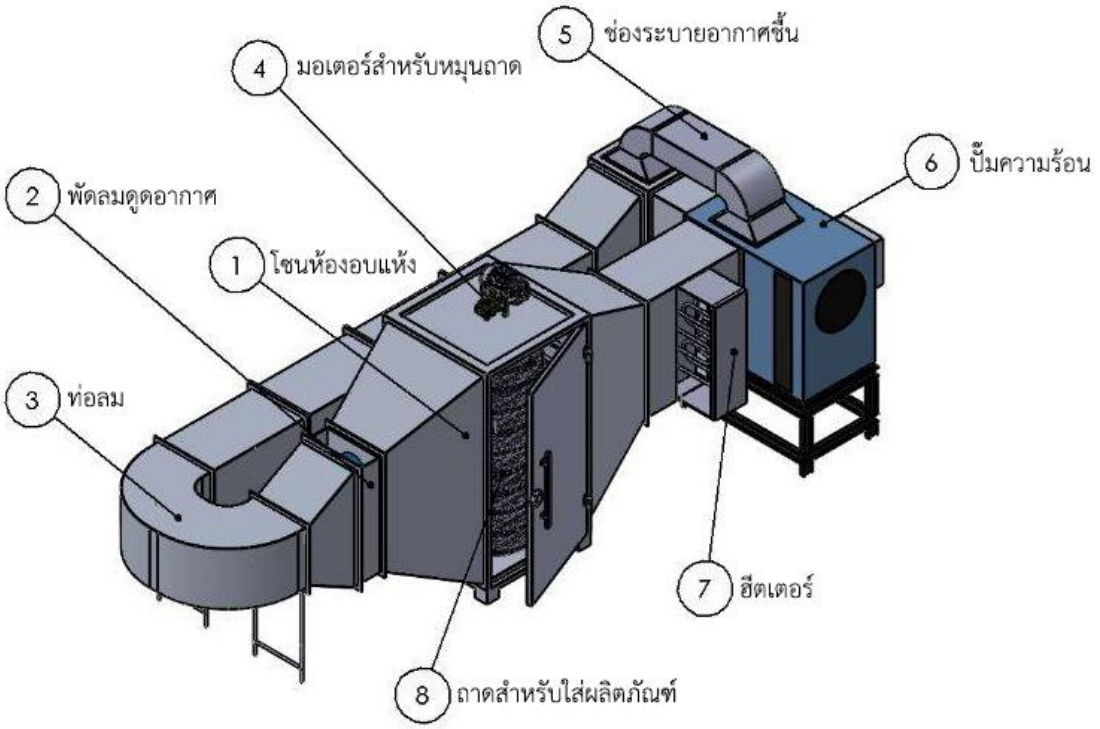


ภาพที่ 14 แผนผังการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด

เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 15 เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองอบแห้งระบบผสมผสาน

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบปั๊มความร้อน และฮีตเตอร์เป็นแหล่งความร้อนของกระบวนการอบแห้ง และเครื่องอบแห้งจะประกอบด้วยระบบหมุนเวียนอากาศและกระจายอากาศ ระบบตรวจวัดและควบคุม ห้องอบแห้งและถาดอบแห้ง ห้องอบแห้งมีขนาดความกว้าง 110 cm ความลึก 120 cm และความสูง 220 cm ติดตั้งประตูขนาด ความกว้าง 100 cm ความสูง 200 cm และความหนา 5 cm ชิ้นส่วนทั้งหมดสร้างจากวัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทั้งระบบเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน ซึ่งภายในห้องอบแห้งติดตั้งถาดอบแห้งแบบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.9 m จำนวน 10 ถาด โดยถาดอบแห้งจะถูกยึดกับเพลาขนาด 50 mm ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าติดตั้งไว้บริเวณส่วนบนของห้องอบแห้งทำหน้าที่หมุนถาดอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 15 และตำแหน่งส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แสดงตำแหน่งส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลอง 1) โซนห้องอบแห้ง 2) พัดลมดูดอากาศ 3) ท่อลม 4) มอเตอร์สำหรับหมุนถาด 5) ช่องระบายอากาศชื้น 6) ปั๊มความร้อน 7) ฮีตเตอร์ 8) ถาดสำหรับใส่ผลิตภัณฑ์

1. ระบบให้ความร้อนด้วยปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อน (Heat pump) คืออุปกรณ์สร้างความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสร้างความร้อนได้โดยประหยัดพลังงานกว่าอุปกรณ์แบบอื่น ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชิ้น ได้แก่ 1) เครื่องอัดไอ (Compressor) ใช้สำหรับเพิ่มความดันให้กับสารทำงานในระบบ 2) เครื่องควบแน่น (Condenser) ใช้เป็นแหล่งความร้อนในการสร้างลมร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้ง 3) วาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ใช้สำหรับลดความดันให้กับสารทำงานในระบบ 4) เครื่องระเหย (Evaporator) ใช้สำหรับระเหยสารทำงานในระบบ

งานวิจัยนี้ได้ใช้ปั๊มความร้อนที่มีขนาดกำลังไฟฟ้าจ่าย (Power input) ขนาด 5.5 kW ดังภาพที่ 17 ใช้สารทำความเย็นชนิด R134a ปริมาณ 2 kg เป็นสารทำงานระบบนี้ติดตั้งเครื่องอัดไอ (Compressor) แบบก้นหอย หรือ สโครล์ (Scroll type compressor) ใช้ระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ความถี่ 50 Hz แรงดันไฟฟ้า 380 V กระแสไฟฟ้า 11 A มีความดันในการทำงานสูงสุด 3.01 MPa โดยส่วนควบแน่น (Condenser) ซึ่งมีหน้าที่สร้างลมร้อนและส่วนทำระเหย (Evaporator) ซึ่งมีหน้าที่ลดความชื้นในอากาศเป็นชนิดท่อและครีบ (Finned-tube) สร้างจากท่อทองแดงรูปตัวยู (U) มีแผ่นทองเหลืองบางอัดเป็นครีบ (Fin) ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน ระบบปั๊มความร้อนในงานวิจัย

นี้มีกำลังการผลิตความร้อน (Heating capacity) และกำลังการผลิตความเย็น (Cooling capacity) เท่ากับ 10.5 kW และ 7.80 kW ตามลำดับ

ภาพที่ 17 ปั๊มความร้อน

2. ระบบให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์ (Electric heater) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน โดยความร้อนที่ได้จากอุปกรณ์นี้จะถ่ายเทสู่อากาศที่เคลื่อนที่ผ่านทำให้เกิดลมร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้ง งานวิจัยนี้ได้ติดตั้งฮีตเตอร์ไว้ในท่อหมุนเวียนอากาศบริเวณทางเข้าห้องอบแห้งมีหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ ฮีตเตอร์ถูกออกแบบให้เป็นชนิดท่อและครีบ (Finned-tube) สร้างจากโลหะสแตนเลสอัดรูปตัวยู (U) จำนวน 4 กลับ ติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียมบางอัดเป็นครีบ (Fin) ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมีขนาด 0.55x0.95 m ฮีตเตอร์ใช้กำลังไฟฟ้า (Power input) รวม 18.0 $kW_{electric}$ ทำงานด้วยระบบไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ความถี่ 50 Hz แรงดันไฟฟ้า 380 V กระแสไฟฟ้า 11 A สามารถผลิตลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 120°C ที่อัตราการไหลของอากาศผ่านครีบสูงสุดเท่ากับ 18,000 m^3/h โดยฮีตเตอร์ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 18

ภาพที่ 18 ฮีตเตอร์

3. ระบบหมุนเวียนอากาศและกระจายอากาศ

ระบบหมุนเวียนอากาศภายในห้องอบแห้งมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับระบบอบแห้ง เนื่องจากอากาศร้อนจะพาความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงการอบแห้ง ความชื้นนี้จำเป็นต้องถูกนำออกจากห้องอบแห้งให้มากที่สุด เพื่อกระตุ้นการระเหยของน้ำอิสระที่ผิวของวัสดุอบแห้ง ดังนั้นระบบหมุนเวียนอากาศจำต้องทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนต่อความชื้นของอากาศ อีกทั้งต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลหรือความเร็วลมได้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศด้วยท่อลมที่สร้างจากวัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS 304) ถูกออกแบบให้มีลักษณะสีเหลี่ยมพื้นผ้าเพื่อง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์เฝ้าตรวจวัดและควบคุม โดยท่อลมมีมิติเท่ากับ กว้าง 65x75 cm ยาว 480 cm ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนทั้งระบบเพื่อลดการสูญเสียพลังงานดังภาพที่ 19 ในส่วนของระบบกระจายทิศทางลมร้อนมีชุดกระจายลมเพื่อบังคับให้กระแสลมร้อนเคลื่อนที่ในทิศทางที่กำหนดเหนือถาดอบแห้งดังภาพที่ 20 ลมร้อนภายในระบบอบแห้งถูกหมุนเวียนโดยใช้พัดลมชนิดอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fan) แบบ 3 เฟส แรงดันไฟฟ้า 380 V กำลังไฟฟ้าสูงสุด 250 W ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเท่ากับ 0.3 m จำนวน 3 ตัว โดยพัดลมแต่ละตัวมีสมรรถนะในการหมุนเวียนอากาศได้ในช่วง 1,600-2,950 m^3/h โดยเมื่อทำงานพร้อมกันทั้ง 3 ตัวจะสร้างความเร็วลมเหนือชั้นวัสดุอบแห้งได้สูงสุดประมาณ 3 m/s ทั้งนี้ยังได้ติดตั้งอินเวอร์เตอร์เพื่อปรับค่าความเร็วลมได้ตามต้องการ โดยสามารถควบคุมความเร็วพัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนอากาศภายในระบบอบแห้งได้

ภาพที่ 19 ระบบท่อหมุนเวียนลมร้อน

ภาพที่ 20 ชุดกระจายลมร้อน

4. ระบบตรวจวัดและควบคุม

ระบบตรวจวัดและควบคุมที่จะติดตั้งกับระบบอบแห้งแบบผสมผสานประกอบด้วย

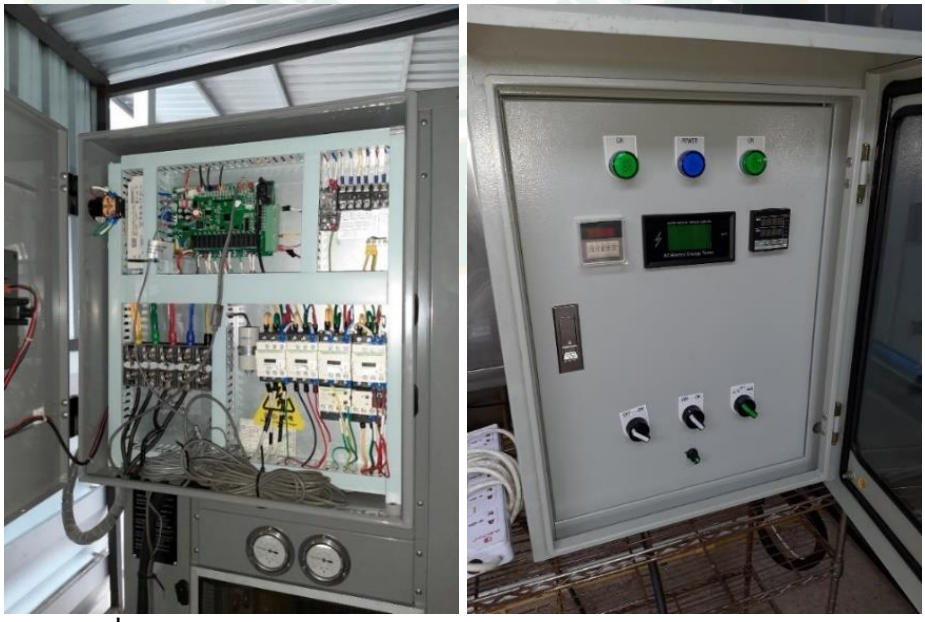
1) อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ และความเร็วลม จะถูกติดตั้งภายในห้องอบแห้งและท่อหมุนเวียนลมร้อน ดังภาพที่ 21 (ก.)

2) อุปกรณ์ควบคุมรอบมอเตอร์ มีหน้าที่ควบคุมรอบการหมุนถาดอบแห้ง และอุปกรณ์ควบคุมรอบพัดลม มีหน้าที่ควบคุมความเร็วลมร้อน ดังภาพที่ 21 (ข.)

ภาพที่ 21 ก.) การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ และความเร็วลม, ข.) อุปกรณ์ควบคุมรอบมอเตอร์หมุนถาดอบแห้งและพัดลมหมุนเวียนอากาศ

3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน ดังภาพที่ 22 (ก.)

4) อุปกรณ์ตรวจวัดการใช้พลังงาน มีหน้าที่ตรวจวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบอบแห้ง ดังภาพที่ 22 (ข.)



ภาพที่ 22 ก.) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, ข.) อุปกรณ์ตรวจวัดการใช้พลังงาน

การศึกษาการทดลองอบแห้งใบมะกรูด

1.การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างใบมะกรูดสดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย เริ่มจากการนำใบมะกรูดสดมาคัดคุณภาพ ใบมะกรูดจะต้องไม่มีจุดสีดำ หรือมีแมลงเจาะ หลังจากนั้นนำใบมะกรูดสดมาล้างน้ำให้สะอาด ประมาณ 3 รอบ และนำไปผึ่งให้สะเด็ดน้ำ ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง ดังภาพที่ 23 และ 24 ใบมะกรูดสดที่ใช้ในการทดลองจะทำการวัดความชื้นเริ่มต้นของใบมะกรูดสดโดยปฏิบัติตาม AOAC ทำการวัด 3 ซ้ำ โดยความชื้นเริ่มต้นของใบมะกรูดสดจะอยู่ที่ประมาณ 62.28 ± 1.02%$_{wb}$

ภาพที่ 23 การคัดคุณภาพ และล้างทำความสะอาดใบมะกรูด

ภาพที่ 24 การผึ่งใบมะกรูดก่อนนำมาใช้ในการทดลอง

2. การอบแห้ง

นำใบมะกรูดสดที่ผ่านกระบวนการคัดคุณภาพและทำความสะอาดไว้สำหรับการทดลองมาชั่งน้ำหนักวางลงบนถาด ถาดละ 1 kg จำนวนทั้งหมด 10 ถาด จากนั้นทำการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ระบบอบแห้งแบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนร่วมกับฮีตเตอร์ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C และความเร็วลมอยู่ในช่วง 1.5 m/s โดยจะทำการเก็บตัวอย่างใบมะกรูดสดจากตู้อบแห้งทุก ๆ 30 min เพื่อนำมาวัดความชื้นของใบมะกรูดจนกระทั่งความชื้นของใบมะกรูดลดลงต่ำกว่า 12%$_{wb}$ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้อบแห้ง มผช.136/2558 จากนั้นเมื่อได้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูดของแต่ละสภาวะการทดลองแล้ว ทำการอบแห้งซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ และเก็บตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยตัวอย่างในแต่ละสภาวะการทดลองจะถูกปั่นให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงร่อน ตัวอย่างใบมะกรูดจะถูกเก็บใส่ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ปิดสนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C จนกระทั้งนำไปใช้วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมี

3. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นทำตามมาตรฐาน AOAC โดยนำใบมะกรูดอบแห้งในแต่ละสภาวะการทดลองมาชั่งน้ำหนักประมาณ 3 g มาแยกใส่ลงในกระป๋องอะลูมิเนียมที่ทำการไล่ความชื้นแล้ว ทำการชั่งน้ำหนักของกระป๋องและตัวอย่างใบมะกรูดก่อนการอบแห้งทุกกระป๋อง จดบันทึกค่า จากนั้นนำกระป๋องที่มีตัวอย่างใบมะกรูดเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักกระป๋องและตัวอย่างหลังการอบแห้งทุกกระป๋อง จดบันทึกค่า โดยความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

การวิเคราะห์การอบแห้งนอกจากค่าความชื้น ยังมีค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำภายในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้น เมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปที่เวลาใด ๆ คือ อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณจากสมการที่ 3

ภาพที่ 25 การเตรียมตัวอย่างวัดความชื้น

4. การหาอัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR)

อัตราการอบแห้ง คือ มวลของเหลวที่ระเหยต่อพื้นที่ที่เกิดการระเหยต่อเวลา จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องอบแห้ง คุณสมบัติของวัสดุ และขนาดของวัสดุที่จะทำการอบแห้ง ซึ่งจะมีผลต่อการอบแห้ง โดยอัตราการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 8

5. การวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (Water activity, a_w)

ค่า a_w วัดโดยเครื่องวัด a_w meter (ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น Series 3TE) ซึ่งแสดงค่า a_w ออกมาเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยนำใบมะกรูดอบแห้งที่ถูกเก็บตัวอย่างจากตู้อบแห้งในแต่ละสภาวะจำนวน 2-3 g ใส่ลงไปในเครื่อง โดยเครื่องจะใช้เวลาในการวัดค่า a_w ภายใน 5 min จากนั้นเครื่องจะแสดงผลบนหน้าจอพร้อมบันทึกค่า

6. การตรวจสอบอัตราส่วนการคืนตัว (Rehydration Ratio, RR)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากการอบแห้งได้นำมาทำการทดสอบการคืนตัวดังนี้

1. นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์อบแห้งมาชั่งน้ำหนักเริ่มต้น

2. นำตัวอย่างที่ผ่านการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นแล้วแช่ลงในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90°C ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (Hot plate)

3. ทุก ๆ ช่วงเวลา 2 min ตัวอย่างจะถูกนำขึ้นจากน้ำร้อน ทำการซับน้ำส่วนเกินให้แห้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนัก จนครบเวลา 10 min

4. คำนวณหาค่าอัตราส่วนการคืนตัวของผลิตภัณฑ์ จากสมการ 16 (ภารดรและคณะ, 2552)

$$RR = \frac{m_f}{m_i} \tag{16}$$

เมื่อ m_i คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก่อนการคืนตัว (g)

m_f คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์หลังการคืนตัว (g)

7. การวิเคราะห์ค่าสี

การวิเคราะห์คุณภาพด้านสีของใบมะกรูดที่อบแห้งแล้วนั้นจะใช้เครื่องวัดสีสเปคโตโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น Mini Scan XE Plus การวิเคราะห์สีจะวิเคราะห์ด้วยระบบ CIE โดยการวิเคราะห์วัดสีในเทอมของค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดงและสีเขียว (a^*) ค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (b^*) และค่าความแตกต่างสีโดยรวมระหว่างตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งและตัวอย่างใบมะกรูดสด (Total Color Difference, ΔE) โดยคำนวณจากสมการที่ 17

$$\Delta E = \sqrt{\left(L^*_1 - L^*_2\right)^2 + \left(a^*_1 - a^*_2\right)^2 + \left(b^*_1 - b^*_2\right)^2} \quad (17)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าความแตกต่างของสี

L^*_1, L^*_2 คือ L* ของตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งและตัวอย่างใบมะกรูดสด

a^*_1, a^*_2 คือ a* ของตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งและตัวอย่างใบมะกรูดสด

b^*_1, b^*_2 คือ b* ของตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งและตัวอย่างใบมะกรูดสด

8. การหาปริมาณคลอโรฟิลล์

การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ ทำตามวิธีการของ (Bekhradi et al., 2015) ด้วยการนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้ง 2 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นนำอะซิโตนปริมาตร 20 ml ใส่ผสมลงไปในรูปชมพู่คนให้เข้ากัน ปิดปากรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟอล์ยหรือถุงฟอล์ย จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 24 h นำสารสกัดใส่หลอดเพื่อนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 15 min จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 สารสกัดส่วนใสจะถูกเก็บไว้และนำมาเจือจางด้วยอะซิโตนความเข้มข้น 80%V/V ใช้อัตราส่วน 1:4 และนำมาวัดที่ความยาวคลื่น 645 และ 662 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สแกน UV-vis และคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ตามสมการที่ (3) - (4) รายงานผลเป็น mg $_{\text{Chlorophyll}}$ /100g $_{\text{dry weight}}$ (มิลลิกรัมคลอโรฟิลล์ต่อ 100กรัมตัวอย่าง) และคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ตามสมการที่ (18) - (19)

$$C_a = 11.75A_{662} - 2.35A_{645} \quad (18)$$

$$C_b = 18.61A_{645} - 3.96A_{662} \quad (19)$$

เมื่อ C_a และ C_b คือ ปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* ตามลำดับ

A_{645} และ A_{662} คือ ค่า abs. ที่แสดงจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 645 และ 662 nm

9. การหาปริมาณเบต้าแคโรทีน

การวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีน ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (Hornero-Méndez and Mínguez-Mosquera, 2001) โดยนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งประมาณ 0.5 g ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ml เติมอะซิโตน 75 ml ลงไป คนผสมให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 1 h นำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 จากนั้นนำส่วนใส่ที่กรองได้มาทำการปรับปริมาตรให้เป็น 100 ml โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวปรับปริมาตร นำสารละลายที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณเบต้าแคโรทีนโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สแกน UV-vis ที่ความยาวคลื่น 453 nm คำนวณจากการเปรียบเทียบกราฟสารละลายมาตรฐานของเบต้าแคโรทีน และวิเคราะห์ผลเป็น mg $_{\text{betacarotene}}$ /100 g $_{\text{dry weight}}$ (มิลลิกรัมเบต้าแคโรทีนต่อ 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)

10. การสกัดตัวอย่าง

วิธีการสกัดทำตามวิธีการของ (วิจิตรา และคณะ, 2561) วิธีการสกัดตัวอย่างทำการสกัดตัวอย่างด้วยเอทานอล โดยนำตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งที่บดเป็นผงละเอียดแล้วมาชั่งน้ำหนัก 5 g ลงในบีกเกอร์ จากนั้นนำเอทานอลความเข้มข้น 75% ปริมาณ 50 ml ใส่ลงในบีกเกอร์ คนผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 min จากนั้นนำสารสกัดใสในหลอดเพื่อนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 10 min จากนั้นนำมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำตัวอย่างสกัดส่วนใส่ที่ได้เก็บใส่ขวดปิดสนิท เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C จนกว่าจะนำมาใช้วิเคราะห์

11. การหาปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (TPC)

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu reagent โดยเตรียมตัวอย่างสารสกัดใบมะกรูดปริมาตร 0.1 ml ใส่หลอดทดลอง เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 2%$_{w/v}$ (โดยมวลต่อปริมาตร) ปริมาตร 2 ml ผสมให้เข้ากัน ปิดปากหลอดด้วยกระดาษฟลอยด์หรือถุงฟลอยด์ จากนั้นเติมสารละลาย Folin-Ciocalteu phenol reagent ลงไป 0.1 ml ผสมให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 min นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สแกน UV-vis ที่ความยาวคลื่น 750 nm คำนวณค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมทั้งหมดเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิค (Gallic acid) รายงานผลเป็น mg $_{\text{Gallic acid equivalent}}$ /g $_{\text{dry weight}}$ (มิลลิกรัมกรดแกลลิคต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)

12. การหาปริมาณฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (DPPH radical scavenging activity)

วิเคราะห์ปริมาณฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity ตามวิธีการที่ดัดแปลงจากวิธีการของ (Shimada et al., 1992) โดยชั่งสาร 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl 0.1972 g จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเมทานอลเป็น 100 ml จะได้สารละลาย DPPH เข้มข้น 5 ml ปิเปตสารละลาย DPPH นี้มา 2 ml ปรับปริมาตรด้วยเมทานอล 100 ml จะได้สารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 mmol (สารละลายนี้ควรเตรียมใหม่ทุกครั้งก่อนใช้งาน) ปิเปตตัวอย่าง 0.1 ml ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย DPPH เข้มข้น 0.1 mmol ในเมทานอล 2.9 ml เขย่าให้เข้ากันแล้วตั้งไว้ในที่มืดนาน 30 min พร้อมกับทำตัวอย่างควบคุม (Control) หรือสารละลาย DPPH ที่ไม่มีตัวอย่างสารสกัด วิเคราะห์วิธีเดียวกัน จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์สแกน UV-vis ที่ความยาวคลื่น 515 nm รายงานผลเป็นค่า $\%_{Inhibition}$ คำนวณดังสมการที่ 20

$$\%Inhibition = \frac{\left(A_{control} - A_{sample}\right)}{\left(A_{control}\right)} \times 100 \quad (20)$$

โดย A_{sample} = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ

$A_{control}$ = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม

13. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง (Specific Energy Consumption, SEC)

การใช้พลังงานของระบบอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการผลิตสินค้าอบแห้ง งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดและบันทึกค่าพลังงานยี่ห้อ Kepler Series current transformer 3 เฟส รุ่น KCT-60-400/5A สำหรับวัดค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้ง โดยค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10

การศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

การศึกษาจลนพลศาสตร์ (kinetic) การอบแห้งใบมะกรูดโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง โดยแบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองการถ่ายเทมวลที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งอาหารหรือวัสดุทางการเกษตร เนื่องจากเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีกระบวนการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งใบมะกรูด เพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง จะเลือกแบบจำลองอัตราการอบแห้งจากสมการเอมพิริคัล 5 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Wang-Singh ซึ่งมีรูปแบบดังตารางที่ 3 และทุก ๆ กรณีจะมีการวิเคราะห์ความแม่นยำทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) และค่าไคสแคร์ (Chi-square, X^2) ดังสมการ (12) ถึง (14)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยวิธี ANOVA ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ซึ่งพิจารณาค่าที่ความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

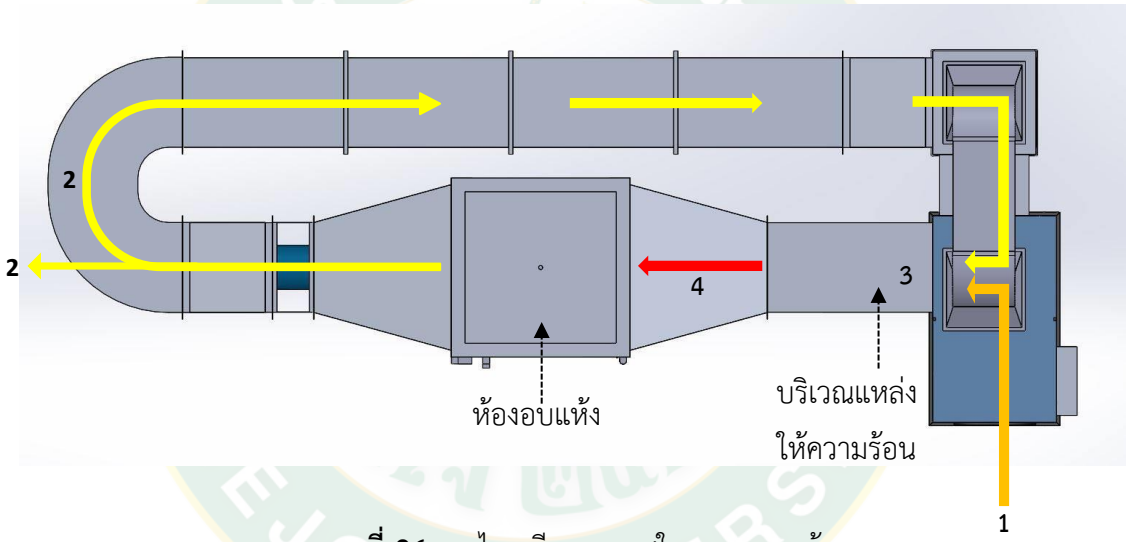
สถานที่ดำเนินงานวิจัย

ดำเนินการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการ (E215) อาคารเรียนรวมสาขาวิศวกรรมอาหาร (สำหรับนักศึกษาปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอาหาร) คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกออกแบบให้มีการระบายอากาศชื้นที่ระเหยน้ำจากวัตถุดิบออกจากห้องอบแห้งทิ้ง แล้วเติมอากาศแห้งจากภายนอกผ่านแหล่งความร้อนเพื่อเข้าไประเหยน้ำจากวัตถุดิบต่อไป โดยมีการคำนวณเบื้องต้นของการอัตราผสมอากาศระหว่างอากาศก่อนอบแห้ง และหลังอบแห้ง และการไหลเวียนอากาศของเครื่องอบแห้งดังนี้



ภาพที่ 26 การไหลเวียนอากาศในระบบอบแห้ง

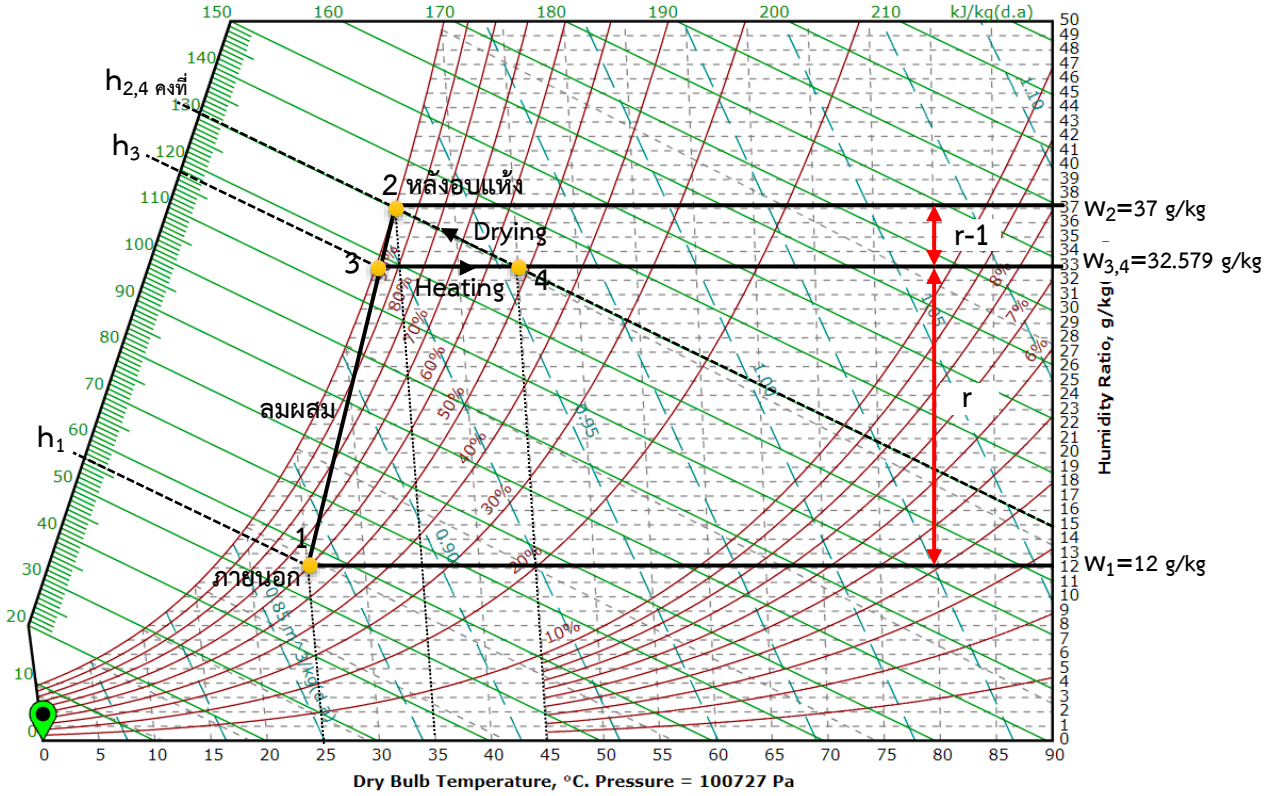
กำหนดให้

จุดที่ 1. อากาศแวดล้อมภายนอก - อุณหภูมิของอากาศ $T_{db,1}$ = 25°C
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ RH_1 = 60%

จุดที่ 2. อากาศหลังอบแห้ง - อุณหภูมิ $T_{db,2}$ = 35°C
- ความชื้นหลังจากอบแห้ง RH_2 = 100% (ดึงความชื้นจาก Productออกมาแล้ว)

จุดที่ 3. อากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง - $T_{db,3}$= อยู่ระหว่างเส้น $T_{db,1}$ และ $T_{db,2}$ บนกราฟ

จุดที่ 4. อากาศเข้าห้องอบแห้ง - อุณหภูมิหลังผ่านแหล่งให้ความร้อน $T_{db,4}$ = 45°C



ภาพที่ 27 สมบัติของอากาศแวดล้อม อากาศก่อนอบแห้ง และอากาศหลังอบแห้ง

จากข้อมูลอากาศข้างต้น นำมาพล็อตกราฟจะได้

h_1= 55.556 kJ/kg$_{(d.a.)}$ w_1 = 0.012 kg/kg$_{(d.a.)}$

h_2= 129.389 kJ/kg$_{(d.a.)}$ w_2 = 0.037 kg/kg$_{(d.a.)}$ v_2= 1.013 m^3/kg$_{(d.a.)}$

$h_2 = h_4$ = 129.389 kJ/kg$_{(d.a.)}$ $w_4 = w_3$ = 0.033 kg/kg$_{(d.a.)}$

จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างอากาศ (1) ต่ออากาศร้อนหลังการอบแห้ง (2) ดังสมการที่ 21

$$r = \frac{w_3 - w_1}{w_2 - w_1} \qquad (21)$$

$$r = \frac{0.033 - 0.012}{0.037 - 0.012} = 0.83$$

ดังนั้น อัตราส่วนการผสมอากาศคือ 83%

คำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศได้ดังนี้

คำนวณน้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (W_f) โดยกำหนดน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (W_i) = 10kg ความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้น (M_i) = 65%$_{wb}$ และความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (M_f) = 9%$_{wb}$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 22

$$W_f = \frac{W_i(100 - M_i)}{100 - M_f} \tag{22}$$

จะได้ $$W_f = \frac{10\ \text{kg}\ \ 100 - 65}{100 - 9} = 3.846\ \text{kg}$$

ดังนั้น น้ำหนักสุดท้ายของผลิตภัณฑ์อบแห้งคือ 3.846 kg

คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ (m_w) ด้วยค่าน้ำหนักเริ่มต้นของวัตถุดิบ (W_i) และน้ำหนักสุดท้ายของผลิตถัณฑ์อบแห้ง (W_f) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 23

$$m_w = W_i - W_f. \tag{23}$$
$$m_w = 10\ \text{kg} - 3.846\ \text{kg} = 6.154\ \text{kg}_{water}$$

ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบคือ 6.154 kg$_{water}$

คำนวณอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง ($\dot{m}_w$) ด้วยปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบ (m_w) และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (t) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 24

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{t} \tag{24}$$

โดย ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบคือ 6.154 kg$_{water}$

ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง คือ 12 h

จะได้ $$\dot{m}_w = \frac{6.154\ \text{kg}_{water}}{12\ \text{h}} = 0.513\ \text{kg}_{water}\ /\ \text{h}$$

ดังนั้น อัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้งคือ 0.513 kg_{water}/h

คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้งได้จากสมการที่ 25

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_w}{w_3 - w_2} \tag{25}$$

จะได้ $$\dot{m}_a = \frac{0.513\ kg_{water}\ / h}{0.037 - 0.033} = 128.25\ kg_{dry\ air}\ / h$$

คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ต้องใช้ในการอบแห้งได้จากสมการที่ 26

$$\dot{V}_a = \dot{m}_a v_i = \dot{m}_a v_2 \tag{26}$$

อากาศเข้าห้องอบแห้งมีค่าปริมาตรจำเพาะ v_2= 1.013 $m^3/kg_{(d.a.)}$

$$\dot{V}_a = 128.25\ kg_{(d.a.)}\ / h \times 1.013\ m^3\ / kg_{(d.a.)}$$

$$\dot{V}_a = 129.92\ m^3\ / h$$

ดังนั้น เครื่องอบแห้งจะต้องมีการเติมอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งได้ไม่ต่ำกว่า 129.92 m^3/h

จากการพิจารณาการไหลเวียนอากาศของเครื่องอบแห้ง เพื่อทำอบแห้งใบมะกรูด โดยการระบายอากาศชื้นที่ถูกระเหยน้ำจากวัตถุดิบออกจากห้องอบแห้ง เพื่อปล่อยทิ้ง แล้วนำอากาศแห้งจากภายนอกมาผ่านแหล่งความร้อนเพื่อเข้าไปเติมอากาศในการระเหยน้ำจากวัตถุดิบ จะได้ว่า อัตราส่วนการผสมอากาศอยู่ที่ 83% มีอัตราการระเหยน้ำระหว่างการอบแห้ง 0.513 kg_{water}/h และจะต้องมีการเติมอากาศเข้าสู่ห้องอบแห้งได้ไม่ต่ำกว่า 129.92 m^3/h

การทำงานของระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และผสมผสานของฮีตเตอร์และปั๊มความร้อน

ระบบปั๊มความร้อนจะดำเนินการอบแห้งโดยการเปิดระบบปั๊มความร้อนให้ทำงาน โดยจะปิดการทำงานของระบบฮีตเตอร์ ระบบนี้จะมีการให้ความร้อนจะระบบปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยระบบปั๊มความร้อนจะทำอุณหภูมิให้ถึงที่กำหนด ไปจนเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง

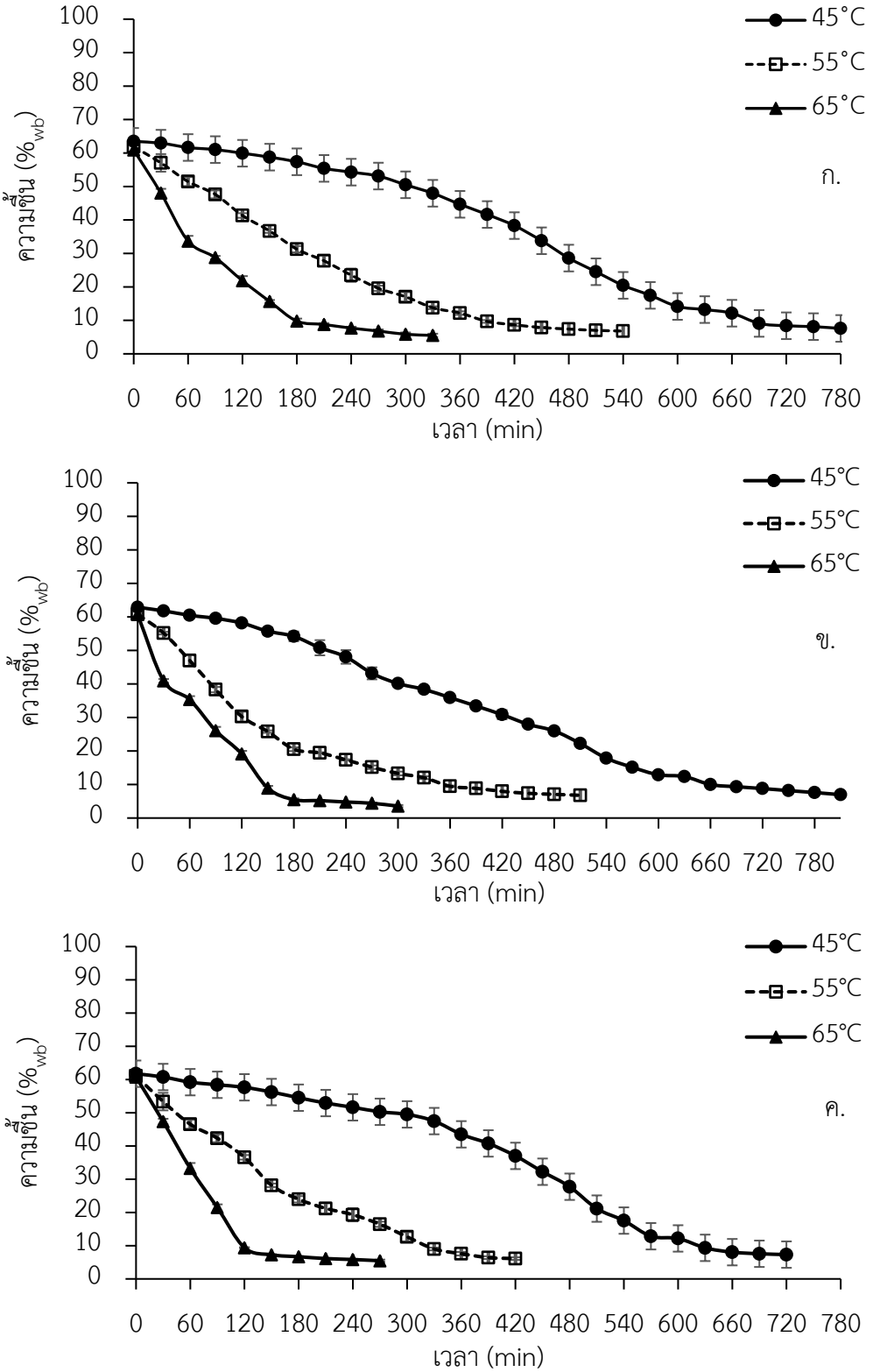
ระบบฮีตเตอร์จะดำเนินการอบแห้งโดยการเปิดระบบฮีตเตอร์ โดยจะปิดการทำงานในส่วนของระบบปั๊มความร้อนไม่ให้ทำงาน ระบบนี้จะมีการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวจนเสร็จสิ้นกระบวนการ

ระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ การทำการอบแห้งระบบผสมผสานเพื่อเป็นการแก้ไขข้อบกพร่องของการทำแห้งแบบระบบเดียว โดยการทำงานระบบผสมผสานจะเน้นการทำงานโดยระบบปั๊มควาร้อนเป็นหลักในกระบวนการอบแห้ง โดยที่ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้งจะทำการเปิดระบบของฮีตเตอร์และระบบปั๊มความร้อนให้ทำงานร่วมกันจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นระบบฮีตเตอร์จะทำการตัดการทำงาน และระบบปั๊มความร้อนจะเป็นระบบหลักในการดำเนินงานไปจนเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้ง แต่ที่อุณหภูมิมากกว่า 55°C การทำงานจะแตกต่างออกไปโดยเริ่มจากการทำงานด้วยระบบปั๊มความร้อนและระบบฮีตเตอร์ทำงานช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ หลังจากถึงอุณหภูมิที่กำหนด ระบบฮีตเตอร์จะตัดจากทำงานลงและระบบปั๊มความร้อนจะดำเนินต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิในห้องอบแห้งต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ±5°C ระบบฮีตเตอร์จะกลับมาทำงานคู่กับระบบปั๊มความร้อนอีกครั้ง เพื่อให้อุณหภูมิถึงตามที่กำหนดอีกครั้ง

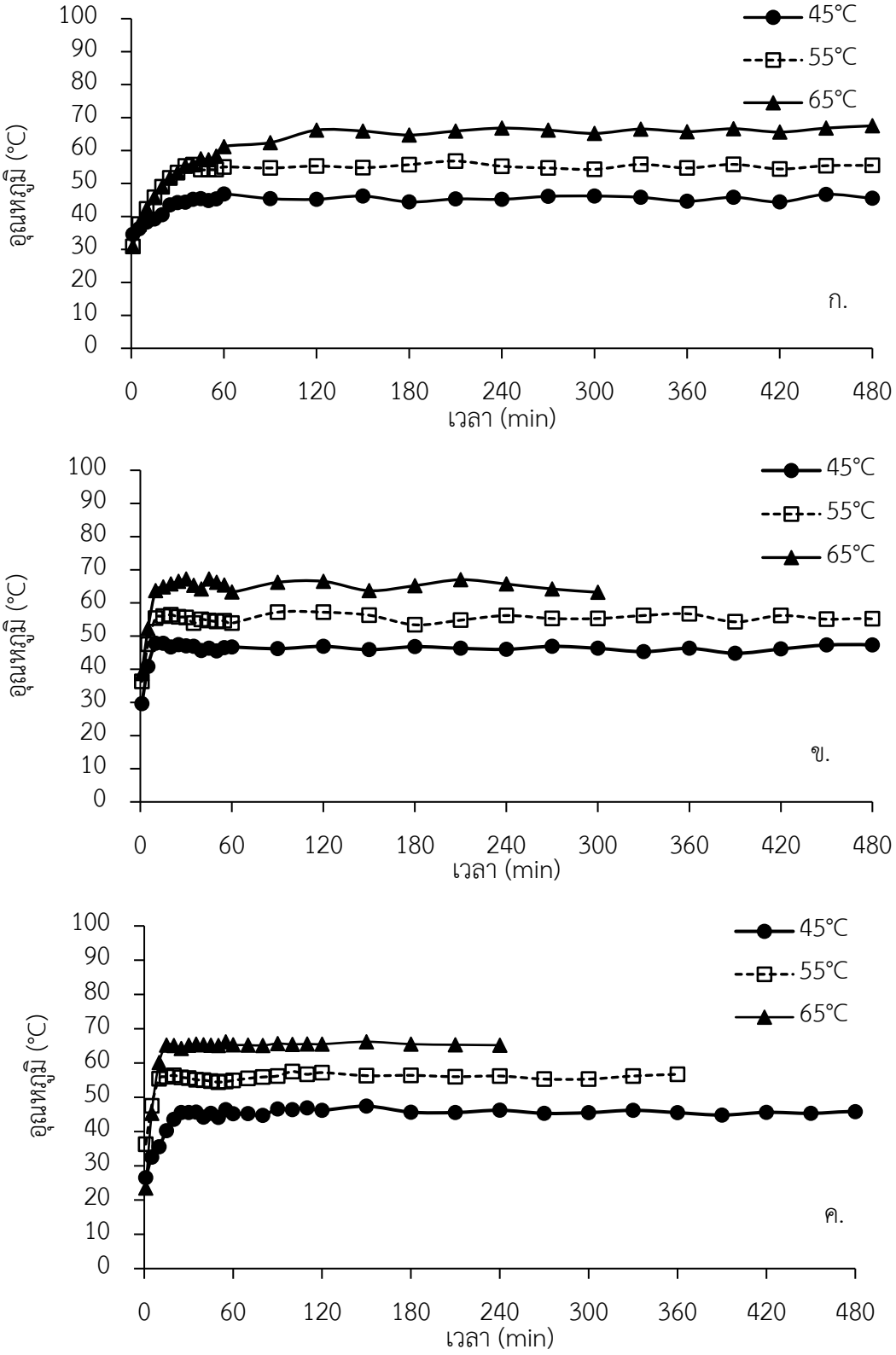
2. การทดลองการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์

2.1 สมบัติทางกายภาพของใบมะกรูดอบแห้ง

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ซึ่งแสดงในภาพที่ 28 แสดงให้เห็นว่า ความชื้นของใบมะกรูดในทุกสภาวะการทดลองลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งนานขึ้น โดยอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการลดลงของความชื้นมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการลดลงของความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนต่ำกว่าระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน โดยพิจารณาได้จากค่าอัตราการอบแห้งเฉลี่ยซึ่งแสดงในตารางที่ 6 ของระบบปั๊มความร้อนมีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่อัตราการอบแห้งเฉลี่ยด้วยระบบผสมผสานมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิการอบแห้งเดียวกัน เนื่องจากเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างลมร้อนและใบมะกรูดมากขึ้น จึงส่งผลให้มีความแตกต่างของความดันไอน้ำในเซลล์วัสดุก็สูงขึ้นตาม จึงทำให้เกิดการแพร่ของมวลไอน้ำออกจากวัสดุมาสู่ลมร้อนได้เร็วขึ้น และทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลง (Kunvana et al., 2021) จึงส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่พิจารณาจากเวลาที่ความชื้นของใบมะกรูดมีค่าน้อยกว่า 12%$_{wb}$ ด้วยระบบปั๊มความร้อนนานกว่าระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนในระบบปั๊มความร้อนต้องอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อน ในขณะที่ฮีตเตอร์อาศัยหลักการสร้างความร้อนจากความต้านทานไฟฟ้า จึงสามารถทำอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็ว และระบบผสมผสานซึ่งมีการใช้ฮีตเตอร์ช่วยในการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศในช่วงแรกของการอบแห้ง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอากาศร้อนด้วยระบบปั๊มความร้อนที่ช้ากว่า จึงทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยใบมะกรูดมีค่าน้อยกว่า และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจึงนานกว่าระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน ดังแสดงในภาพที่ 29 ในส่วนของผลการศึกษาค่า a_w ของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยสภาวะต่าง ๆ นั้น ดังตารางที่ 6 พบว่าทุกตัวอย่างมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับอาหารแห้งที่ทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้



ภาพที่ 28 ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วย ก.) ระบบปั๊มความร้อน ข.)ระบบฮีตเตอร์ และค.)ระบบผสมผสาน



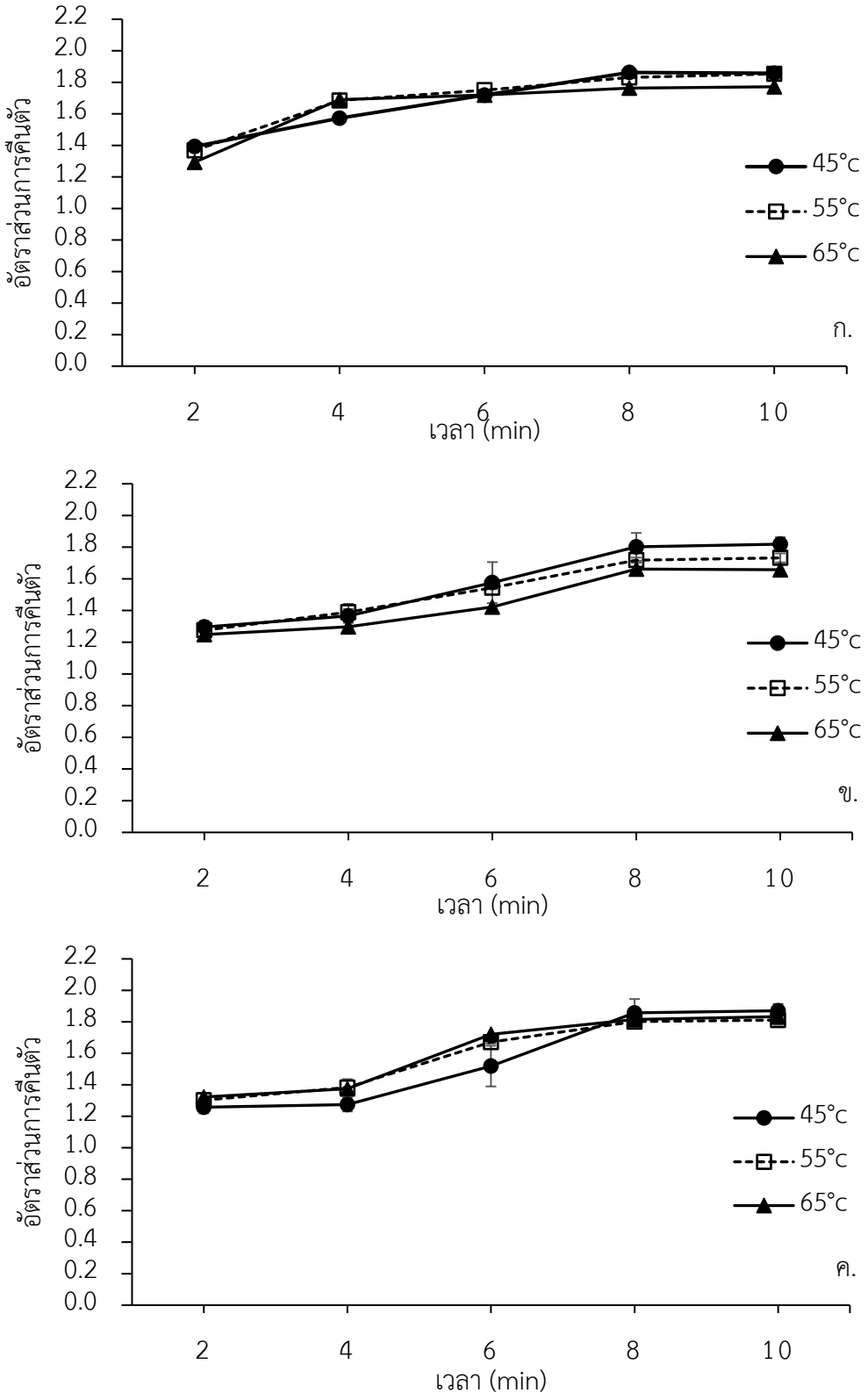
ภาพที่ 29 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างการอบแห้งของใบมะกรูดด้วย ก.) ระบบปั๊มความร้อน ข.) ระบบฮีตเตอร์ และ ค.)ระบบผสมผสาน

ตารางที่ 6 เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 12%$_{wb}$ ปริมาณความชื้นสุดท้าย และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของใบมะกรูดอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน

ระบบให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (min)	อัตราการอบแห้ง (kg H_2O_{evap}/h)	ปริมาณความชื้นสุดท้าย (%$_{wb}$)	ค่า a_w
ระบบปั๊มความร้อน	45	690	0.42±0.02^{f}	9.09±0.24^{a}	0.54±0.01^{a}
	55	390	0.74±0.01^{de}	9.68±0.40^{a}	0.36±0.01^{c}
	65	180	1.63±0.09^{c}	9.78±0.75^{a}	0.30±0.02^{d}
ระบบฮีตเตอร์	45	660	0.44±0.02^{f}	9.98±0.24^{a}	0.53±0.02^{ab}
	55	360	0.82±0.03^{de}	9.48±0.21^{a}	0.37±0.01^{c}
	65	150	1.97±0.10^{b}	8.92±0.67^{a}	0.30±0.02^{d}
ระบบผสมผสาน	45	630	0.47±0.02^{f}	9.35±0.83^{a}	0.52±0.01^{b}
	55	330	0.88±0.02^{d}	9.00±0.70^{a}	0.36±0.01^{c}
	65	120	2.47±0.13^{a}	9.40±0.15^{a}	0.28±0.01^{d}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p<0.05$)

อัตราส่วนการคืนตัวของใบมะกรูดอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 30 เมื่อนำใบมะกรูดอบแห้งในแต่ละสภาวะมาทำการคืนตัวด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เห็นได้ว่าอัตราส่วนการคืนตัวในแต่ละสภาวะในการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น แล้วจึงมีค่าคงที่หลังจากแช่มาเป็นระยะเวลา 8 min และเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิในการอบแห้ง พบว่าตัวอย่างที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C มีค่าอัตราส่วนการคืนตัวอยู่ในช่วง 1.76-1.86 ซึ่งไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ เทวรัตน์ (2555) ที่ทำการอบแห้ง แครอท ต้นหอม และข้าวโพด ด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 45 50 และ 55°C พบว่าอัตราส่วนการคืนตัวเมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิการอบแห้งไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการคืนตัวที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งให้ผลสอดคล้องกัน



ภาพที่ 30 อัตราส่วนการคืนตัวของใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน ด้วย ก.) ระบบปั๊มความร้อน ข.) ระบบฮีตเตอร์ และ ค.)ระบบผสมผสาน

ผลการศึกษาค่าสีของใบมะกรูดที่แสดงในตารางที่ 7 พบว่าการอบแห้งใบมะกรูดในทุกระบบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65°C ส่งผลให้มีค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเหลือง (+b*) มากที่สุด แต่มีค่าความเป็นสีเขียว (-a*) น้อยที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของใบมะกรูดอบแห้งเมื่อเทียบกับใบมะกรูดสดแล้วพบว่า สีใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C มีความแตกต่างจากใบมะกรูดสดมากที่สุด โดยที่ใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 55°C มีค่า ΔE ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจะทำให้คลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเขียวสลายตัวไปรวมทั้งความร้อนที่สูงขึ้นสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้งจึงทำให้ใบมะกรูดมีสีเขียวลดลง ค่าสีเหลืองและสีสว่างมากขึ้น (Gaur, 2007; Huang, 1990) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Weemaes et al. ที่รายงานว่าการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ในบล็อคเคอรี่จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 60°C แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของระบบความร้อนต่อค่า ΔE นั้นจะเห็นได้ว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนส่งผลใบมะกรูดให้มีค่า ΔE มากที่สุด เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนยาวนานกว่าระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน ดังนั้นจึงเกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้มากกว่า สีของใบมะกรูดอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนจึงมีสีที่เปลี่ยนแปลงจากใบมะกรูดสดมากที่สุด ดังนั้นหากพิจารณาจากค่าสีของตัวอย่างทั้งหมด สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบมะกรูด คือการใช้ระบบฮีตเตอร์หรือระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 45 หรือ 55°C เนื่องจากสีของใบมะกรูดอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกับใบสดมากกว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนหรือการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์สีของใบมะกรูดสดและอบแห้ง ที่ทำการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

ระบบให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	ค่าสี			
		*L**	*a**	*b**	Δ*E*
	Fresh	39.36±0.98^{d}	-9.53±0.20^{e}	15.39±0.26^{f}	-
ระบบปั๊มความร้อน	45	44.67±0.41^{a}	-6.98±0.14^{b}	29.68±0.85^{cd}	15.46±0.91^{c}
	55	42.08±0.74^{c}	-8.27±0.17^{d}	30.20±0.07^{c}	15.12±0.14^{c}
	65	43.80±1.05^{ab}	-6.42±0.18^{a}	34.51±0.47^{a}	19.90±0.40^{a}
ระบบฮีตเตอร์	45	43.33±0.03^{b}	-7.76±0.07^{c}	28.59±0.86^{e}	13.90±0.82^{d}
	55	41.63±0.10^{c}	-6.80±0.09^{b}	28.84±0.63^{de}	13.91±0.62^{d}
	65	44.12±0.05^{ab}	-6.49±0.09^{a}	34.31±0.18^{a}	19.74±0.17^{a}
ระบบผสมผสาน	45	41.32±0.25^{c}	-6.41±0.29^{a}	28.68±0.39^{e}	13.80±0.34^{d}
	55	41.46±0.35^{c}	-7.53±0.15^{c}	27.98±0.45^{e}	12.92±0.48^{d}
	65	43.34±0.31^{b}	-6.20±0.13^{a}	33.33±0.72^{b}	18.68±0.71^{b}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

2.2 สมบัติทางเคมีของใบมะกรูดอบแห้ง

ปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* ในใบมะกรูดก่อนและหลังการอบแห้งแสดงดังตารางที่ 8 โดยผลการวิจัยพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* ในตัวอย่างสดสูงกว่าตัวอย่างใบมะกรูดอบแห้งในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากคลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุที่ไม่คงตัวต่อความร้อน รวมทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่มีความร้อนเป็นตัวเร่งก็สามารถทำให้เกิดการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ ดังนั้นเมื่อใบมะกรูดได้รับความร้อนในระหว่างการอบแห้งคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเขียวจะเปลี่ยนเป็นฟีโอไฟตินซึ่งมีสีน้ำตาล นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าระบบการให้ความร้อนส่งผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ด้วย เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งแตกต่างกัน โดยการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนซึ่งใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่าระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานในทุกอุณหภูมิ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้มากกว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์จึงมีค่าน้อยที่สุด ในส่วนของอุณหภูมิอบแห้งก็สามารถส่งผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ โดยการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55 และ 65°C มีปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* สูงสุด เนื่องจากที่อุณหภูมิ 45°C ใช้ระยะเวลาที่ใบมะกรูดสัมผัสกับความร้อนระหว่างการอบแห้งนานกว่า จึงเกิดการสลายของคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ สิริมา และนิสานารถ (2562) ทำการอบแห้งสาหร่ายพวงองุ่นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C สาหร่ายพวงองุ่นมีสีเขียวสดขึ้นจากของสด ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในสาหร่ายพวงองุ่นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์คลอโรฟีเลส ที่มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 60-82.2°C (Meesirisuk, 2010)

ตารางที่ 8 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบมะกรูดสดและอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างกันของระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

ระบบให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	Chlorophyll *a* ($mg/100g_{dw}$)	Chlorophyll *b* ($mg/100g_{dw}$)
	Fresh	8.69 ± 0.07^{a}	3.46 ± 0.04^{a}
ระบบปั๊มความร้อน	45	3.50 ± 0.09^{e}	1.44 ± 0.15^{e}
	55	3.82 ± 0.03^{c}	2.19 ± 0.03^{c}
	65	3.89 ± 0.07^{c}	2.45 ± 0.01^{b}
ระบบฮีตเตอร์	45	3.71 ± 0.08^{d}	1.85 ± 0.08^{d}
	55	4.78 ± 0.04^{b}	2.59 ± 0.07^{b}
	65	4.74 ± 0.06^{b}	2.52 ± 0.05^{b}
ระบบผสมผสาน	45	3.63 ± 0.03^{d}	1.47 ± 0.07^{e}
	55	4.79 ± 0.001^{b}	2.67 ± 0.38^{b}
	65	4.72 ± 0.04^{b}	2.50 ± 0.10^{b}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ผลการศึกษาปริมาณเบต้าแคโรทีน สารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดสดและที่ผ่านการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 9 พบว่าปริมาณสารเบต้าแคโรทีน สารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดอบแห้งมีค่าน้อยกว่าใบสดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55°C ของทุกระบบความร้อนส่งผลให้ค่าปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระมากกว่าอุณหภูมิ 45 และ 65°C เนื่องจากการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระเกิดได้จากความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Phungamgnoen et al., 2021) ดังนั้นการลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจึงเกิดจากผลร่วมของทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อพิจารณาการอบแห้งที่อุณหภูมิ

45°C ถึงแม้ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 55°C แต่ใช้เวลาการอบแห้งนานกว่า การลดลงของสารต้านอนุมูลอิสระจึงเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้มากกว่า ในขณะที่การอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C นั้นแม้ว่าจะใช้เวลาการอบแห้งสั้นกว่าที่อุณหภูมิ 55°C แต่การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจึงเป็นการทำลายสารต้านอนุมูลอิสระได้มากกกว่า โดยผลศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wanyo et al. (2018) ที่รายงานว่า การอบแห้งข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 4 h และ 80°C เป็นเวลา 2 h มีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 h นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของระบบความร้อนต่อปริมาณและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระจะเห็นได้ว่า ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานมีค่ามากว่าระบบปั๊มความร้อน ดังนั้นหากพิจารณาปริมาณและฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระ สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งคือการใช้ระบบฮีตเตอร์หรือระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55°C

ตารางที่ 9 ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของใบมะกรูดสดและอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกัน

ระบบให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	เบต้าแคโรทีน (mg/g $_{dw}$)	ฟีนอลิกรวม (mg $_{GAE}$/g $_{dw}$)	ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (%$_{Inhibition}$)
	Fresh	2.93±0.02^{a}	43.03±1.01^{a}	62.23±0.49^{a}
ระบบปั๊มความร้อน	45	1.70±0.06^{e}	9.90±0.19^{g}	52.13±0.73^{de}
	55	1.83±0.01^{de}	14.52±0.33^{cd}	54.69±1.70^{bcd}
	65	1.80±0.03^{de}	14.02±0.88^{d}	51.98±1.79^{de}
ระบบฮีตเตอร์	45	1.91±0.01^{cd}	12.47±0.34^{e}	52.37±0.71^{de}
	55	2.08±0.09^{bc}	15.53±0.10^{bc}	56.67±0.25^{b}
	65	1.80±0.24^{de}	14.39±0.27^{d}	53.24±1.30^{cde}
ระบบผสมผสาน	45	1.83±0.01^{de}	11.06±1.52^{f}	51.29±3.26^{e}
	55	2.13±0.11^{b}	15.63±0.13^{b}	55.56±0.74^{bc}
	65	1.93±0.02^{cd}	14.32±0.07^{d}	52.66±0.68^{de}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p<0.05$)

2.3 ผลของการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน

ผลของการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดที่สภาวะต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 10 โดยผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนมีค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และระบบฮีตเตอร์มีค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้การอบแห้งนั้นมีค่าลดลง แต่กลับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ ในขณะที่ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55°C มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 65°C เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนในระบบปั๊มความร้อนอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำความเย็นในการทำให้อากาศร้อนจึงมีการใช้พลังงานเฉพาะในส่วนของพัดลมและระบบควบคุม แต่ฮีตเตอร์ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการสร้างความร้อนด้วยจึงมีการค่าการใช้พลังงานสิ้นเปลืองสูง ในขณะที่ระบบผสมผสานจะมีการใช้พลังงานทั้งสองระบบพร้อมกันเพื่อทำให้อุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นจะเหลือเพียงระบบปั๊มความร้อนที่ทำงาน ดังนั้นจะมีการใช้พลังงานสูงในช่วงแรก ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะจึงน้อยกว่าระบบฮีตเตอร์ แต่มากกว่าระบบปั๊มความร้อน นอกจากนี้ผลการศึกษาที่พบว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะที่ใช้การอบแห้งนั้นมีค่าลดลงนั้น มีสาเหตุจากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในระบบปั๊มความร้อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นพัดลมและระบบควบคุมจึงลดลง เมื่อเวลาอบแห้งสั้นลง แต่อย่างไรก็ตามค่าการใช้พลังงานสิ้นเปลืองกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากในการเพิ่มอุณหภูมิด้วยฮีตเตอร์ต้องเพิ่มความต้านทานของไฟฟ้า จึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบที่สูงขึ้น ในขณะที่ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55°C มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 และ 65°C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 65°C นั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มากจากระบบฮีตเตอร์ ค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะจึงสูงกว่า 45 และ 55°C

ตารางที่ 10 แสดงผลการใช้พลังงานในการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสาน

ระบบให้ความร้อน	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	พลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะ (SEC) MJ/kg H_2O_{evap}
ระบบปั๊มความร้อน	45	12.4±0.6^{e}	8.93±0.42^{e}
	55	11.7±0.4^{e}	8.42±0.64^{e}
	65	10.5±0.5^{f}	7.56±0.36^{f}
ระบบฮีตเตอร์	45	16.2±0.6^{c}	11.66±0.38^{c}
	55	17.4±0.4^{b}	12.53±0.47^{b}
	65	19.3±0.4^{a}	13.90±0.40^{a}
ระบบผสมผสาน	45	15.1±0.6^{c}	10.87±0.39^{c}
	55	13.8±0.5^{d}	9.94±0.41^{d}
	65	18.7±0.7^{a}	13.46±0.34^{a}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($p<0.05$)

3. การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของอากาศและของใบมะกรูดระหว่างการอบแห้ง และช่วยกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งใบมะกรูดที่เหมาะสม แบบจำลองที่ดีจะต้องทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นทั้งของอากาศและใบมะกรูดได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง สามารถวิเคราะห์หาข้อมูลจำนวนมากอย่างละเอียด ทำให้สามารถวางแผนการทดลองก่อนการทำการทดลองจริงได้ เป็นวิธีการที่ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง แต่มีข้อจำกัดนำไปใช้งานต้องอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบที่สร้างแบบจำลองเท่านั้น

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งที่นิยมใช้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่าไคกำลังสอง (Chi-square, χ^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองการอบแห้ง โดยยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองการอบแห้ง ดังนั้นแบบจำลองการอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสมควรจะมีค่า R^2 มาก แต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE น้อย ซึ่งผลการศึกษาแบบจำลองการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์มีดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน

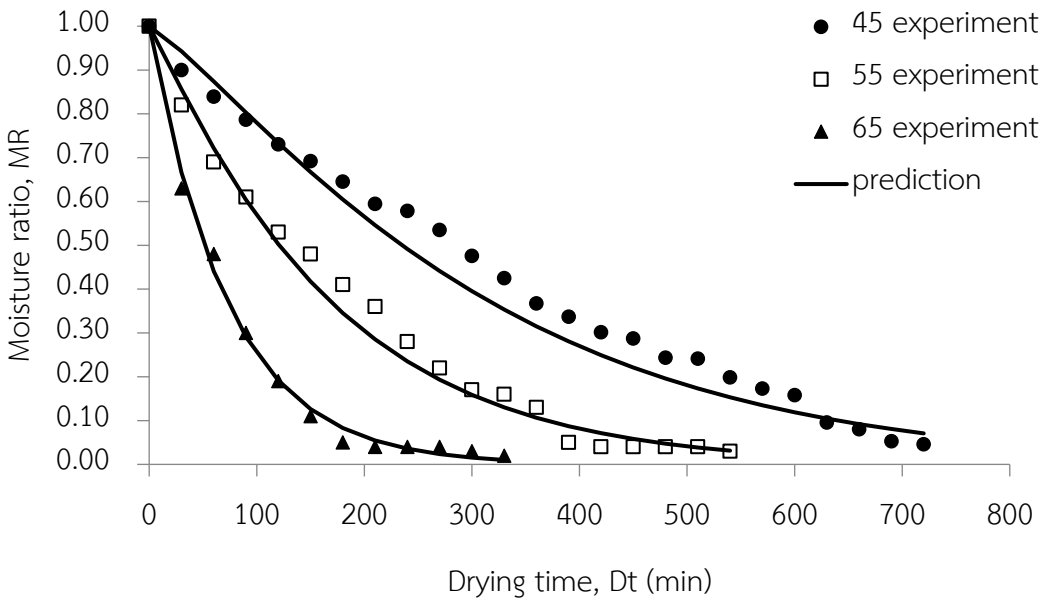
แบบจำลองการอบแห้งเป็นการจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการอบแห้ง จากการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดด้วยลมร้อนที่ 45 55 และ 65°C จะนำข้อมูลการอบแห้งมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นและนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับรูปแบบสมการแบบจำลองของ Newton, Page, Henderson and Pabis, Logarithmic และ Verma et al. โดยรูปแบบสมการที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดจะมีค่า R^2 สูงสุด แสดงถึงคุณภาพของสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย แต่ในขณะที่ค่า *RMSE* และค่า χ^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าแบบจำลองการอบแห้งซึ่งจะมีค่าต่ำสุด ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบฮีตเตอร์ พบว่า แบบจำลองของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลง

ความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อนได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.9643-0.9898 นอกจากนี้มีค่า *RMSE* และค่า χ^2 ต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วง 0.0059-0.0101 และ 2.94×10^{-6}-3.99×10^{-6} ตามลำดับ ดังตารางที่ 11 เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงผลการทำนายด้วยสมการ Page และผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดด้วยปั๊มความร้อน ดังภาพที่ 31 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งจากการทำนายด้วยแบบจำลองสมการการอบแห้งของ Page สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เชาว์และบวร (2017), บัณฑิต และคณะ (2016), วิชญาพร และคณะ (2015), ศิวะ และคณะ(2019) ที่พบว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดชาน้ำมัน บอระเพ็ด และเห็ดนางฟ้า ผลพลับ ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน

Model	Temperature (°C)	model constants	Analytical parameters		
			R^2	*RMSE*	$\chi^2\times10^{-6}$
Newton	45	*k*=0.003	0.9596	0.0089	2.74
	55	*k*=0.006	0.9736	0.0087	3.95
	65	*k*=0.014	0.9893	0.0060	3.03
Page	45	k=0.001, n=1.198	0.9643	0.0101	3.99
	55	k=0.004, n=1.075	0.9784	0.0082	3.52
	65	k=0.013, n=1.012	0.9898	0.0059	2.94
Henderson	45	*k*=0.003, *a*=1.043	0.9692	0.0081	2.32
	55	*k*=0.006, *a*=1.002	0.9740	0.0086	3.89
	65	*k*=0.014, *a*=0.997	0.9891	0.0061	3.05
Logarithmic	45	*k*=0.002, *a*=1.275, *c*=-0.289	0.9679	0.0095	3.07
	55	*k*=0.004, *a*=1.065, *c*=-0.092	0.9711	0.0093	4.56
	65	*k*=0.014, *a*=997, *c*=0	0.9891	0.0061	3.05
Wang-Singh	45	*a*=-0.002, *b*=0.00000116	0.9218	0.0128	5.52
	55	*a*=-0.004, *b*=0.00000433	0.9703	0.0099	4.97
	65	*a*=-0.009, *b*=0.00001803	0.8904	0.0276	6.25

หมายเหตุ: ค่า *k* คือค่าคงที่การอบแห้ง; *n* คือค่าดัชนีการอบแห้ง; *a, b, c* คือค่าคงที่แบบจำลอง



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งระบบปั๊มความร้อนเทียบกับแบบจำลอง Page

3.2 การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบฮีตเตอร์ พบว่าแบบจำลองของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.9875-0.9938 นอกจากนี้มีค่า *RMSE* และค่า χ^2 ต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วง 0.0033-0.0064 และ 0.37×10^{-6}-3.73×10^{-6} ตามลำดับ ดังตารางที่ 12 และ 13 เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงผลการทำนายด้วยสมการ Page และผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดด้วยฮีตเตอร์ ดังภาพที่ 32 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งจากการทำนายด้วยแบบจำลองสมการการอบแห้งของ Page สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เชาว์และบวร (2017), บัณฑิต และคณะ (2016), วิชญาพร และคณะ (2015), ศิวะ และคณะ(2019) ที่พบว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดชาน้ำมัน บอระเพ็ด และเห็ดนางฟ้า ผลพลับ ตามลำดับ

ตารางที่ 12 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์

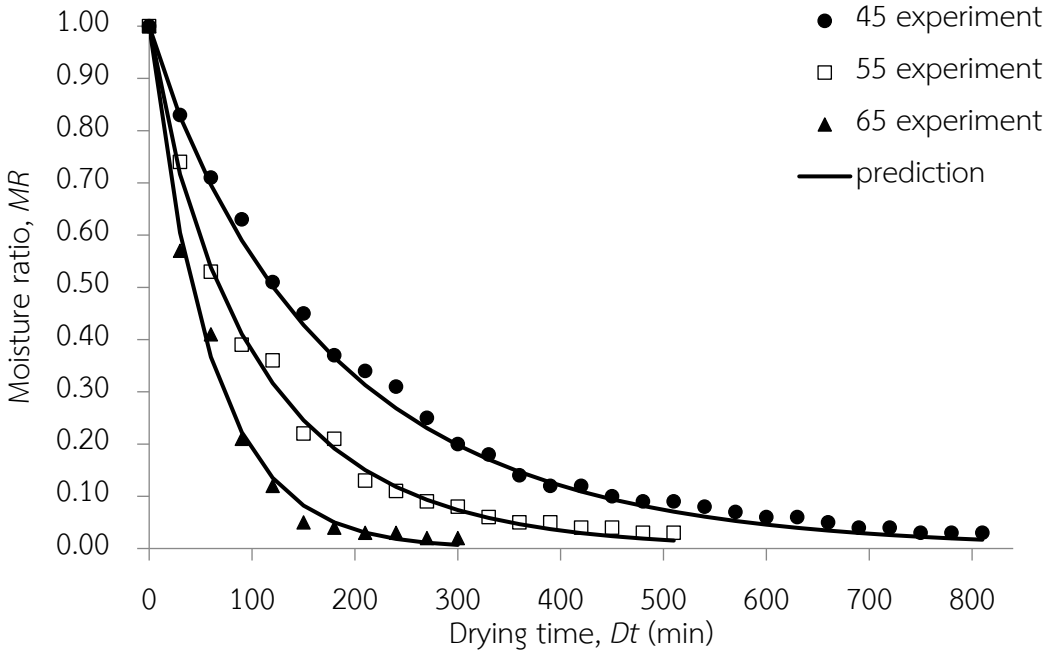
Model	Temperature (°C)	model constants	Analytical parameters		
			R^2	*RMSE*	$\chi^2\times10^{-6}$
Newton	45	*k*=0.005	0.9940	0.0034	0.41
	55	*k*=0.009	0.9865	0.0059	1.91
	65	*k*=0.017	0.9880	0.0063	3.61
Page	45	*k*=0.008, *n*=0.931	0.9938	0.0033	0.37
	55	*k*=0.016, *n*=0.893	0.9925	0.0041	0.92
	65	*k*=0.017, *n*=0.996	0.9875	0.0064	3.73
Henderson	45	*k*=0.005, *a*=0.976	0.9965	0.0026	0.26
	55	*k*=0.009, *a*=0.977	0.9894	0.0050	1.55
	65	*k*=0.017, *a*=0.996	0.9880	0.0063	3.59

หมายเหตุ: ค่า *k* คือค่าคงที่การอบแห้ง; *n* คือค่าดัชนีการอบแห้ง; *a, b, c* คือค่าคงที่แบบจำลอง

ตารางที่ 13 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ (ต่อ)

Model	Temperature (°C)	model constants	Analytical parameters		
			R^2	*RMSE*	$\chi^2 \times 10^{-6}$
Logarithmic	45	k=0.005, a=0.968, c=0.021	0.9896	0.0043	0.65
	55	k=0.010, a=0.964, c=0.028	0.9934	0.0039	0.84
	65	k=0.017, a=0.994, c=0.003	0.9879	0.0063	3.58
Wang-Singh	45	a=-0.003, b=0.0000029	0.3122	0.0392	5.33
	55	a=-0.006, b=0.0000079	0.8397	0.0290	4.58
	65	a=-0.010, b=0.0000233	0.9007	0.0239	5.03

หมายเหตุ: ค่า k คือค่าคงที่การอบแห้ง; n คือค่าดัชนีการอบแห้ง; a, b, c คือค่าคงที่แบบจำลอง



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งระบบฮีตเตอร์เทียบกับแบบจำลอง Page

3.3 การศึกษาแบบจำลองการอบแห้งของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์

ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์พบว่า แบบจำลองของ Page สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดที่อบแห้งด้วยระบบผสมสานได้เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.9837-0.9942 นอกจากนี้มีค่า RMSE และค่า χ^2 ต่ำ ซึ่งอยู่ในช่วง 0.0030-0.0100 และ 0.37×10^{-6}-9.45×10^{-6} ตามลำดับ ดังตารางที่ 14 และ 15 เมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงผลการทำนายด้วยสมการ Page และผลการทดลองการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ ดังภาพที่ 33 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งจากการทำนายด้วยแบบบจำลองสมการการอบแห้งของ Page สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เชาว์และบวร (2017), บัณฑิตและคณะ (2016), วิชญาพร และคณะ (2015) ที่พบว่าแบบจำลองของ Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดชาน้ำมัน บอระเพ็ด และเห็ดนางฟ้า ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์

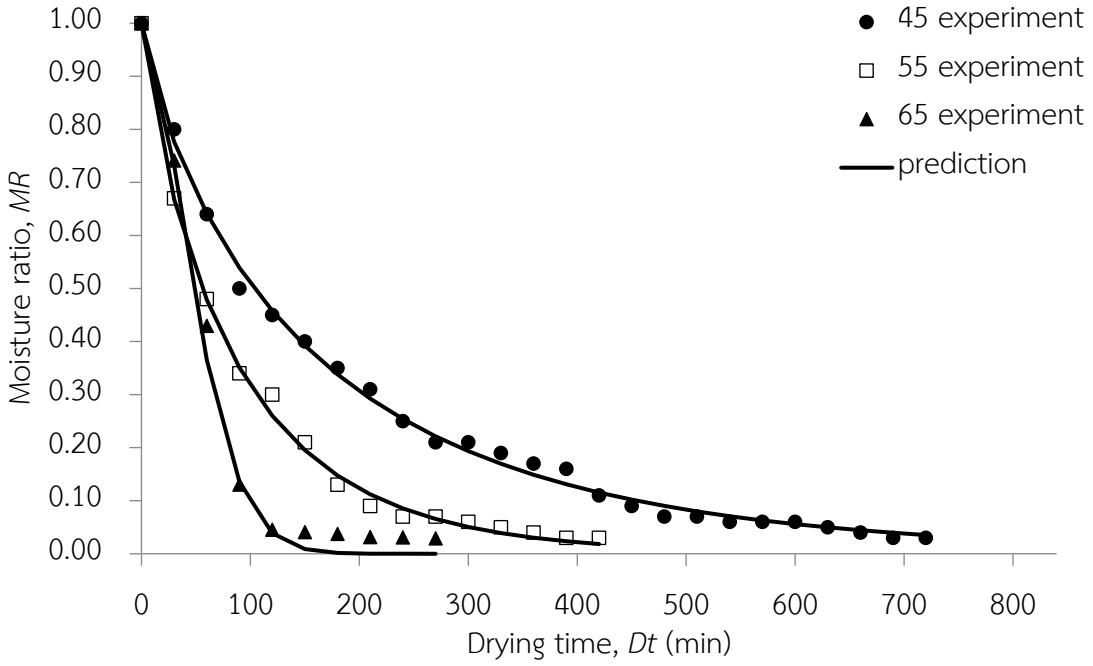
Model	Temperature (°C)	model constants	Analytical parameters		
			R^2	*RMSE*	χ^2x10^{-6}
Newton	45	*k*=0.006	0.9757	0.0071	2.03
	55	*k*=0.011	0.9865	0.0063	2.62
	65	*k*=0.017	0.8956	0.0201	40.01
Page	45	*k*=0.016, *n*=0.812	0.9942	0.0030	0.37
	55	*k*=0.021, *n*=0.869	0.9943	0.0039	1.02
	65	*k*=0.001, *n*=1.689	0.9837	0.0100	9.45
Henderson	45	*k*=0.005, *a*=0.929	0.9824	0.0058	1.64
	55	*k*=0.011, *a*=0.969	0.9893	0.0055	2.24
	65	*k*=0.017, *a*=1.056	0.9156	0.0186	37.33

หมายเหตุ: ค่า *k* คือค่าคงที่การอบแห้ง; *n* คือค่าดัชนีการอบแห้ง; *a, b, c* คือค่าคงที่แบบจำลอง

ตารางที่ 15 ค่าคงที่ของใบมะกรูดที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ (ต่อ)

Model	Temperature (°C)	model constants	Analytical parameters		
			R^2	*RMSE*	$\chi^2 \times 10^{-6}$
Logarithmic	45	*k*=0.006, *a*=0.917, *c*=0.037	0.9880	0.0045	0.96
	55	*k*=0.012, *a*=0.955, *c*=0.028	0.9926	0.0043	1.31
	65	*k*=0.016, *a*=1.073, *c*=-0.021	0.9245	0.0184	36.26
Wang-Singh	45	*a*=-0.004, *b*=0.00000357	0.8330	0.0258	26.30
	55	*a*=-0.007, *b*=0.00001138	0.8863	0.0236	36.93
	65	*a*=-0.011, *b*=0.00002778	0.9237	0.0229	51.76

หมายเหตุ: ค่า *k* คือค่าคงที่การอบแห้ง; *n* คือค่าดัชนีการอบแห้ง; *a, b, c* คือค่าคงที่แบบจำลอง



ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้งระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์เทียบกับแบบจำลอง Page

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการอบแห้งใบมะกรูดด้วยการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ที่อุณภูมิ 45 55 และ 65°C สามารถนำมาสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ผลการศึกษาการอบแห้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นของใบมะกรูดในระหว่างการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ พบว่า การลดลงของความชื้นในใบมะกรูดของทั้ง 3 แหล่งความร้อนมีความแตกต่างกันคือ ระบบปั๊มความร้อนมีความชื้นลดลงอย่างช้าๆในช่วงแรก ซึ่งต่างจากระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานที่มีความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้ง เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิใน 3 ระบบนี้ที่แตกต่างกัน โดยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ถึงที่ต้องได้อย่างรวดเร็วกว่าระบบปั๊มความร้อน จึงทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์ใช้ระยะเวลาน้อยกว่าระบบปั๊มความร้อน และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบมะกรูดจนมีความชื้นลดลงต่ำกว่า 12%$_{wb}$ (มผช, 2558) ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 690 390 และ 180 min และอัตราการอบแห้ง 0.43 0.77 และ 1.67 kg H_2O_{evap}/h ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบปั๊มความร้อน และ 660 360 และ 150 min และอัตราการอบแห้ง 0.47 0.83 และ 2.00 kg H_2O_{evap}/h ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบฮีตเตอร์ ขณะที่ระบบผสมผสานใช้ระยะเวลาเท่ากับ 630 330 และ 120 min และอัตราการอบแห้ง 0.48 0.91 และ 2.50 kg H_2O_{evap}/h ที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C จึงทำให้การอบแห้งด้วยระบบผสมผสานใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า และอัตราการอบแห้งที่ดีกว่าระบบปั๊มความร้อนและระบบฮีตเตอร์ในทุกอุณหภูมิ

2. ผลการศึกษาการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของใบมะกรูด จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลพบว่าค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของใบมะกรูดอบแห้งมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของใบมะกรูดอบแห้งซึ่งได้ลงลงตามอุณหภูมิการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 0.28-0.54 และเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้งที่กำหนดให้ความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ไม่เกิน 12% และ 0.6 ตามลำดับ ด้านสีของใบมะกรูดอบแห้งพบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและอุณหภูมิอบแห้งส่งผลต่อค่าสีของใบมะกรูด เพราะการสลายตัวจากความร้อนของคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นเม็ดสีเขียวในใบมะกรูด และเม็ดสีสีน้ำตาลยังถูกสร้างขึ้น

โดยปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่ใช้เอนไซม์ในระหว่างการอบแห้ง (Tunckal & Doymaz, 2020) การอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 45 และ 55°C มีค่าความแตกต่างสีโดยรวมจากใบมะกรูดสดน้อยที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งต่ำและระยะเวลาที่ใบมะกรูดโดนความร้อนใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นทำให้ส่งผลต่อค่าสีของใบมะกรูดเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 65°C ของทั้ง 3 ระบบ จึงมีค่าความแตกต่างสีโดยรวมจากใบมะกรูดสดมากที่สุด เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงซึ่งส่งผลต่อค่าสีใบมะกรูดอบแห้ง

3. ผลการทดลองด้านคุณภาพทางเคมีพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของใบมะกรูดอบแห้งลดลงเมื่อเทียบจากใบมะกรูดสด โดยที่การอบแห้งด้วยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55 และ 65°C มีปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* สูงสุด ส่วนปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระพบว่าที่อุณหภูมิ 55°C ด้วยระบบฮีตเตอร์และระบบผสมผสานมีค่าสูงสุด

4. ผลการศึกษาด้านพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะของการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าระบบฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าระบบปั๊มความร้อน ที่อุณหภูมิ 55°C ด้วยระบบผสมผสานมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานเพียง 9.94 MJ/kg H_2O_{evap} ซึ่งน้อยกว่าระบบฮีตเตอร์ประมาณ 20.67%

5. ผลการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบาง แบบจำลอง Page สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูง บ่งบอกถึงคุณภาพของสมการที่มีความเหมาะสมในการทำนาย และมีค่า *RMSE* และค่า χ^2ต่ำ บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าแบบจำลองการอบแห้งซึ่งจะมีค่าต่ำสุด

จากการศึกษาการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสานของปั๊มความร้อนและฮีตเตอร์ เมื่อพิจารณาผลการศึกษาทั้งหมดแล้วจะเห็นได้ว่า การใช้ระบบฮีตเตอร์หรือระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55°C นั้นส่งผลให้ค่าสี ปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูดแห้งดีที่สุด แต่ระบบผสมผสานมีค่าพลังงานสิ้นเปลืองจำเพาะในการอบแห้งน้อยที่สุด ดังนั้นการอบแห้งใบมะกรูดด้วยระบบผสมผสานที่อุณหภูมิ 55°C ระยะเวลา 330 min เป็นสภาวะที่เหมาะสมกับการอบแห้งใบมะกรูดที่สุด ส่งผลให้ลดต้นทุนการใช้พลังงานในการอบแห้งลง โดยที่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ยังคงมีคุณค่าทางโภชนาและลักษณะทางกายภาพที่ดี

ข้อเสนอแนะ

1.ควรศึกษาเพิ่มเติมทางด้านอุณหภูมิต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อกลิ่นของใบมะกรูดหลังการอบแห้ง ซึ่งกลิ่นเป็นเอกลักษณ์ที่สำคัญของใบมะกรูด

2.การทำการอบแห้งด้วยระบบปั๊มความร้อน ควรเลือกวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการอบแห้ง เนื่องจากการสร้างเครื่องอบแห้งที่มีระบบปั๊มความร้อนมีต้นทุนค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงต้องคำนึงถึงต้นทุนมูลค่าผลิตภัณฑ์หลังผ่านการอบแห้ง เพื่อให้แข่งขันกับตลาดในอนาคตได้

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

หน่วย

หน่วย		หน่วย	
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส	s	วินาที
$^{\circ}F$	องศาฟาเรนไฮต์	min	นาที
mm	มิลลิเมตร	h	ชั่วโมง
cm	เซนติเมตร	MJ/kg $_{water}$	เมกะจูลต่อกิโลกรัม
m	เมตร	kJ/kg	กิโลจูลต่อกิโลกรัม
nm	นาโนเมตร	m^3/kg	ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม
m^2	ตารางเมตร	m^3/h	ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง
m^3	ลูกบาศก์เมตร	CFM	ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที
cm^2	ตารางเซนติเมตร	A	แอมป์
cm^3	ลูกบาศก์เซนติเมตร	V	โวลต์
g	กรัม	Hz	เฮิรตซ์ (1 ครั้งต่อวินาที)
kg	กิโลกรัม	MPa	เมกะปาสคาล
µg	ไมโครกรัม	l/h	ลิตรต่อชั่วโมง
mg	มิลลิกรัม	kWh/h	กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อชั่วโมง
mmol	มิลลิโมล	ml	มิลลิลิตร
kcal	กิโลแคลอรี่	rpm	รอบต่อนาที
%	เปอร์เซ็นต์	%v/v	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรต่อปริมาตร
$\%_{wb}$	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก	%w/v	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร
$\%_{db}$	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง	mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
kW	กิโลวัตต์	mg/100g	มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม
kJ	กิโลจูล		
MJ	เมกะจูล		
kWh	กิโลวัตต์-ชั่วโมง		
m/s	เมตรต่อวินาที		
m^3/s	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที		
kg $_{water}$/h	กิโลกรัมต่อชั่วโมง		
baht/kg $_{dry\ product}$	บาทต่อกิโลกรัม		

บรรณานุกรม

.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. 2547. **การอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่นๆ**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Heat/pre_heat_10.pdf (15 กรกฎาคม).

กรมอนามัย, กระทรวงสาธารณสุข กองโภชนาการ. 2544. **คุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย.**

กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์, ณัฐพล ภูมิสะอาด และละมุล วิเศษ. 2013. การอบแห้งเมล็ดพันธุ์ข้าวเปลือกโดยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**,32(5), 622-625.

ชลลดา วชิรเดชเสถียร. 2546. การพัฒนาผลิตภัณฑ์แชมพูผสมมะกรูดจากวัสดุเหลือใช้ของอุตสาหกรรมอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชาลีดา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. เทคโนโลยีการทำแห้งแบบผสมผสาน: การนำมาใช้เพื่อถนอมอาหารผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อความร้อน. **วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ**.2, 269-283.

เทวรัตน์ ทิพยวิมล. 2555. **การคงคุณภาพผักอบแห้งกึ่งสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรานารี.

นิตยา รัตนาปนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2552. อัตราการทำแห้ง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http:www.foodnetworksolution.com (23 สิงหาคม).

ปองพล สุริยะกันธร. 2557. ผลกระทบของวิธีการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของดอกคาโมมายล์และดอกเบญจมาศ (เก๊กฮวย). มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2553. **อายุการเก็บรักษาของใบมะกรูดที่อบแห้งโดยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ตู้อบลมร้อนแบบถาด และตู้อบไมโครเวฟสุญญากาศ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พรพิมล เทพบรรทม และสิริมา ชินสาร. 2550. ผลของการอบแห้งแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนต่อคุณภาพของใบมะกรูดและตะไคร้. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**,38(6), 135-138.

ภาคภูมิ, พระประเสริฐ. 2550. สรีรวิทยาของพืช. กรุงเทพ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

นิธิยา รัตนาปนนท์ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2559. **Moisture content/**ความชื้น. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0830/moisture-content-ความชื้น

(15 กันยายน).

ฤทธิชัย อัศวราชันย์, ปองพล สุริยะกันธร และประพันธ์ จิโน. 2557. ผลกระทบของการเตรียมขั้นต้นด้วยการลวกและแบบจำลองการอบแห้งดอกเก๊กฮวย. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย**, 20(2)ม 43-51

วศิน เรืองกำเนิด. 2548. **การประเมินสมรรถนะการอบแห้งสมุนไพรโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิจิตรา แสวงโคตร, อรัญญา พรหมกูล, วรรณทิชา เศวตบวร และพัทยากร เกรียงไกร. 2561. การวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิคและสารต้านอนุมูลอิสระในใบมะกรูด 2 สายพันธุ์. **วารสารแก่นเกษตร**,46(1), 359-362.

วิโรจน์ จินดารัตน์, เกียรติขจร สุเวทเวทิน และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. 2551. การวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งวัสดุพรุนหลายชั้น โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับการพาความร้อนภายในท่อนำคลื่นรูปทรงสี่เหลี่ยม. น. 217. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย** ครั้งที่ 22.

วิไล รังสาดทอง. 2547. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร.** สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ: กรุงเทพฯ.

สารานุกรมเสรี วิกิพีเดีย. 2562. **สารต้านอนุมูลอิสระ.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/สารต้านอนุมูลอิสระ (8 สิงหาคม 2562).

สิริมา ชินสาร และนิสานารถ กระแสร์ชล. 2562. ผลของการเตรียมและการอบแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สาหร่ายพวงองุ่นอบแห้ง. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**,30(4), 668-677.

นัฐราช แสนมีมา, ณัฐพล ภูมิสะอาด, และละมุล วิเศษ. 2013. การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน. **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**,35(5), 631-635.

อนุสรา นาดี. 2554. **ปัจจัยของวิธีและสภาวะการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของใบเตย.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อาภัสสร ศิริจริยวัตร, ชาติสยาม ผลวิลัย และยาลัย โก้. 2560. ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติทางกายภาพของต้นหอม. **วารสารแก่นเกษตร**,45(1), 1155-1161.

Bekhradi, F., M.C. Lunaa, M. Delshadb, M. J. Jordanc, J. A. Sotomayorc, C. M. Conesac and Gil, M. L. 2015. Effect of deficit irrigation on the postharvest quality of different genotypes of basil including purple and green Iranian cultivars and a

Genovese variety. **Postharvest. Biol. Technol.,**100, 127-135.

Bravo, Laura. 1998. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. **Nutrition reviews,**56(11), 317-333.

Brooker, Donald B, Bakker-Arkema, Fred W and Hall, Carl W. 1992. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Springer Science & Business Media.

Ford, TW. 1996. Mohr H, Schopfer P. 1995. Plant physiology. 629pp. Berlin: Springer-Verlag. DM 98 (hardback). **Annals of Botany,**78(4), 528-528.

Gaur S, Shivhare US, Sarkar BC Ahmed J. 2007. Thermal chlorophyll degradation kinetics of mint leaves puree. **Inter J Food Prop.,**10(4), 853-865.

Hornero-Méndez, Dámaso and Mínguez-Mosquera, M Isabel. 2001. Rapid spectrophotometric determination of red and yellow isochromic carotenoid fractions in paprika and red pepper oleoresins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry,**49(8), 3584-3588.

Huang S, Hart H, Lee H, Wieker H. 1990. Enzymatic and color changes during postharvest storage of lychee fruit. **J Food Sci.,**55(1762-1763).

Kudra, T. and Mujumdar, A.S. 2009. **Advanced Drying Technologies**.

Kunvana S., Tanongkankit Y. and P., Khongkrapan. 2021. Development of production process of dried mulberry leaf for infusion using a combined infrared and hot air drying. **J Yala Raj Uni.,**6(2), 1-12.

Phungamgnoen, C, Detchewa, P and Tanongkankit, Y. 2021. Moongngram. J Sustain Sci Manag.,16(5), 1-21.

Shimada, Kazuko, Fujikawa, Kuniko, Yahara, Keiko and Nakamura, Takashi. 1992. Antioxidative properties of xanthan on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. **Journal of agricultural and food chemistry,**40(6), 945-948.

Siripongvutikorn, Sunisa, Thummaratwasik, Paiboon and Huang, Yao-wen. 2005. Antimicrobial and antioxidation effects of Thai seasoning, Tom-Yum. **LWT-Food Science and Technology,**38(4), 347-352.

Taseria, Levent, Aktas, Mustafa, sevik, Seyfi, Gülcü, Mehmet, Seçkin, Gamze Uysal and Aktekeli, Burak. 2018. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. **Food chemistry,**260(152-159).

Tasirin, SM, Puspasari, I, Lun, AW, Chai, PV and Lee, WT. 2014. Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination. **Industrial Crops and Products**,61(193-201).

Tirawanchai, Napatara, Kengkoom, Kanchana, Isarangkul, Duangnate, Burana-Osot, Jankana, Kanjanapruthipong, Tapanee, Chantip, Surachai, Phattanawasin, Panadda, Sotanaphun, Uthai and Ampawong, Sumate. 2020. A combination extract of kaffir lime, galangal, and lemongrass maintains blood lipid profiles, hepatocytes, and liver mitochondria in rats with nonalcoholic steatohepatitis. **Biomedicine & Pharmacotherapy**,124, 109843.

Tunckal, Cüneyt and Doymaz, ibrahim. 2020. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system. **Renewable Energy**,150(918-923).

Venkatachalam, Karthikeyan. 2019. Changes in Phytochemicals and Antioxidant Properties of Kaffir Lime Leaves under Chilling Storage. **Kaen Kaset= Khon Kaen Agriculture Journal**,47(Suppl. 1), 531-536.

Wanee, Patcharaporn and Siree. 2012. Effect of dryind temperature on key odorants in kaffir lime (*Citrus hystrix D.C., Rutaceae*) leaves. **International Journal of Food Science and Technology**.1-7

Wanyo P, Huaisan, K, Chamsai, T. 2018. phenolic compounds and antioxidant properties of Thai rice paddy herb as affected by different drying temperature. . **Int J Agri Tech.**,14(3), 423-440.

ภาคผนวก

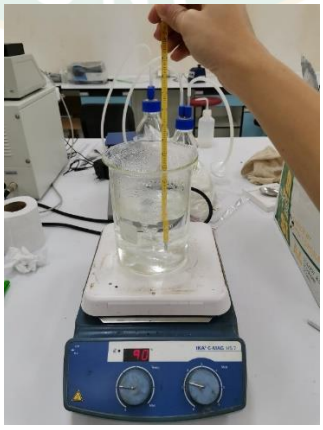
ภาคผนวก ก
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และรูปการณ์ทดลอง

ภาพผนวกที่ 1 ใบมะกรูดที่ผ่านกระบวการคัดและทำความสะอาด สำหรับใช้ในการทดลอง

ภาพผนวกที่ 2 เครื่องอบแห้งระบบผสมผสานที่ใช้ในการทดลอง

ภาพผนวกที่ 3 เครื่องวัดสียี่ห้อ
Hunterlab รุ่น Miniscan XE plus ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

ภาพผนวกที่ 4 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w)
ยี่ห้อ AQUA lab รุ่น 3TE ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



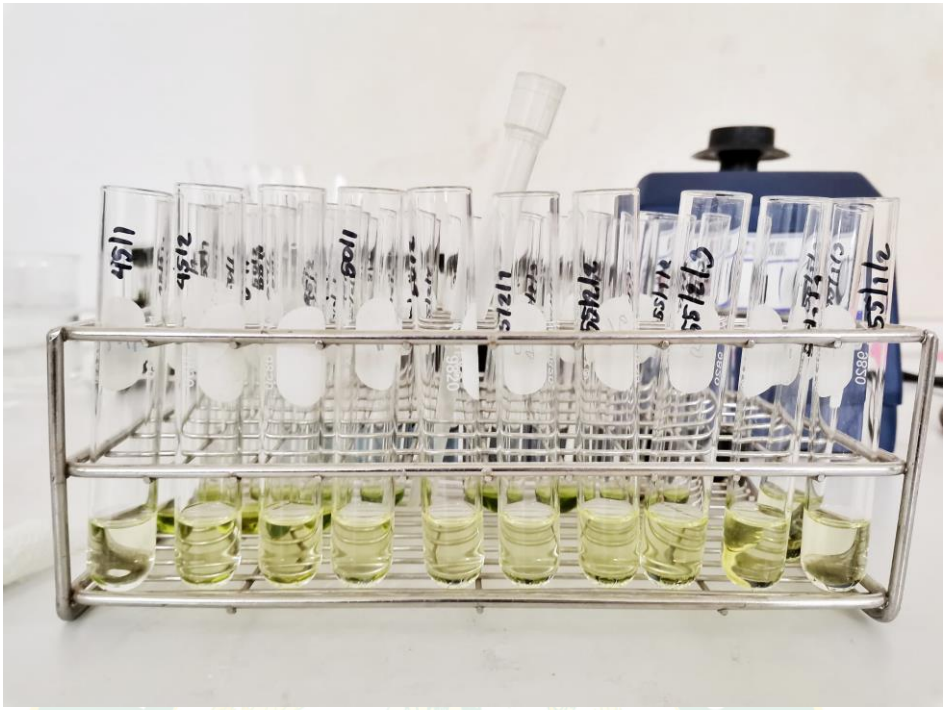
ภาพผนวกที่ 5 เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate magnetic stirrer)
ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7

ภาพผนวกที่ 6 ตัวอย่างใบมะกรูดหลังการอบแห้ง

ภาพผนวกที่ 7 ผงใบมะกรูดอบแห้ง

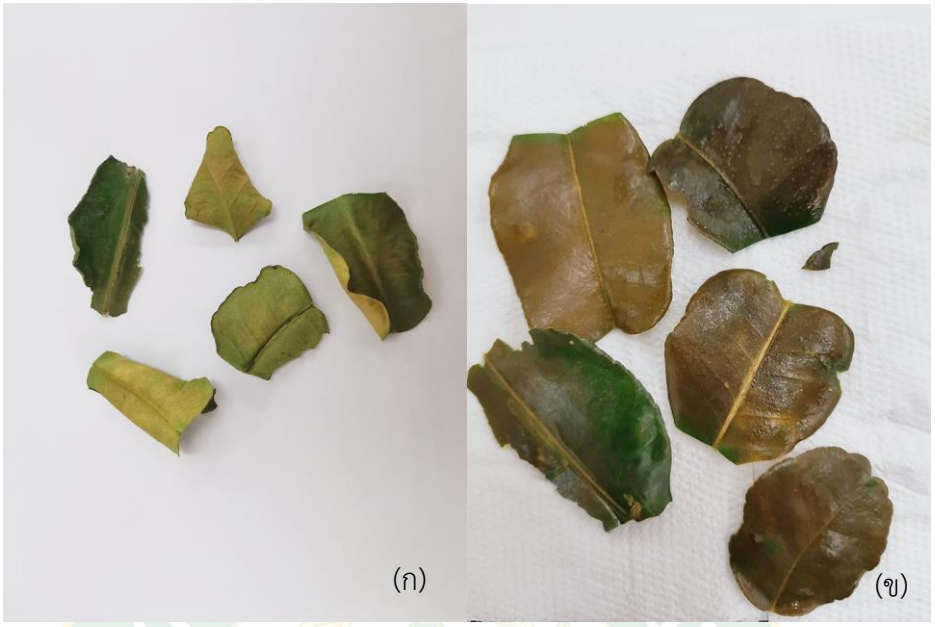
ภาพผนวกที่ 8 การสกัดตัวอย่างใบมะกรูด สำหรับนำมาตรวจวิเคราะห์ผล

ภาพผนวกที่ 9 การวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์



ภาพผนวกที่ 10 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ภาพผนวกที่ 11 การวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ DPPH



ภาพผนวกที่ 12 ภาพใบมะกรูดก่อนการคืนตัว (ก) และหลังการคืนตัว (ข)

ภาพผนวกที่ 13 ภาพใบมะกรูดหลังการคืนตัวที่เวลาต่างๆ

ภาพผนวกที่ 14 มอเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ MITSUBISHI รุ่น M151-0020

ภาพผนวกที่ 15 เครื่องวัดและบันทึกค่าพลังงานยี่ห้อ Kepler Series current transformer 3 phase รุ่น KCT-60-400/5A

ภาพผนวกที่ 16 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity & Temperature Meter) ยี่ห้อ Uni-T รุ่น A12T

ภาพผนวกที่ 17 เครื่องวัดอัตราเร็วลม (Anemometer) ยี่ห้อ Lutron รุ่น AM-4215SD แบบ Hot wire Anemometer

ภาพผนวกที่ 18 เครื่องตรวจวัดและบันทึกอุณหภูมิแบบ Data logger ยี่ห้อ Huato รุ่น S220-T8 ประกอบกับ Thermocouple ชนิด k

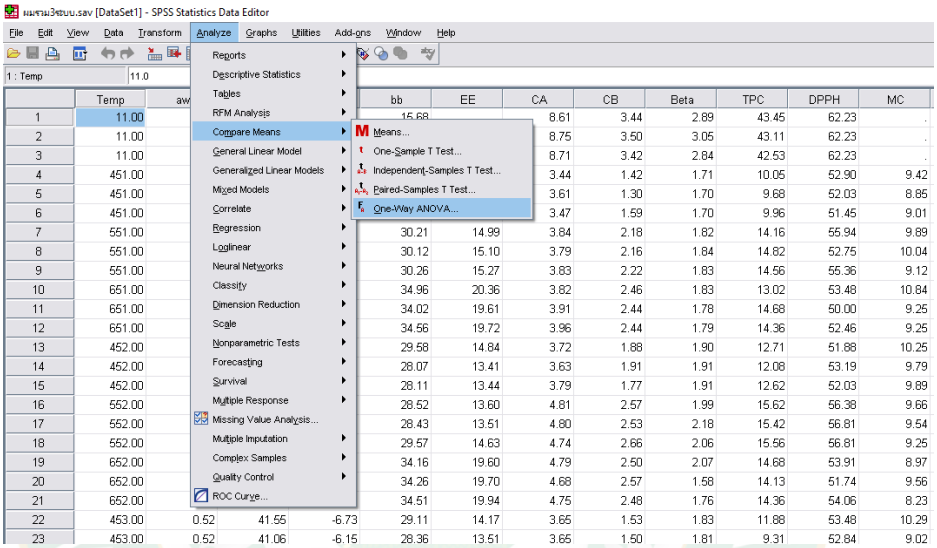
ภาพผนวกที่ 19 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple type k)

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

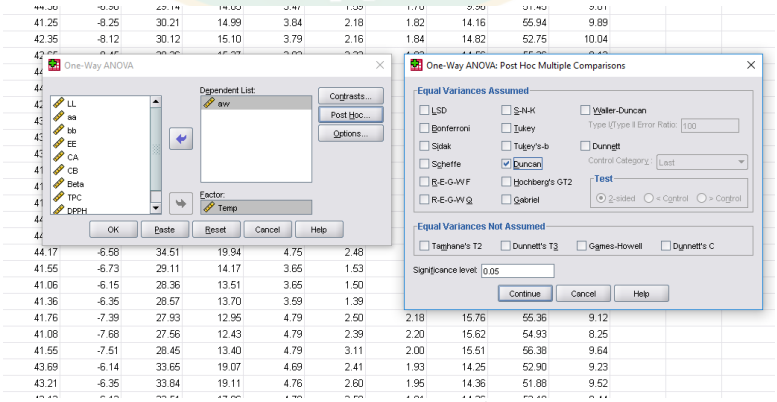
การวิเคราะห์ความแปรปวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปวน (ANOVA) ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดย วิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ซึ่งพิจารณาค่าที่ความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$) โดยเริ่มจากการใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze เลือกไปที่ Compare Means และเลือกรูปแบบ One-Way ANOVA ดังภาพผนวกที่ 15



ภาพผนวกที่ 20 การเลือกวิธีการวิเคราะห์ความแปรปวน

จากนั้นเลือกตัวแปรที่จะใช้ทำการวิเคราะห์ เข้าไปที่ Post Hoc Multiple Comparisions กดเลือกวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ดังภาพผนวกที่ 16



ภาพผนวกที่ 21 วิธีการเลือกเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

```
ONEWAY MC aw BY Temp
  /MISSING ANALYSIS
  /POSTHOC=DUNCAN ALPHA(0.05).
```

Oneway

```
[DataSet1] D:\ค่าแลป\เล่มวิทยานิพนธ์ ลูกเกด\วิเคราะห์ผล 45 55 65\ผมรวม3ระบบ.sav
```

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
MC	Between Groups	3.143	8	.393	1.212	.347
	Within Groups	5.836	18	.324		
	Total	8.978	26			
aw	Between Groups	.272	8	.034	213.024	.000
	Within Groups	.003	18	.000		
	Total	.275	26			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

MC

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05
		1
652.00	3	8.9200
553.00	3	9.0033
451.00	3	9.0933
453.00	3	9.3500
653.00	3	9.3967
552.00	3	9.4833
551.00	3	9.6833
651.00	3	9.7800
452.00	3	9.9767
Sig.		.063

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

aw

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
653.00	3	.2770			
651.00	3	.2953			
652.00	3	.2973			
553.00	3		.3550		
551.00	3		.3583		
552.00	3		.3657		
453.00	3			.5167	
452.00	3			.5280	.5280
451.00	3				.5403
Sig.		.077	.341	.287	.248

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความชื้น และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ของใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
LL	Between Groups	70.874	9	7.875	25.746	.000
	Within Groups	6.117	20	.306		
	Total	76.992	29			
aa	Between Groups	29.696	9	3.300	127.282	.000
	Within Groups	.518	20	.026		
	Total	30.215	29			
bb	Between Groups	797.111	9	88.568	289.940	.000
	Within Groups	6.109	20	.305		
	Total	803.221	29			

LL

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
11.00	3	39.3633			
453.00	3		41.3233		
553.00	3		41.4633		
552.00	3		41.6333		
551.00	3		42.0833		
452.00	3			43.3267	
653.00	3			43.3400	
651.00	3			43.7967	43.7967
652.00	3			44.1200	44.1200
451.00	3				44.6700
Sig.		1.000	.137	.122	.081

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

aa

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
11.00	3	-9.5267				
551.00	3		-8.2733			
452.00	3			-7.7567		
553.00	3			-7.5267		
451.00	3				-6.9833	
552.00	3				-6.8000	
652.00	3					-6.4933
651.00	3					-6.4200
453.00	3					-6.4100
653.00	3					-6.2033
Sig.		1.000	1.000	.096	.178	.055

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

bb

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
11.00	3	15.3867					
553.00	3		27.9800				
452.00	3		28.5867				
453.00	3		28.6800				
552.00	3		28.8400	28.8400			
451.00	3			29.6833	29.6833		
551.00	3				30.1967		
653.00	3					33.3333	
652.00	3						34.3100
651.00	3						34.5133
Sig.		1.000	.094	.076	.269	1.000	.657

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 23 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสีของใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

ANOVA

EE

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	181.582	8	22.698	69.379	.000
Within Groups	5.889	18	.327		
Total	187.470	26			

Post Hoc Tests

Homogeneous Subsets

EE

Duncan[a]

		Subset for alpha = 0.05			
Temp	N	1	2	3	4
553.00	3	12.9267			
453.00	3	13.7933			
452.00	3	13.8967			
552.00	3	13.9133			
551.00	3		15.1200		
451.00	3		15.4600		
653.00	3			18.6800	
652.00	3				19.7467
651.00	3				19.8967
Sig.		.067	.476	1.000	.752

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแตกต่างสีของใบมะกรูดสดเปรียบเทียบกับใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
CA	Between Groups	62.586	9	6.954	2160.523	.000
	Within Groups	.064	20	.003		
	Total	62.650	29			
CB	Between Groups	9.903	9	1.100	55.099	.000
	Within Groups	.399	20	.020		
	Total	10.302	29			

CA

Duncan[a]

		Subset for alpha = 0.05				
Temp	N	1	2	3	4	5
451.00	3	3.5047				
453.00	3		3.6313			
452.00	3		3.7143			
551.00	3			3.8187		
651.00	3			3.8947		
653.00	3				4.7163	
652.00	3				4.7407	
552.00	3				4.7810	
553.00	3				4.7933	
11.00	3					8.6910
Sig.		1.000	.088	.116	.142	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

CB

Duncan[a]

		Subset for alpha = 0.05				
Temp	N	1	2	3	4	5
451.00	3	1.4380				
453.00	3	1.4723				
452.00	3		1.8543			
551.00	3			2.1877		
651.00	3				2.4470	
653.00	3				2.5027	
652.00	3				2.5183	
552.00	3				2.5880	
553.00	3				2.6667	
11.00	3					3.4557
Sig.		.769	1.000	1.000	.101	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 25 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* ของใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบปั๊มความร้อน ระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Beta	Between Groups	3.358	9	.373	38.733	.000
	Within Groups	.193	20	.010		
	Total	3.551	29			
TPC	Between Groups	2442.769	9	271.419	741.109	.000
	Within Groups	7.325	20	.366		
	Total	2450.093	29			
DPPH	Between Groups	290.888	9	32.321	15.735	.000
	Within Groups	41.081	20	2.054		
	Total	331.969	29			

Beta

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
451.00	3	1.7033				
651.00	3	1.8000	1.8000			
652.00	3	1.8033	1.8033			
453.00	3	1.8267	1.8267			
551.00	3	1.8300	1.8300			
452.00	3		1.9067	1.9067		
653.00	3		1.9300	1.9300		
552.00	3			2.0767	2.0767	
553.00	3				2.1267	
11.00	3					2.9267
Sig.		.170	.165	.057	.540	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

DPPH

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
453.00	3	51.2867				
651.00	3	51.9800	51.9800			
451.00	3	52.1267	52.1267			
452.00	3	52.3667	52.3667			
653.00	3	52.6567	52.6567			
652.00	3	53.2367	53.2367	53.2367		
551.00	3		54.6833	54.6833	54.6833	
553.00	3			55.5567	55.5567	
552.00	3				56.6667	
11.00	3					62.2300
Sig.		.154	.052	.074	.123	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

TPC

Duncan[a]

Temp	N	Subset for alpha = 0.05						
		1	2	3	4	5	6	7
451.00	3	9.8967						
453.00	3		11.0600					
452.00	3			12.4700				
651.00	3				14.0200			
653.00	3				14.3233			
652.00	3				14.3900			
551.00	3				14.5133	14.5133		
552.00	3					15.5333	15.5333	
553.00	3						15.6300	
11.00	3							43.0300
Sig.		1.000	1.000	1.000	.372	.052	.847	1.000

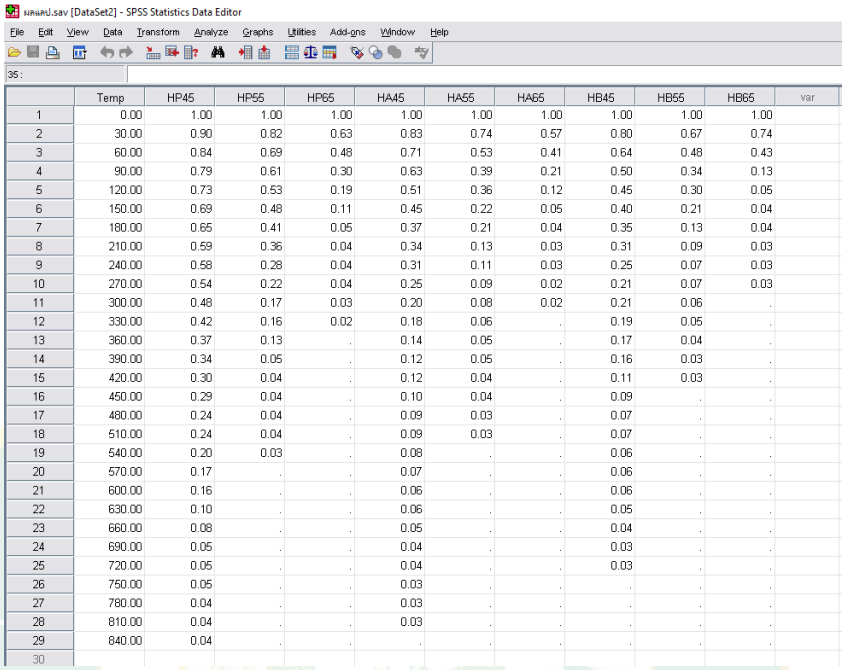
Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 3.000.

ภาพผนวกที่ 26 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเบต้าแคโรทีน ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ของใบมะกรูดอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 55 และ 65°C ด้วยระบบปั๊มความร้อนระบบฮีตเตอร์ และระบบผสมผสาน

การวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

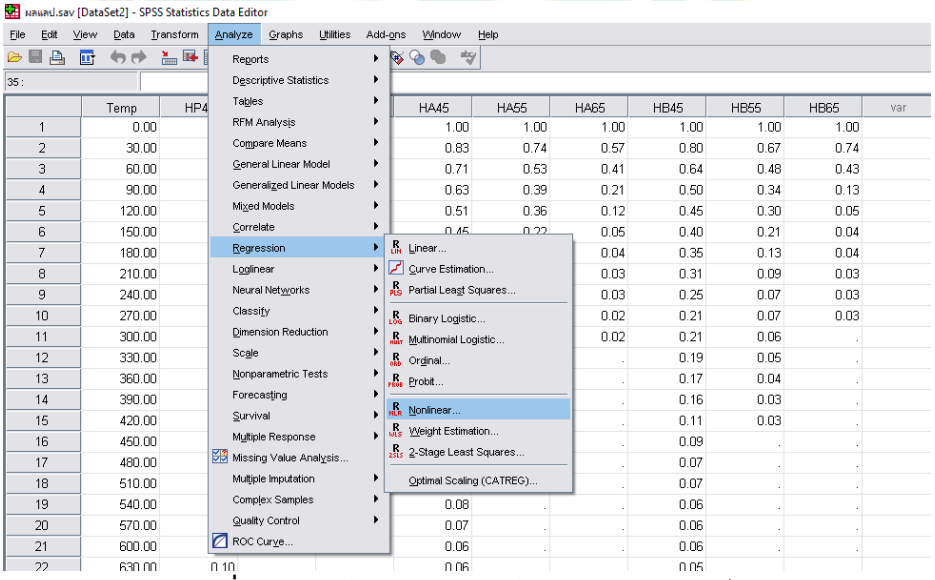
การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) เริ่มจากการใส่ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังภาพที่ 22



	Temp	HP45	HP55	HP65	HA45	HA55	HA65	HB45	HB55	HB65	var
1	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
2	30.00	0.90	0.82	0.63	0.83	0.74	0.57	0.80	0.67	0.74	
3	60.00	0.84	0.69	0.48	0.71	0.53	0.41	0.64	0.48	0.43	
4	90.00	0.79	0.61	0.30	0.63	0.39	0.21	0.50	0.34	0.13	
5	120.00	0.73	0.53	0.19	0.51	0.36	0.12	0.45	0.30	0.05	
6	150.00	0.69	0.48	0.11	0.45	0.22	0.05	0.40	0.21	0.04	
7	180.00	0.65	0.41	0.05	0.37	0.21	0.04	0.35	0.13	0.04	
8	210.00	0.59	0.36	0.04	0.34	0.13	0.03	0.31	0.09	0.03	
9	240.00	0.58	0.28	0.04	0.31	0.11	0.03	0.25	0.07	0.03	
10	270.00	0.54	0.22	0.04	0.25	0.09	0.02	0.21	0.07	0.03	
11	300.00	0.48	0.17	0.03	0.20	0.08	0.02	0.21	0.06	.	
12	330.00	0.42	0.16	0.02	0.18	0.06	.	0.19	0.05	.	
13	360.00	0.37	0.13	.	0.14	0.05	.	0.17	0.04	.	
14	390.00	0.34	0.05	.	0.12	0.05	.	0.16	0.03	.	
15	420.00	0.30	0.04	.	0.12	0.04	.	0.11	0.03	.	
16	450.00	0.29	0.04	.	0.10	0.04	.	0.09	.	.	
17	480.00	0.24	0.04	.	0.09	0.03	.	0.07	.	.	
18	510.00	0.24	0.04	.	0.09	0.03	.	0.07	.	.	
19	540.00	0.20	0.03	.	0.08	.	.	0.06	.	.	
20	570.00	0.17	.	.	0.07	.	.	0.06	.	.	
21	600.00	0.16	.	.	0.06	.	.	0.06	.	.	
22	630.00	0.10	.	.	0.06	.	.	0.05	.	.	
23	660.00	0.08	.	.	0.05	.	.	0.04	.	.	
24	690.00	0.05	.	.	0.04	.	.	0.03	.	.	
25	720.00	0.05	.	.	0.04	.	.	0.03	.	.	
26	750.00	0.05	.	.	0.03	.	.	.	.	.	
27	780.00	0.04	.	.	0.03	.	.	.	.	.	
28	810.00	0.04	.	.	0.03	.	.	.	.	.	
29	840.00	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	
30											

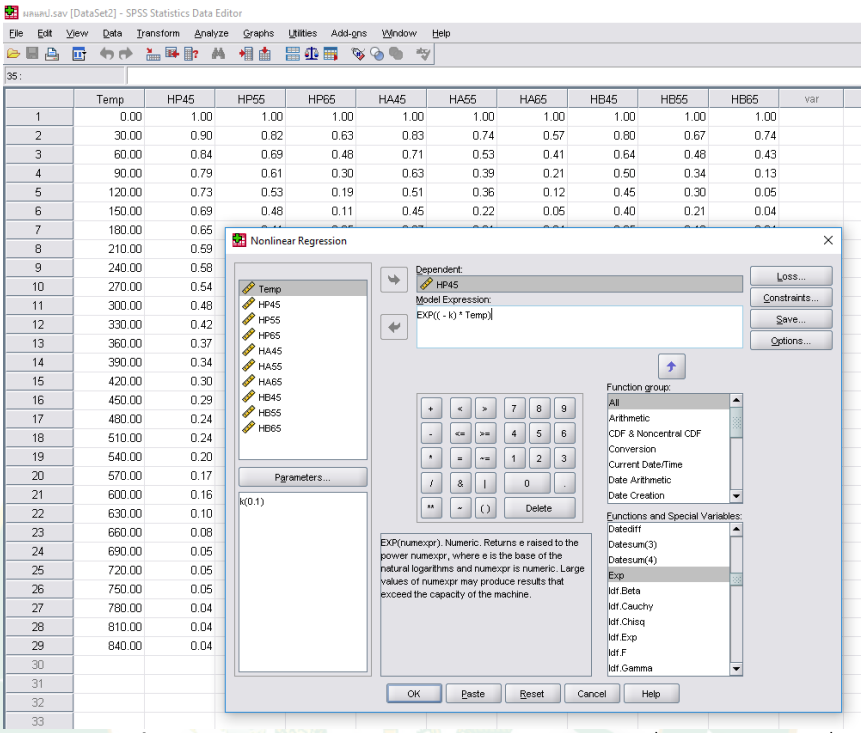
ภาพผนวกที่ 27 การใส่ค่าข้อมูลการอบแห้งที่ได้จากการทดลอง

จากนั้นเลือกวิธีในการวิเคราะห์ Analyze, Regression, Nonlinear



ภาพผนวกที่ 28 การเลือกวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

วิเคราะห์หาค่าคงที่ k โดยการใส่สมการ และกำหนดค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์ ดังภาพผนวกที่ 24 และแสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพผนวกที่



ภาพผนวกที่ 29 การใส่สมการในการวิเคราะห์ และหาค่าเริ่มต้นของค่าคงที่ k

Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
k	.003	.000	.003	.003

ANOVA[a]

Source	Sum of Squares	df	Mean Squares
Regression	6.556	1	6.556
Residual	.063	28	.002
Uncorrected Total	6.619	29	
Corrected Total	2.469	28	

Dependent variable: HP45

a. R squared = 1 - (Residual Sum of Squares) / (Corrected Sum of Squares) = .974.

ภาพผนวกที่ 30 ผลการวิเคราะห์ค่า k

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้นำเสนอและตีพิมพ์เผยแพร่

STISWB XII
THAILAND 2020
THE 12Th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION FOR SUSTAINABLE WELL-BEING (STISWB XII)
STISWB 2020
24 JULY 2020, THAILAND

MEE-14	**Investigation of Physicochemical Properties for Kaffir Lime Leaves Drying Using Heat Pump System** *Poonyaporn Sanpang et al.*	270
MEE-15	**Effect of Inclination Angle on Thermal Performance of a Closed-Loop Oscillating Heat pipe with Double Heat Sources** *Aumarit Panthai, Teerasak Hudakorn and Niti Kammuang-lue*	278
RTE-01	**Current Estimation Models of DC Traction Electrification System: Case Study of RMUTI.KKC Tram Line, Thailand** *Paiwan Kerdtuad and Prin Nachaisit*	284
RTE-02	**Development of Action Plans and Activities to Support the Stability of the Railway System Industrial in Central Northeast Provinces, Thailand** *Prin Nachaisit et al.*	288
OFT-01	**Theory-based Attitude and Behavior Survey towards Energy Saving Behavior of Silpakorn University Students** *Kittisak Khuwaranyu and Duangkamol Ruen-Ngam*	295
OFT-02	**Exploratory Factor Analysis that are Influential to Entrepreneurs' Satisfaction Towards Intern Students** *Beesuda Daoruang, Anirach Mingkhwan and Charun Sanrach*	301
OFT-03	**On Interval-Valued Q-Fuzzy Subsets** *Somsak Lekkoksung*	307
OFT-04	**Biodegradability and Compostability of Planting Materials from Biomass Using Natural Rubber Latex as a Binder** *Philaiwan Pornprasit*	313
OFT-05	**The reduction of unpleasant odor in clay-compound latex composite by using odor adsorbent filler** *Tithinun Rattanaplome and Napat Chantaramee*	319
OFT-06	**Forecasting of Green Product Innovation and Green Process Innovation that affect Firm Performance of Automotive Industry Firm in Thailand** *Chongrug Pariwatnanont and Chantana Sangvonyotin*	325
OFT-07	**Forecasting CRM, Service Quality and Perceived Value Affecting Customer Satisfaction: A Case Study of Car Service Business in Western Region of Thailand** *Sangvornyotin, C., Ratsasanasart D. and Pariwatnanont C.*	331
OFT-08	**Knowledge, Attitude, and Behavior Affecting the Electrical Energy Saving in Office Staff in Textile and Apparel Industry** *Dechaphan Ratsasanasart and Chongrug Pariwatnanont*	337

The 12th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB XII), 24 July 2020, Silpakorn University, Thailand

MEE-14

Investigation of Physicochemical Properties for Kaffir Lime Leaves Drying Using Heat Pump System

Poonyaporn Sanpang[1], Somkiat Jaturonglumlert [1], Chanawat Nitatwichit [1] and Yardfon Tanongkankit[1]*

[1] Faculty of Engineering and Agro-industry,
Maejo University, Chiang Mai, Thailand
*Tel.: +66-9-1698-9993, E-mail: yardfon@hotmail.com

Abstract

Heat pump drying was proposed in this study as it offered interesting alternatives in terms of both energy efficiency and product quality. The objective of this research was to investigate the effects of heat pump drying at temperature of 45, 50 and 55 ° C on the changes of physicochemical properties including moisture content, water activity, rehydration ratio, color, chlorophyll, β-carotene, total phenolic and antioxidant activity of kaffir lime leaves. The results showed that the moisture content decreased with longer drying time. The drying time to reach the final moisture content below 12% wb. at the temperature of 45, 50 and 55° C were 450, 330 and 270 min, respectively. However, drying temperatures did not gave significant effects on water activity, rehydration ratio and total color difference value of kaffir lime leaves. For the antioxidants, it was found that the drying at 50 and 55°C exhibited the highest content of chlorophyll, β-carotene, total phenolic and antioxidant activity. In summary, our findings suggest that heat pump drying of kaffir lime leaves at 50°C for 330 min is the best condition.

Keywords: Antioxidant; Color; Drying; Heat pump; Kaffir lime leaves

1. Introduction

Kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C.) leaves are aromatic herbs widely used in Southeast Asian cuisine. The leaves do not only provide distinctive aroma and flavor to food but also bioactive compounds that play important role to prevent various diseases such as cancer and cardiovascular diseases [1]. There have been many previous studies reporting that kaffir lime leaves are rich sources of antioxidant compounds including especially β-carotene and phenolic compounds [2,3,4]. Nevertheless, fresh kaffir lime leaves have a short shelf life of only 3 days at ambient temperature and 18 days at 8°C [4,5]. In order to extend their shelf life various processes have been applied.

Hot air drying is one of the common processes used for removal of moisture up to a certain level at which microbial spoilage and deterioration chemical reactions are greatly minimized. This process also provides decrease in weight and volume of the packaging and consequently lower transportation costs. During drying the hot air can be generated by numerous heat sources such as electric heater, steam, gas and etc. Among the heat sources, heat pump is the most energy efficiency system based on the inverse Carnot cycle principle of recovering energy from the exhaust [6, 7]. Ta et al. [8] reported that grape pomace dried by heat pump system gave lower energy consumption about 51% when compared with electrical heating system. According to previous studies, heat pump drying is also suitable for the heat sensitive materials since it can independently control the drying temperature and air

The 12th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB XII), 24 July 2020, Silpakorn University, Thailand

humidity [6,7] and thus operate at a low temperature. Hou et al. [9] stated that color and shrinkage ratio of jujube slices dried by heat pump drying were better than those dried by conventional hot air drying.

As the heat pump system has offered interesting alternatives in terms of both energy efficiency and product quality, it was proposed for drying kaffir lime leaves in this study. Many researches have confirmed that heat pump drying was successfully applied for drying kaffir lime leaves [10, 11, 12]. For example, Poomsa-ad and Deejing [12] carried out drying kaffir lime leaves in a close-loop heat pump drying at 40, 50 and 60°C. Their results revealed that the drying time for kaffir lime leaves at 40, 50 and 60 °C was 10, 5 and 3 h, respectively. The greenness and overall color also had a great change under drying temperature at 60 °C rather than 40 and 50 °C. However, there is still lack of physical and chemical properties of dried kaffir lime leaves by heat pump systems.

Therefore, the purposes of the present study were to determine drying kinetic of kaffir lime leaves during heat pump drying at 45, 50 and 55°C, physical properties of dried kaffir lime leaves including water activity, color and rehydration ratio and chemical properties of dried kaffir lime leaves including phenolic compounds, beta-carotene and antioxidant activity at different drying temperatures.

2. Materials and Methods

2.1 Sample preparation

Fresh kaffir lime leaves used in this study were purchased from local market in Chiang Mai, Thailand. Prior to each experiment, the leaves were washed and drained. The initial moisture content of the fresh kaffir lime leaves was determined using the the AOAC method [13]. Triplicate samples were used for determining the moisture content and the average values were reported as 65.28±1.02% wb.

2.2 Drying experiment

One kg of the prepared kaffir lime leaves were placed on 10 perforated trays with the diameter of 1 m. The drying was carried out in an experimental heat pump drying system presented in Fig 1 at temperature of 45, 50 and 55°C. The samples were taken at time intervals to determine moisture content using the AOAC method [13]. Drying time was also investigated when moisture content of the samples was lower than 12% wb.

2.3 Determination of moisture content

Moisture content was measured by oven method [13]. Approximately 3 g of sample was placed in dried moisture can and then transferred to hot air oven (FD 115, Binder, Germany) at 105 °C for 24 h. After drying the sample was weighed and its moisture content was calculated following Eq. (1)

$$M_d = \left(\frac{w-d}{d}\right) \times 100 \qquad (1)$$

where M_d is moisture content of sample (%wb.), w and d is weight (g) of sample before and after drying, respectively.

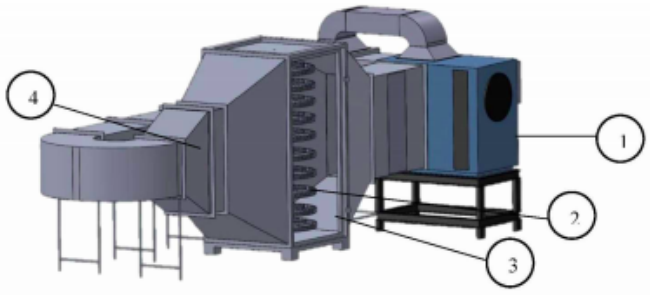


Fig 1. Schematic diagram of heat pump dryer: 1. Heat pump system; 2. Perforated trays; 3. Drying chamber; 4.Blower

2.4 Determination of water activity

Water activity of each sample was analyzed using water activity meter (Series 3TE, Aqua Lab, USA).

2.5 Color Measurement

Color of a sample was determined using a spectrophotometer (HunterLab, Mini Scan XE plus, USA). The CIE Lab color parameters, i.e., L* (whiteness or brightness), a* (redness or greenness) and b* (yellowness or blueness) coordinates, were used to describe the color of samples. Total color difference (ΔE) was calculated using Eq. (2).

$$\Delta E = \sqrt{\left(L_0^*-L_1^*\right)^2+\left(a_0^*-a_1^*\right)^2+\left(b_0^*-b_1^*\right)^2} \quad (2)$$

where L_0, a_0 and b_0 is whiteness, redness and yellowness of fresh kaffir lime leaves.

2.6 Determination of rehydration ratio

Rehydration ratio of a sample was carried out by immersing 2 g of a sample in distilled water at temperature of 90°C for 10 min. The sample was withdrawn from the liquid and excess water was carefully removed by blotting on a tissue paper before weighing. The rehydration ratio (RR) was calculated by the following Eq. (3).

$$RR = \frac{w_1-w_0}{w_0} \quad (3)$$

where w_1 and w_0 is the weight of a dried sample after and before immersion in hot water, respectively.

2.7 Determination of chlorophyll

The determination of chlorophyll was performed as detailed by Bekhradi et al. [14]. 2 g of a dried sample was extracted with 20 mL of acetone. The extract was centrifuged at 3,000 rpm for 15 min. The supernatant was kept and diluted with 80% V/V acetone (1:4). Absorbance of the extract was measured at 645 and 662 nm a UV-vis scanning spectrophotometer and calculation of chlorophyll content was carried out following Eqs. (4)-(5).

$$C_a = 11.75A_{662}-2.35A_{645} \quad (4)$$

$$C_b = 18.61A_{645}-3.96A_{662} \quad (5)$$

where C_a and C_b is the content of chlorophyll *a* and *b* (mg/ 100g dry weight), respectively.

2.8 Determination of total phenolic content (TPC)

The total phenolic content of a sample was determined using Folin-Ciocalteu reagent [15]. 2.5 g of a sample was first stirred with 25 mL of 75% V/V ethanol solution via the use of a magnetic stirrer for 30 min at ambient temperature. The solution was then centrifuged at 5000 rpm for 10 min and filtered through Whatman No. 1 filter. The supernatant was kept for further analysis. 0.1 mL of the sample extract, 0.1 mL of Folin-Ciocalteu reagent and 2 mL of 2% W/V sodium carbonate solution were added and left at ambient temperature for 30 min. The absorbance was measured at 750 nm using a UV-vis scanning spectrophotometer (Shimadzu, model UV 21101 PC, Kyoto, Japan). Estimation of TPC was carried out using gallic acid as a standard. The result is expressed as mg gallic acid equivalent per 100 g of sample (dry weight).

2.9 Determination of β-carotene content

Analysis of β-carotene was performed following the method of Hornero-Mendez and Minguez-Mosquera [16] with some modifications. Approximately 0.5 g of dried sample and 75 ml of acetone was stirred using magnetic stirred for 1 h in dark at ambient temperature. The acetone extract was then filtered through Whatman No. 1 filter paper and the filtrated was filled up to 100 mL with acetone. Determination of β-carotene content was done using a UV-vis scanning spectrophotometer at 453 nm. The β-carotene content was calculated on the basis of β-carotene calibration curves and expressed as g per 100 g of sample (dry weight).

2.10 Determination of antioxidant activity (AA)

DPPH radical scavenging activity was conducted according to the method described by Srimoon and Tachai [15]. Briefly, 0.1 mL of aqueous extract was added to 0.5 mL of an ethanol solution and 2.9 mL of 0.1 mM DPPH solution. Absorbance at 515 nm was determined after 30 min, and the percent

inhibition activity was calculated following Eq. (6).

$$\%\text{inhibition} = \frac{(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}})}{(A_{\text{control}})} \times 100 \quad (6)$$

where $A_{control}$ is absorbance without extract; A_{sample} is absorbance with extract

2.11 Statistical analysis

The experiments were designed in complete random. The data were subjected to an analysis of variance (ANOVA) and are presented as mean values with standard deviations. Differences between mean values were established using Duncan's multiple range tests. Values were considered at a confidence level of 95%. All statistical analyses were performed using SPSS® software (version 17) (SPSS Inc., Chicago, IL). All experiments were performed in triplicate.

4. Results and discussion

4.1 Physical properties of dried kaffir lime leaves

The kaffir lime leaves were dried from initial moisture content of 69.28±2.98 % wb. to final moisture content of lower than 12% wb. using heat pump drying at 45, 50 and 55°C. The changes of moisture content of the kaffir lime leaves were presented in Fig. 2. It was found that the moisture content decreased as the drying time elapsed. As expected, the drying temperature had a significant effect on the moisture content of the kaffir lime leaves. In addition, the drying time decreased significantly as the drying temperature increased. The drying time required to reach the final moisture content of samples was found to be 450, 330 and 270 min at 45, 50, and 55°C, respectively (as shown in Table.1).

Table. 1 Drying time to reach the final moisture content below 12% wb. and final moisture content of dried kaffir lime leaves

Temperature (°C)	Drying time (min)	Final moisture content (%wb.)
45	450	9.54±0.52[a]
50	330	9.70±0.70[a]
55	270	8.19±0.45[a]

Different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$).

The value of water activity of kaffir lime leaves was also reduced from 0.96 in the fresh sample to 0.52, 0.43 and 0.38 in the dried samples at 45, 50 and 55°C, respectively (as shown in Table 2). This indicated that the dried samples for all treatments were safe from microbial deterioration as microbials do not grow at a water activity value below 0.60 [17].

Table. 2 Water activity of dried kaffir lime leaves at different HP drying temperatures

Temperature (°C)	Water activity
45	0.52±0.06[a]
50	0.43±0.07[b]
55	0.38±0.03[b]

Different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$).

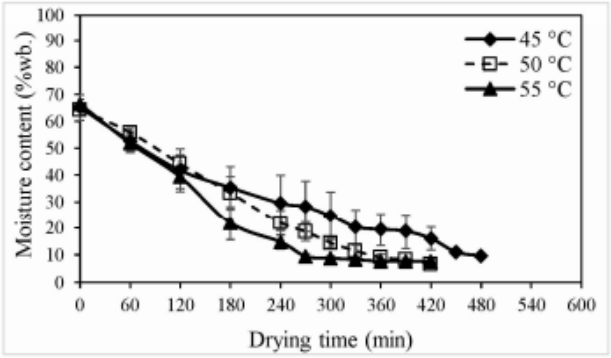


Fig. 2 Changes of moisture content of kaffir lime leaves during HP drying at different temperatures

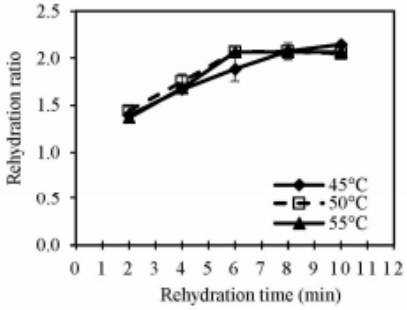


Fig. 3 Rehydration ratio of dried kaffir lime leaves at different drying temperatures

Fig. 3 presents the rehydration ratio of dried kaffir lime leaves at different drying temperatures and rehydration times. It was obvious that the rehydration ratio for all drying temperatures first increased and then reached constant value after soaking time of 6 min. Moreover, increase in drying temperature did not give significant effect to rehydration ratio. The similar findings were observed by Tippayawimon [18] who reported the same behavior of dried carrot by heat pump drying at 45, 50 and 55˚C.

The color parameters of the fresh and dried samples were presented in Table. 3. It could be seen that L* value of the dried sample at 45˚C was higher than that of the fresh sample whereas L* value of the dried sample at 50 and 55˚C were slightly lower than that of the fresh sample. The observations were in agreement with Faungfung [19] who reported that dried kaffir lime leaves showed higher lightness than fresh kaffir leaves. The a* and b* values of kaffir lime leaves increased after drying at all temperatures. This means that the lower greenness but greater yellowness of the dried samples were observed when compared to the fresh one. This might be because thermal degradation of chlorophylls which are green pigments in kaffir lime leaves. Browning pigments were also created by the non-enzymatic browning reaction during drying [7]. Moreover, it was found that all dried samples did not show significant difference of ΔE values.

4.2 Chemical properties of dried kaffir lime leaves

Green color of vegetables is mainly obtained by the chlorophyll a and chlorophyll b pigments available in plants. Table 4 shows the chlorophyll a and b contents in kaffir lime leaves before and after drying. The results revealed that chlorophyll a and b content in dried samples were higher than that in the fresh sample. This is because of thermal degradation of chlorphyll during drying. It was also observed that the lowest chlorophyll content exhibited at 45˚C whereas no significant difference of the chlorphyll content at temperature of 50 and 55˚C was observed. Although degradation of chlorophyll a and b were reported at temperature exceed 50˚C [20], the exposure time of kaffir lime leaves to heat during drying at 45˚C was longer than that that at 50 and 55˚C.

Table 4 Chlorophyll content of fresh and dried kaffir lime leaves at different HP drying temperatures

Sample	Chlorophyll a (mg/100g DW)	Chlorophyll b (mg/100g DW)
Fresh	28.29±0.23^{a}	11.25±0.13^{a}
45°C	4.32±0.11^{c}	1.83±0.13^{c}
50°C	5.66±0.06^{b}	2.53±0.14^{b}
55°C	5.65±0.09^{b}	2.54±0.01^{b}

Different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$).

Table. 3 Color parameters of fresh and dried kaffir lime leaves at different HP drying temperatures

Sample	Color parameters			
	L^*	a^*	b^*	ΔE
Fresh	39.36±0.98^{b}	-9.53±0.20^{c}	15.39±0.26^{b}	-
45°C	43.61±1.26^{a}	-6.38±0.53^{a}	23.43±0.39^{a}	9.62±0.66^{a}
50°C	38.06±0.80^{bc}	-7.68±0.36^{b}	24.38±2.30^{a}	9.27±2.32^{a}
55°C	37.28±1.01^{c}	-7.70±0.30^{b}	24.68±1.40^{a}	9.70±1.35^{a}

Different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$)

The β-carotene and total phenolic content in fresh and dried kaffir lime leaves were illustrated in Table. 5. Similar results to the reduction of chlorophyll content after drying were observed for β-carotene and total phenolic content. It was due to thermal degradation as β-carotene and phenolic compound are sensitive to heat [21]. Among the dried samples, it was also noted that the highest β-carotene content was found at 55°C while the highest total phenolic content was obtained at 50 and 55°C.

Table. 5 β-carotene and total phenolic content (TPC) of fresh and dried kaffir lime leaves at different HP drying temperatures

Sample	β-carotene (mg/g DW)	TPC (mg GAE/g DW)
Fresh	2.93 ± 0.02^{a}	43.03 ± 1.01^{a}
45°C	1.17 ± 0.05^{d}	14.56 ± 0.70^{d}
50°C	1.28 ± 0.02^{c}	17.34 ± 0.32^{bc}
55°C	1.66 ± 0.02^{b}	16.71 ± 0.79^{c}

Different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$).

Antioxidant activity values of fresh and dried samples expressed as %inhibition were given in Table.6. As expected, the fresh sample exhibited higher antioxidant activity value than the dried samples for all temperatures. Furthermore, the changes of antioxidant activity of the dried sample were related to the retention of the antioxidant compounds such as β-carotene and phenolic compounds. Ratseewo [22] reported similar trend of antioxidant activity in kaffir lime leaves depended on the retention of TPC after processing.

Table. 6 Antioxidant activity (AA) of fresh and dried kaffir lime leaves at different HP drying temperatures

Sample	AA (%inhibition)
Fresh	62.23 ± 0.49^{a}
45°C	49.71 ± 0.66^{d}
50°C	51.74 ± 1.88^{c}
55°C	54.11 ± 1.13^{bc}

Different letters in the same column are significantly different from each other ($p < 0.05$).

5. Conclusion

To determine the suitable heat pump drying condition, the effects of different drying temperatures on physical properties namely moisture content, water activity, rehydration ratio and color and chemical properties namely chlorophyll, β-carotene, total phenolic content and antioxidant activity in kaffir lime leaves were investigated. The results showed that heat pump drying at 50°C for 330 min was recommended for production of dried kaffir lime leaves since it provided the better color values and highest chlorophyll, β-carotene, total phenolic content and antioxidant activity.

6. Acknowledgement

The authors express their sincere appreciation to National Research Council of Thailand for supporting the research financially.

7. References

[1] Tirawanchai, N., Kengkoom, K., Isarangkul, D., Burana-osot, J., Kanjanapruthipong, T., Chantip, S., Phattanawasin, P., Sotanaphun, U. and Ampawong, S. (2020). Combination extract of kaffir lime, galangal, and lemongrass maintains blood lipid profiles, hepatocytes, and liver mitochondria in rats with nonalcoholic steatohepatitis, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 124, pp. 1-12.

[2] Siriamornpun, S. Sriket, C. and Sriket, P. (2014). Phytochemicals of Thai local edible herbs. *International Food Research Journal*, vol. 21, pp.1009–1016.

[3] Ratseewo, J., Tangkhawanit, E., Meeso, N., Kaewseejan, N. and Siriamornpun, S. (2016). Changes in antioxidant properties and volatile compounds of kaffir lime leaf as affected by cooking processes, *International Food Research Journal*, vol. 23(1), pp. 188-196.

[4] Venkatachalam, K. (2019). Changes in phytochemicals and antioxidant properties of kaffir lime leaves under chilling storage, *Khon Kaen Agricultural Journal*, vol. 47(1), pp. 531-536.

[5] Tasirin, S.M., Puspasari, I., Lun, A.W., Chai, P.V. and Lee, W.T. (2014).

Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination, *Industrial Crops and Products* vol. 61, pp. 193–201.

[6] Minea, V. (2013). Drying heat pumps Part II: Agro-food, biological and wood products, *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 659-673.

[7] Tunckal, C. and Doymaz, I. (2020). Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system, *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 918-923.

[8] Taşeria, L., Aktaşb, M., Şevikc, S., Gülcüa, M. Seçkina, G.U. and Aktekelid, B. (2018). Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer, *Food Chemistry*, vol. 260, 152–159.

[9] Hou H., Chen Q., Bi J., Wu X., Jin X., Li X., Qiao Y., Lyu Y. (2020). Understanding appearance quality improvement of jujube slices during heat pump drying via water state and glass transition. Journal of Food Engineering, 272, 109874.

[10] Achariyaviriya, S., Ruangkamnoed, W., Achariyaviriya, A. and Namsanguan, Y. (2005). Evaluation of herbs drying performance using heat pump dryer, paper presented in *the 19th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand,* Phuket, Thailand.

[11] Phoungchandang S., Srinukroh W. and Leenanon B. (2008). Kaffir lime leaf (*Citrus hystric* DC.) drying using tray and heat pump dehumidified drying, *Drying Technology*, vol. 26, pp. 1602-1609.

[12] Poomsa-ad, N., Deejing, K. and Wiset, L. (2011). Performance of heat pump dryer for kaffir lime leaves and quality of dried products under different temperatures and media. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 79, pp. 583-586.

[13] AOAC (2000) *Official Method of Analysis of AOAC International* (17th ed). The Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C.

[14] Bekhradi, F., Luna, M.C., Delshad, M., Jordanc, M.J., Sotomayorc, J.A., Conesac, C.M. and Gil, M.I. (2015). Effect of deficit irrigation on the postharvest quality of different genotypes of basil including purple and green Iranian cultivars and a Genovese variety. *Postharvest. Biological Technology*, vol. 100, pp. 127-135.

[15] Srimoon, R. and Tachai, S. (2014). Total phenolic compounds and free radicals scavenging content in processing fruit juice in Chanthaburi province, Rajamangala University of Technology, vol. 7(1), pp. 24-30.

[16] Hornero-Mendez, D. and Minguez-Mosquera, M.I. (2001). Rapid spectrophotometric determination of red and yellow isochromic carotenoid fractions in paprika and red pepper oleoresins, *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, vol. 49(8). pp. 3584-3588.

[17] Fernández, V.M. (2011). Water Activity. In: Gargaud M. et al. (eds) Encyclopedia of Astrobiology. Springer, Berlin, Heidelberg.

[18] Tipayawimol, T. (2012). Maintaining quality of instant dried vegetable by heat pump drying technique, *Research report*, Suranaree University of Technology.

[19] Faungfung, N. (2009). Effect of drying methods on physical, chemical, microbiological and sensory characteristics of kaffir lime leaves (*Citrus hystrix* DC.) during storage, *Master's Thesis*, Prince of Songkla University.

[20] Loey, A.V., Ooms, V., Weemaes, C., Broeck, Van den I., LudikhuyzeIndrawati, L., Denys S. and Hendrickx M. (1998). Thermal and pressure–temperature degradation of chlorophyll in broccoli (*Brassica oleracea* L. italica) juice: A kinetic study. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, vol. 46 (12), pp. 5289-5294.

[21] Ferreira, J.E.M. and Rodriguez-Amay, D.B. (2008). Degradation of lycopene and β-carotene in model systems and in lyophilized guava during ambient storage: Kinetics, structure, and matrix effects, *Journal of Food Science*, vol.73 (8), pp. C589-C598.

[22] Ratseewo, J., Tangkhawanit, E., Meeso, N., Kaewseejan, N. and Siriamornpun, S., (2016). Changes in antioxidant properties and volatile compounds of kaffr lime leaf as affected by cooking processes, *International Food Research Journa*l, vol. 23, pp. 188-196.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ปุณยาพร แสนแปง

เกิดเมื่อ 20 เมษายน 2536

ประวัติการศึกษา ปริญาญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากสาขา วิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้