# การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

วิทยานิพนธ์

ของ

รุกขชาติ ผลผาด

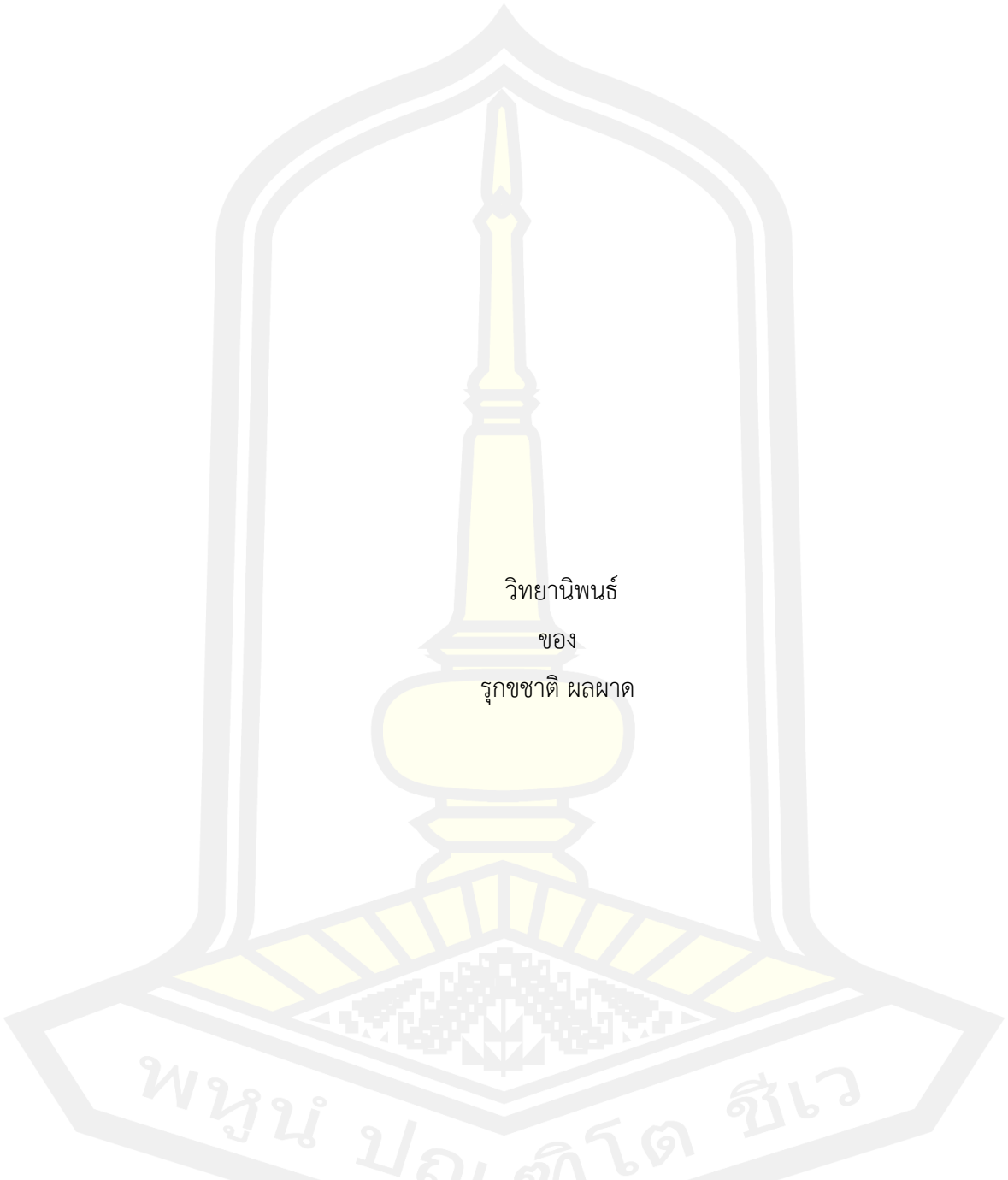
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

# การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



วิทยานิพนธ์

ของ

รุกขชาติ ผลผาด

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มกราคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

# Amaranth (*Amaranthus lividus* L.) Drying using Microwave Combined with Hot Air

Rukkachat Phonphard

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for Master of Engineering (Mechanical Engineering)

January 2022

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายรุกขชาติ ผลผาด แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผศ. ดร. ดลฤดี ใจสุทธิ์ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผศ. ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ )

.....กรรมการ
(รศ. ดร. บพิธ บุปผโชติ )

.....กรรมการ
(รศ. ดร. วสันต์ ด้วงคำจันทร์ )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

| | |
|---|---|
| ..... | ..... |
| (รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป ) | (รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล ) |
| คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ | คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย |

**ชื่อเรื่อง** การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน
**ผู้วิจัย** รุกขชาติ ผลผาด
**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ
**ปริญญา** วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมเครื่องกล
**มหาวิทยาลัย** มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2565

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่กำลังไมโครเวฟ 5 ระดับ ดังนี้ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส อบแห้งจนกระทั่งมีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าสี ค่าคลอโรฟิลล์ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 8 4 3 2.5 และ 2 ชั่วโมง ที่กำลังไมโครเวฟ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งไม่แตกต่างกัน ค่าความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 11.03 - 12.62 ฐานเปียก ค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.48 - 0.57 สำหรับการวิเคราะห์ค่าสี พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเขียว (a*) มีแนวโน้มลดลง ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่กำลังไมโครเวฟ 500 และ 1,000 วัตต์ ปริมาณคลอโรฟิลล์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่กำลังไมโครเวฟ 1,500 และ 2,000 วัตต์ คลอโรฟิลล์มีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าคลอโรฟิลล์สูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาคุณภาพและพลังงาน พบว่าการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมที่สุด เมื่อวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ หากขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในราคา 1,300 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม เมื่อกำหนดอายุโครงการ 5 ปี จะได้อัตราผลตอบแทนภายในการลงทุนร้อยละ 44

คำสำคัญ : ไมโครเวฟ, ลมร้อน, คลอโรฟิลล์

**TITLE** Amaranth (*Amaranthus lividus* L.) Drying using Microwave Combined with Hot Air

**AUTHOR** Rukkachat Phonphard

**ADVISORS** Assistant Professor Nattapol Poomsa-ad , Ph.D.
Assistant Professor Lamul Wiset , Ph.D.

**DEGREE** Master of Engineering **MAJOR** Mechanical Engineering

**UNIVERSITY** Mahasarakham University **YEAR** 2022

## ABSTRACT

This research aimed to study the drying of spinach by using microwave and hot air. The microwave power at 5 levels, was 0 500 1,000 1,500 and 2,000 watts, in combination with hot air at 50°C and 60°C, and drying until the water activity content was lower than 0.6. Then, the color values, chlorophyll value, specific energy consumption, and economic analysis were analyzed. The results revealed that the drying time for 8, 4, 3, 2.5 and 2 hours at microwave power 0, 500, 1,000, 1,500, and 2,000 watts, respectively. The temperature of hot air at 50°C and 60°C were not different. The final moisture content was in the range of 11.03 - 12.62 percent wet basis. The water activity content was in the range of 0.48 - 0.57. The brightness (L*) , greenness (a*) tended to decrease and yellowness (b*) tended to increase with increasing microwave power and temperature. Chlorophyll values were increased at 500 and 1000 watts of microwave power. However, the chlorophyll values were decreared at microwave power of 1,500 and 2,000 watts. The chlorophyll values at 50°C were higher than drying at 60°C. In terms of quality and energy, it was found that drying at 1,000 watts of microwave power combined with hot air at 50°C was the suitable condition. For economic analysis, if the product is sold at 1,300 baht per 1 kilogram when the project life is fixed at 5 years, the internal rate of return will be 44%.

Keyword : Microwave, Hot air, Chlorophyll

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำข้อคิดเห็นและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาส นี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอน้อมรำลึกถึงอำนาจบารมีของคุณพระศรีรัตนตรัย และสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายที่อยู่ในสากลโลก อันเป็นที่พึ่งให้ผู้วิจัยมีสติปัญญาในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีผู้วิจัยขอให้เป็นกตเวทิตาแด่บิดา มารดา ครอบครัวของผู้วิจัย ตลอดจนผู้แต่งหนังสือและบทความต่างๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจนสามารถให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

รุกขชาติ ผลผาด

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ซ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพประกอบ ..... ฎ

บทที่ 1 ..... 13

บทนำ ..... 13

1.1 ภูมิหลัง ..... 13

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ..... 14

1.3 สมมติฐานของการวิจัย ..... 14

1.4 ขอบเขตของการวิจัย ..... 14

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 15

1.6 สถานที่ดำเนินงาน ..... 15

1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ ..... 15

บทที่ 2 ..... 16

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 16

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับผักโขม ..... 16

2.2 คุณค่าทางโภชนาการของผักขม (ผักโขม) ..... 17

2.3 ชนิดของผักขม (ผักโขม) ..... 18

2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying Fundamentals) ..... 18

2.5 ความชื้น ..... 19
2.6 อัตราเร็วในการอบแห้งกับเส้นกราฟแสดงสมบัติการอบแห้ง ..... 20
2.7 การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating) ..... 21
2.8 การอบแห้ง ..... 22
2.9 การใช้พลังงานไมโครเวฟเข้าไปร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน ..... 25
2.10 หลักการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ..... 26
2.11 การวัดค่าการแตกตัวอิสระของน้ำ ..... 26
2.12 คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ..... 29
2.13 การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน ..... 29
2.14 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทน (Rate of return analysis) ..... 31
2.15 ค่าสี ..... 32
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 33
บทที่ 3 ..... 40
วิธีดำเนินการวิจัย ..... 40
3.1 การเตรียมผักโขม ..... 40
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 40
3.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ..... 41
3.4 การออกแบบการทดลอง ..... 42
3.5 วิธีการทดลอง ..... 42
3.6 คุณภาพผักโขมหลังการอบแห้ง ..... 44
3.7 ศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ..... 46
3.8 การหาต้นทุนในการอบแห้งและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ..... 47
บทที่ 4 ..... 49
ผลการทดลอง ..... 49

4.1 ผลการวิเคราะห์ ค่าความชื้น เวลาในการอบแห้งและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ผักโขม 49
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพ ..... 50
4.3 ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ..... 55
4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ..... 56
4.5 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ..... 57
บทที่ 5 ..... 61
สรุปผลการทดลอง ..... 61
5.1 ระยะเวลาในการอบแห้งและความชื้น ..... 61
5.2 คุณภาพของผักโขมอบแห้ง ..... 61
5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ..... 61
5.4 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ..... 62
5.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ..... 62
5.6 ข้อเสนอแนะ ..... 62
บรรณานุกรม ..... 62
ภาคผนวก ..... 67
ภาคผนวก ก. ..... 68
ตารางผลการทดลอง ..... 68
ภาคผนวก ข. ..... 89
ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ..... 89
ภาคผนวก ค. ..... 93
เครื่องมือและอุปกรณ์ ..... 93
ประวัติผู้เขียน ..... 97

# สารบัญตาราง

**หน้า**


ตาราง 1 ในส่วนของใบผักขมสด 100 กรัม ให้คุณค่าทางโภชนาการดังนี้ ..... 17

ตาราง 2 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารต่อระดับปริมาณน้ำอิสระ ..... 28

ตาราง 3 ระยะเวลาการเปิดปิดแมกนีตรอน ..... 43

ตาราง 4 ความชื้น ระยะเวลาและปริมาณน้ำอิสระของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ..... 49

ตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ค่าสี L* a* b* ของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ..... 52

ตาราง 6 ผลการวิเคราะห์ค่า Chroma และค่า Hue angle ของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ..... 53

ตาราง 7 ผลการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมอบแห้ง ..... 54

ตาราง 8 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง ..... 55

ตาราง 9 ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผักโขม ..... 56

ตาราง 10 ต้นทุนแปรผันในการอบแห้งใน 1 วัน ..... 58

ตาราง 11 รายได้จาการขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในระยะเวลา 1 ปี ..... 58

ตาราง 12 กำไรสุทธิในแต่ละปี ..... 59

ตาราง 13 ระยะเวลาคืนทุนในการขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในราคาต่าง ๆ ..... 59

ตาราง 14 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) และผลิตภัณฑ์ในราคาต่าง ๆ ..... 60

# สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ต้นผักโขม ..... 16
ภาพประกอบ 2 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ ..... 20
ภาพประกอบ 3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ..... 21
ภาพประกอบ 4 กลไกการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ..... 22
ภาพประกอบ 5 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง ..... 23
ภาพประกอบ 6 ช่วงอัตราการอบแห้ง ..... 23
ภาพประกอบ 7 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ..... 26
ภาพประกอบ 8 ค่าสีในระบบ CIE L*a*b ..... 33
ภาพประกอบ 9 ผักโขมทีปลูกที่เขตอำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ ..... 40
ภาพประกอบ 10 แผนผังโครงสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ..... 42
ภาพประกอบ 11 ลำดับหัวแมกนีตรอนในห้องอบแห้ง ..... 42
ภาพประกอบ 12 เครื่องวัดสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939 ..... 45
ภาพประกอบ 13 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ..... 46
ภาพประกอบ 14 ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลังไมโครเวฟต่าง ๆ ..... 51

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ภูมิหลัง

ในปัจจุบันการบริโภคผักและผลไม้ในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากประชากรส่วนใหญ่มีการเอาใจใส่ในเรื่องของการรักษาสุขภาพ ซึ่งผักที่บริโภคกันส่วนใหญ่จะเป็นผักเศรษฐกิจที่ปลูกกันอยู่ทั่วไปภายในประเทศ เช่น ผักคะน้า ผักกาดขาว ผักบุ้ง เป็นต้น นอกจากผักต่าง ๆ เหล่านี้แล้วยังมีผักอีกประเภทหนึ่งที่มีการบริโภคกันมาช้านานแล้ว เรียกว่า ผักพื้นบ้าน เช่น ผักโขม

ผักโขม (Amaranthus) เป็นผักพื้นบ้านที่พบขึ้นทั่ว ๆ ไปแทบทุกภาคของประเทศไทย ใช้เป็นอาหาร และสมุนไพร ส่วนที่นิยมนำมาปรุงอาหารคือยอดและใบ (เดชา ศิริภัทร, 2538) ผักโขมเป็นผักพื้นบ้านที่ปลูกง่าย สามารถเติบโตได้อย่างรวดเร็ว มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมล็ดและใบของผักโขมเมื่อเปรียบเทียบกับพืชผักหรือธัญพืชชนิดอื่น ซึ่งผักโขมเป็นผักที่ให้คุณประโยชน์และสรรพคุณทางยามากมาย ช่วยป้องกันโรคมะเร็ง โรคเบาหวาน โรคโลหิตจาง และความดันโลหิตสูง เนื่องจากผักโขมมีทั้งโปรตีน วิตามิน กรดอะมิโน และแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งผักโขมยังแบ่งเป็นพันธุ์ต่าง ๆ ได้ คือ ผักโขมสวน ผักโขมจีน ผักโขมหัด และผักโขมหวาน (สุธาทิพ ภมรประวัติ , 2550) โดยการจะเก็บรักษาพืชผักให้อยู่ได้นานและรักษาสรรพคุณต่าง ๆ ให้คงอยู่นั้นโดยทั่วไปนิยมนำมาแปรรูปด้วยวิธีการทำแห้งเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและคงคุณค่าทางอาหารไว้ ซึ่งผักโขมนิยมนำมาแปรรูปโดยนำไปอบแห้ง บดเป็นผงหรือทำเป็นแป้ง ใช้เป็นส่วนประกอบของอาหาร เพื่อเพิ่มคุณค่าให้กับผักโขม เพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ (จุรีมาศ ดีอำมาตย์, 2557) และวิธีการทำแห้งที่นิยม คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยลมร้อนจะใช้เวลานาน ส่งผลทำให้สูญเสียคุณค่าทางอาหาร (ชาลิดา บรมพิชัยชาติกุล, 2555)

การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น โดยการลดปริมาณน้ำอิสระ (water activity) ให้ต่ำจนถึงระดับที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และการทำงานของเอนไซม์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในอาหาร ในปัจจุบันมีการพัฒนาการอบแห้งโดยการนำเทคนิคการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ในการอบแห้งผลไม้และพืชผักทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย เช่น ถั่วลิสง (ร้อยทิศ ญาติเจริญ, 2558) ขนุน (สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล, 2555) มะม่วงน้ำดอกไม้ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2562) ทุเรียนแผ่น (สุวิทย์ แพง

กันยา และคณะ, 2558) เป็นต้น พบว่าการอบแห้งโดยใช้ คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้เป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งชนิดอื่น

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาคุณภาพของผักโขมโดยการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้ง คุณภาพของตัวอย่างผักโขมหลังอบแห้ง การหาต้นทุนในการอบแห้งและวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาคุณภาพของตัวอย่างผักโขมหลังอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

1.2.3 เพื่อศึกษาหาต้นทุนในการอบแห้งผักโขมและวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่ระดับแตกต่างกัน จะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของสีภายหลังการอบแห้งมีความแตกต่างกัน และการนำไมโครเวฟมาอบแห้งร่วมกับอากาศร้อนทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลงและต้นทุนในการอบแห้งลดลง

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาการอบแห้งผักโขมเขียว

1.4.2 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีขนาดห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีความกว้างxยาวxสูง เท่ากับ 60 x 60 x 60 เซนติเมตร

1.4.3 กำลังไมโครเวฟเฉลี่ย 5 ระดับได้แก่ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์

1.4.4 อุณหภูมิลมร้อน 2 ระดับได้แก่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

1.4.5 ความเร็วลม 1 เมตร/วินาที

1.4.6 ผักโขมที่ใช้ในการอบแห้งครั้งละ 2 กิโลกรัม

1.4.7 อบแห้งจนกระทั่งค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ น้อยกว่า 0.6

1.4.8 วิเคราะห์คุณภาพสี และคลอโรฟิลล์หลังการอบแห้ง

**1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1.5.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

1.5.2 ทราบถึงต้นทุนที่ใช้ในการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและความคุ้มค่าในการลงทุน

1.5.3 ทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพสี และคลอโรฟิลล์ของผักโขมที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่สภาวะแตกต่างกัน

**1.6 สถานที่ดำเนินงาน**

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

**1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ**

1.7.1 ผักโขม หมายถึง พืชในวงศ์ Amaranthaceae มักขึ้นตามแหล่งธรรมชาติ เช่น ป่าละเมาะ ชายป่ารกร้าง เป็นวัชพืชในสวนผัก สวนผลไม้ ขึ้นง่าย ขึ้นมากหน้าฝน เป็นพืชล้มลุก อายุปีเดียว ต้นสีเขียวตรง แตกกิ่งก้านสาขามาก ใบเป็นใบเดี่ยว รูปไข่คล้ายโล่ ออกแบบสลับ กว้าง 2-8 เซนติเมตร ยาว 3-10 เซนติเมตร ขอบใบเรียบ ดอกออกเป็นช่อสีม่วงปนเขียว ตามซอกใบและยอด เมล็ดสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ สูงราว 2 ฟุต ชอบดินที่ร่วนซุย ชุ่มชื้น ขึ้นใต้ร่มเงา ขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด

1.7.2 ไมโครเวฟ หมายถึง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับแสงสว่าง โดยอยู่ในช่วงของคลื่นวิทยุความถี่สูง เมื่อรังสีมีความถี่สูงขึ้น ความยาวคลื่นจะลดลง คลื่นที่มีความถี่สูงมาก ความยาวคลื่นจึงสั้นมาก ดังนั้น คลื่นชนิดนี้จึงได้ชื่อว่าไมโครเวฟ ซึ่งแปลว่าคลื่นสั้นมาก

1.7.3 ลมร้อน หมายถึง กระบวนการอบแห้งที่ใช้ลมร้อนในการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ ทำให้สามารถเก็บวัตถุดิบได้นานขึ้น ใช้ในการแปรรูปผลผลิตต่าง ๆ โดยสามารถอบวัตถุดิบได้หลากหลาย

1.7.4 แมกนีตรอน หมายถึง สำหรับผลิตคลื่นไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟที่ผลิตออกมานี้มีความถี่ 2,450 MHz ซึ่งจะปล่อยออกมาที่ช่องว่างภายในเตาที่มีผนังเป็นโลหะ คลื่นไมโครเวฟจะสะท้อนไปมาอยู่ภายในเตาและถูกดูดกลืนโดยอาหารหรือเครื่องดื่มที่เราใส่เข้าไป การดูดกลืนที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้บางตำแหน่งเกิดจุดร้อน (hot spots) ขึ้น

1.7.5 คลอโรฟิลล์ หมายถึง รงควัตถุสีเขียวที่มีในพืช ทำหน้าที่ดูดพลังงานแสงสว่างมาใช้ในกระบวนการสร้างอาหาร หรือการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยใช้น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเป็นวัตถุดิบมาผลิตคาร์โบไฮเดรต

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับผักโขม

ผักโขม มีชื่อพื้นบ้านว่า ผักขม ผักโหม ผักโขมหัด ผักโขมหนาม จัดเป็นไม้ล้มลุกมีความสูงต้นประมาณ 1-1.50 เมตร ลำต้นและกิ่งก้านมีหนาม ใบยาวรีมีรูปร่างคล้ายรูปหัวใจ ดังแสดงในภาพประกอบ 1 ดอกออกเป็นช่อดอก มีสีเขียว เมื่อแก่ช่อดอกจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ผักโขม มีชื่อภาษาอังกฤษว่า อะมาแรนท์ส (Amaranth) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า อะมาแรนทัส ไวริดิสจัดอยู่ในวงศ์อะมาแรนทาซี้อี้ (Amaranthus viridis L. Amaranthaceae) ผักโขม มีคุณค่าทางโภชนาการ คือ ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก วิตามินเอ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 ไนอาซิน และวิตามินซี

ที่มา : (อดุลย์ศักดิ์ ไชยราช, 2562)

ภาพประกอบ 1 ต้นผักโขม

**2.2 คุณค่าทางโภชนาการของผักขม (ผักโขม)**

ตาราง 1 ในส่วนของใบผักขมสด 100 กรัม ให้คุณค่าทางโภชนาการดังนี้

| น้ำหนักวัตถุแห้ง (กรัม) | 13.1 |
|---|---|
| พลังงาน (แคลอรี่) | 36.0 |
| โปรตีน (กรัม) | 3.5 |
| ไขมัน (กรัม) | 0.5 |
| คาร์โบไฮเดรต (กรัม) | 6.5 |
| กากใย (กรัม) | 1.3 |
| แคลเซียม (มิลลิกรัม) | 267.0 |
| ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม) | 67.0 |
| เหล็ก (มิลลิกรัม) | 3.9 |
| โซเดียม (มิลลิกรัม) | - |
| โพแทสเซียม (มิลลิกรัม) | 411 |
| วิตามินเอ (IU) | 6100 |
| ไทอะมีน (มิลลิกรัม) | 0.08 |
| ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม) | 0.16 |
| ไนอะซิน (มิลลิกรัม) | 1.4 |
| วิตามินซี (มิลลิกรัม) | 80.0 |
| วิตามินเค (มิลลิกรัม) | 319.2 |

ที่มา : (กองบรรณาธิการ HONESTDOCS, 2018)

**2.3 ชนิดของผักขม (ผักโขม)**

ผักขมพันธุ์ต่าง ๆ ที่พบเห็นได้ทั่วไปในเขตศูนย์สูตรและอบอุ่นเหนือมีดังนี้

2.3.1 ผักขมสวน/ผักขมสี (Red amaranth) หรือ Joseph s coat มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Amaranthus tricolor L.* ชื่อจีนคือ Een choy ชื่อญี่ปุ่นคือ Santonsai มาเลเซียเรียก Bayam ส่วนชาวซาอีร์ (Zaire) เรียก Lenga lenga ใบของผักขมสวนมีสีเขียว บริเวณเส้นกลางใบมีสีแดง เมื่อปรุงสุกจะมีสีแดงอมม่วงและมีน้ำสีม่วงไหลออกมา

2.3.2 ผักขม (Amaranth green) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Amaranthus lividus L.* ชื่อจีนคือ Hinn choy ในประเทศไทยแถบภาคกลางเรียกผักขมหรือผักโขม ภาคอีสานเรียกผักหม ภาคใต้เรียกผักโหม ภาคเหนือแถบแม่ฮ่องสอนเรียกผักโหมเกลี้ยง และชาวกะเหรี่ยงเรียกเหม่อลอเดอ

2.3.3 ผักขมหัด (Slender amaranth) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Amaranthus vividis L.* ภาคใต้เรียกผักขมหรือผักหม ใบของผักขมหัดจะมีขนเล็กน้อย

2.3.4 ผักขมหนาม (Spiny amaranth, Spiny pigweed) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Amaranthus spinosus L.* ภาคใต้เรียกว่าผักโหมหนาม กระเหรี่ยงเรียก กะเหม่อลอมี ผักขมหนามจะมีหนามที่ซอดอก ผักขมบางชนิด เช่น Amaranthus leucocarpus มีเมล็ดจำนวนมาก ชาวพื้นเมืองอเมริกาเหนือและละติน อเมริกาเก็บเมล็ดดังกล่าวไปบดเป็นแป้งที่มีโปรตีนสูงใช้ประกอบอาหารได้ดี

**2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying Fundamentals)**

การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ความร้อนถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งไปยังวัสดุที่มีความชื้นเพื่อไล่ ความชื้นออกโดยการระเหย อาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหยซึ่งหัวข้อที่สำคัญที่สุดในการอบแห้งคือ การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด แต่เนื่องจากเหตุผลต่าง ๆ ในการที่จะนำหลักการที่เห็นได้ชัดแจ้งนี้มาใช้อย่างเต็มที่นั้น ทางภาคปฏิบัติของ การออกแบบและการเดินเครื่องนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ไม่ง่ายนัก

ในการอบแห้งทั่วไปมักใช้ลมร้อนในการอบแห้ง ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากลมร้อนไปยังวัสดุ ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำ โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิวโดย Capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface force) ส่วนไอน้ำในวัสดุจะเคลื่อนที่เนื่องจากความแตกต่างของความเข็มข้นของความชื้น (Vapor diffusion) และความดันไอที่แตกต่างระหว่างไอน้ำที่แตกต่างระหว่างไอน้ำในวัสดุกับลมร้อน ถ้าผิวของวัสดุมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งคงที่ด้วยถ้าอุณหภูมิ ความชื้นและ ความเร็วของลมร้อนมีค่าคงที่และเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอ น้ำที่บริเวณผิวของวัสดุย่อมเปลี่ยนไป โดยที่อุณหภูมิจะสูงขึ้นและความเข้มข้นของไอ

น้ำที่ผิวของวัสดุจะ ลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงความชื้นที่อยู่ระหว่างการอบแห้งด้วยอัตราคงที่ และอัตราการ อบแห้งลดลง เรียกว่า ความชื้นวิกฤต อัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่าง ของความดันไอ จะเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับความชื้นสมดุล

**2.5 ความชื้น**

ความชื้น (moisture content, M) คือค่าบ่งบอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร เป็นสมบัติที่มีความสำคัญมากเนื่องจาก เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์จากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ยีส และรา นอกจากนี้ความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงความร้อน เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด การนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) คุณภาพ ทางประสาทสัมผัสซึ่งมีผลต่อการยอมรับของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบ ความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking) การเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)

ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์จะอธิบายอยู่ในรูปร้อยละความชื้น ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ร้อยละความชื้นฐานเปียก และร้อยละความชื้นฐานแห้ง โดยร้อยละฐานเปียก ($M_w$) สามารถหาได้จาก สมการที่ 2.1

$$M_w = \frac{W - d}{w} \times 100 \qquad (2.1)$$

เมื่อ $M_w$ คือ ร้อยละความชื้นฐานเปียก (% w.b.)
w คือ มวลของวัสดุชื้น (กรัม)
d คือ มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

ร้อยละความชื้นฐานแห้ง ($M_d$) โดยร้อยละฐานแห้งสามารถหาได้จากสมการ 2.2

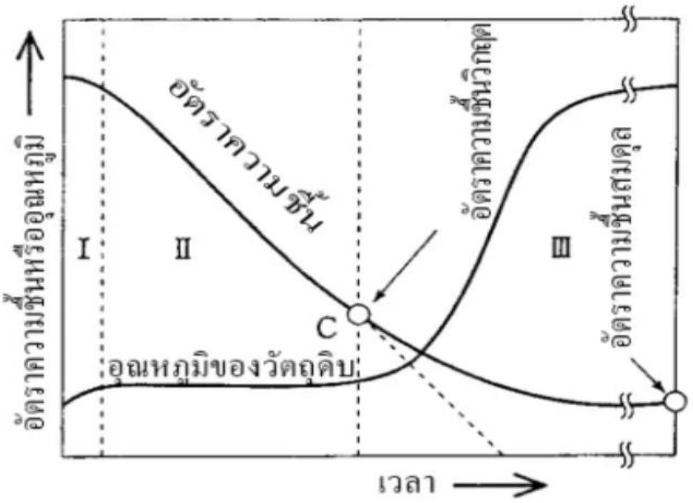
$$M_d = \frac{W - d}{d} \times 100 \qquad (2.2)$$

เมื่อ $M_d$ คือ ร้อยละความชื้นฐานแห้ง (% d.b.)
w คือ มวลของวัสดุชื้น (กรัม)
d คือ มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

**2.6 อัตราเร็วในการอบแห้งกับเส้นกราฟแสดงสมบัติการอบแห้ง**

เมื่อนำวัตถุดิบที่จะอบซึ่งเปียกชื้นอย่างเพียงพอถึงผิวหน้ามาแขวนไว้ในกระแสลมร้อน แล้วติดตามตรวจวัดอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบนั้น โดยทั่วไปจะได้ผลลัพธ์ภาพประกอบ 2

ซึ่งกลไกการอบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะที่มีลักษณะแตกต่างกัน กล่าวคือ ช่วงอุ่นวัตถุดิบ ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วคงที่ และ ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วลดลง




ที่มา : (eng.sut.ac.th, 2558)

ภาพประกอบ 2 การเปลี่ยนแปลงของอัตราความชื้นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบ

2.6.1 ช่วงอุ่นวัตถุดิบ

ช่วงอุ่นวัตถุดิบ เป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัตถุดิบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งต้น (อุณหภูมิห้อง) จนถึงอุณหภูมิสมดุลที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการอบแห้ง เรียกว่า ช่วงอุ่นวัตถุดิบ ในกรณีที่วัตถุดิบได้รับความร้อนด้วยการพาความร้อนโดยลมร้อน อุณหภูมิสมดุลนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของลมร้อนนั้น

2.6.2 ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วคงที่

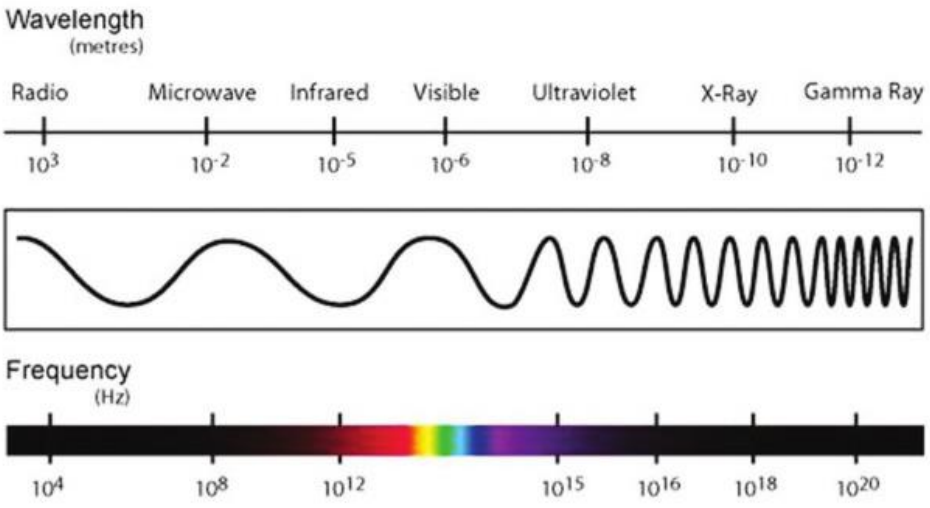
ในช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วคงที่ ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้รับจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นเท่านั้น ชั้นของการระเหยจะเกิดที่ผิวหน้าของวัตถุดิบโดยอัตราเร็วในการอบจะมีค่าคงที่ ช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วคงที่ ซึ่งจะดำเนินไปตราบเท่าที่มีความชื้นอิสระให้ระเหยอยู่ที่ผิวหน้าของวัตถุดิบ โดยอัตราความชื้นของวัตถุดิบจะลดลงด้วยอัตราเร็วคงที่

2.6.3 ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วลดลง

เมื่ออบแห้งไปเรื่อย ๆ จนปริมาณความชื้นที่ผิวหน้าวัตถุดิบแห้งลง และความชื้นภายในเนื้อวัตถุดิบเริ่มลดลง ความชื้นอิสระภายในตัววัตถุดิบจะซึมขึ้นมาทดแทน ให้ทันกับอัตราเร็วในการระเหยที่ผิวหน้า ได้แก่ ช่วงอบแห้งด้วยอัตราเร็วลดลง ชั้นของการระเหยจะค่อยๆ เลื่อนลงลึกเข้าไปในเนื้อวัตถุดิบ อุณหภูมิของวัตถุดิบจะเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนจากบริเวณพื้นผิว ในการอบแห้งความร้อนจะต้องเข้าไปถึงภายในเนื้อวัตถุดิบ นอกจากนี้ความร้อนส่วนหนึ่งยังต้องใช้ไปในการให้ความร้อนตัววัตถุดิบเองอีกด้วย อัตราเร็วในการอบจึงค่อย ๆ ลดลงตามเวลาที่ผ่านไป

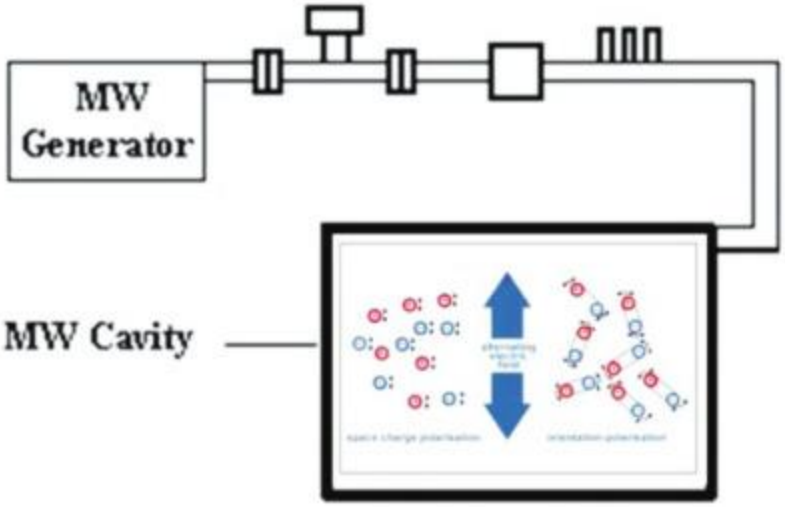
**2.7 การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Heating)**

พลังงานจากรังสีไมโครเวฟเป็นพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ หรือ 915 เมกะเฮิรตซ์ (ภาพประกอบ 3) การให้ความร้อนด้วยตู้อบไมโครเวฟแตกต่างจากการให้ความ ร้อนด้วยเครื่องอบธรรมดาดังแสดงในภาพประกอบ 3 และ 4 คือเครื่องอบธรรมดาให้ความพลังงาน ความร้อนโดยเปลวไฟแบบเตาแก๊สหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้อาหารสุกโดยการถ่ายเท ความร้อน 3 วิธี คือการนำ การพา และการแผ่รังสี แต่ตู้อบไมโครเวฟทำให้อาหารสุกโดยคลื่นไมโครเวฟ ที่มีความถี่สูงถึง 2,450 ล้านรอบ/วินาที ทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารสั่นสะเทือนและซนโมเลกุลอื่น ๆ ต่อไปจนเกิดเป็นพลังงานจลน์ และพลังงานจลน์นี้เองจะกลายสภาพเป็นพลังงานความร้อนที่ทำให้ อาหารสุกอย่างรวดเร็วกว่าการประกอบอาหารด้วยระบบอื่น ๆ




ที่มา : (ปรับปรุงจาก http://www.butane.chem.uiuc.edu, 2562)

ภาพประกอบ 3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

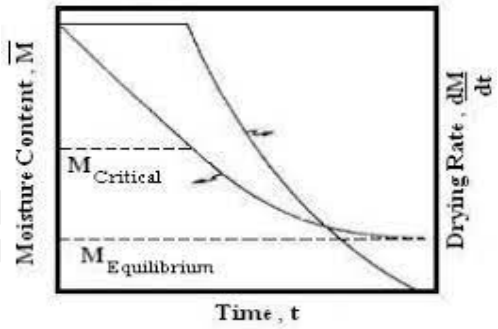



ที่มา : (ปรับปรุงจาก http://www.pueschner.con, 2562)

ภาพประกอบ 4 กลไกการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

**2.8 การอบแห้ง**

การอบแห้งวัสดุโดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมากอุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ และถ้าอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมของอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลง อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิที่ผิวจะสูงขึ้นและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลง ดังภาพประกอบ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิความชื้นและความเร็วของอากาศคงที่ ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า “ความชื้นวิกฤต”

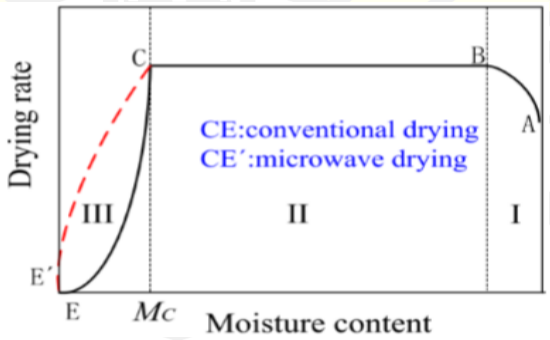



ที่มา: (Brooker et al., 1987)

ภาพประกอบ 5 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง

2.8.1 อัตราการอบแห้ง

การอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่โครงสร้างภายในเป็นรูพรุนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ของการอบแห้ง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ (constant rate period) และช่วงอัตราการ อบแห้งแบบลดลง (falling rate period) ที่ช่วงของอัตราการอบแห้งแบบคงที่ ผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณ ความชื้นมากกว่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) คือผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณความชื้นที่บริเวณผิวเป็นจำนวนมาก ความชื้นที่ผิวผลิตภัณฑ์จะระเหยไปในอากาศ โดยอาศัยการถ่ายเทความ ร้อนระหว่างอากาศและผลิตภัณฑ์มักจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวนอกเท่านั้น ที่ช่วงของอัตราการอบแห้ง แบบลดลงจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าความชื้นวิกฤต น้ำภายในวัสดุจะ เคลื่อนที่มายังผิวนอกในลักษณะของของเหลวและไอน้ำและระเหยจากผิวไปยังอากาศ ดังแสดงภาพประกอบ 6




ที่มา: (Song et al., 2017)

ภาพประกอบ 6 ช่วงอัตราการอบแห้ง

จากภาพประกอบ 6 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วง สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของการอบแห้งแต่ละช่วงได้ดังนี้ ช่วง AB เป็นช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง ซึ่งใช้ระยะเวลาสั้นๆ ผิวผลิตภัณฑ์ยังมี อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet bulb temperature)

ช่วง BC แสดงถึงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ ในช่วงนี้ที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะ อิ่มตัวไปด้วยไอน้ำ ทำให้การอบแห้งจะดำเนินไปในอัตราคงที่ ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการ อบแห้งช่วงนี้ คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม อาจเป็นไปได้ว่าความขรุขระของ ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่มีชั้นฟิล์มของน้ำอยู่ จะเพิ่มการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ ที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ขณะนี้จะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงนี้น้ำภายในจะเคลื่อนตัวมาสู่ผิว นอกตลอดเวลาเพื่อทดแทนน้ำในส่วนที่ระเหยออกไปในอัตราส่วนที่เท่ากัน โดยกลไกและการ เคลื่อนย้ายของน้ำจะแปรผันไปตามโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

ช่วง CE แสดงถึงอัตราการอบแห้งแบบลดลง (falling rate) น้ำที่ผิวหน้า ผลิตภัณฑ์จะหมดไปเรื่อย ๆ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำไปยังผิวหน้าต่ำกว่าอัตราการระเหย ของน้ำจากผิวไปยังอากาศ ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะแห้งลงเรื่อย ๆ อัตราการดึงน้ำออกของช่วงนี้จึงช้า กว่าช่วงอัตราการอบแห้งแบบคงที่ อัตราการระเหยของน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการ เคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ในขณะนั้น ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกปริมาณ ความชื้นจะต่ำลงเรื่อย ๆ ระยะทางในการแพร่หรือการเคลื่อนที่ของความร้อนและมวลจะมากขึ้น จน ในที่สุดความเข้มข้นของน้ำภายในที่เป็นความชื้นน้ำอิสระจะหมดไป ความชื้นวัสดุที่หาได้ ณ จุดนี้ คือ ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) หรือจุด E จะไม่มีการลดลงของปริมาณความชื้นอีก (Song et al., 2017)

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการส่งผ่านความ ร้อนจะเกิดขึ้นช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการอบแห้ง คือ

1) ลักษณะทางธรรมชาติของผลิตภัณฑ์

เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ถ้าสภาพทาง ธรรมชาติของผลิตภัณฑ์เอื้ออำนวยต่อการส่งผ่านความร้อนไปยังโมเลกุลของน้ำภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ และเอื้ออำนวยต่อการเคลื่อนที่ของไอน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน โมเลกุลของน้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์สามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ง่ายทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

2) ขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดและรูปร่างที่ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ต่อปริมาตรมากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านความร้อนให้ทั่วชิ้นผลิตภัณฑ์ทำให้การระเหยน้ำออกจากเนื้อ ผลิตภัณฑ์ดีขึ้น อัตราการอบแห้งจึงเร็วขึ้น

3) ปริมาณและการจัดเรียงผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่นำมาจัดเรียงซ้อนกันหลายๆ ชั้นในถาดทำให้ปริมาณของ ผลิตภัณฑ์ต่อถาดมากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่บริเวณตรงกลางได้รับความร้อนไม่ทั่วถึง ทำให้บริเวณนั้นมีอัตราการอบแห้งที่ช้า การจัดเรียงที่เหมาะสมควรทำการจัดเรียงแบบชั้นบางเพื่อให้ ผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ

4) อุณหภูมิของอากาศร้อน

เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้นอัตราการอบแห้งก็จะเร็วขึ้น เนื่องจาก ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนกับผลิตภัณฑ์มีมากทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่น้ำใน เนื้อผลิตภัณฑ์ได้ดีจึงทำให้น้ำในเนื้อผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่และระเหยได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะ ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่ก็ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งด้วย

5) ความชื้นของอากาศร้อน

หากความชื้นของอากาศร้อนมีค่ามากจะมีผลให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการ ระเหยของไอน้ำออกจากเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ยาก

6) ความดันของบรรยากาศ

การอบแห้งโดยทั่วไปมักทำที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ ถ้าหากมีการลดลงของ บรรยากาศในขณะทำการอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากจะทำให้จุดเดือดของน้ำลดลงซึ่งการอบแห้งประเภทนี้เหมาะกับการอบแห้งที่เสื่อมคุณภาพได้ง่ายเนื่องจากความร้อน เครื่อง อบแห้งมีการลดความดันในสภาวะการอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบลูกกลิ้ง เป็นต้น

7) ความเร็วอากาศร้อน

ความร้อนของอากาศร้อนหากมีค่ามากจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวหน้า ผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้น ทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น

8) สมบัติเชิงความร้อน

คุณสมบัติเชิงความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง คือ ความร้อนจำเพาะ สภาพการนำความร้อน และการแพร่ความร้อน ส่วนคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความ หนาแน่น และสัดส่วนช่องว่างอากาศในการอบแห้ง

**2.9 การใช้พลังงานไมโครเวฟเข้าไปร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อน**

การใช้พลังงานไมโครเวฟเข้าไปร่วมในการอบแห้งด้วยลมร้อนนั้น มีการใช้อยู่ 3 แนวทาง คือ

2.9.1 การใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ จุดเริ่มต้นของการระเหยน้ำ ภายในวัสดุจะมีความร้อนอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นไอ ไอน้ำจะถูกดันออกภายนอกทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวของผลิตภัณฑ์

อัตราการอบแห้งที่เร็วขึ้นทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูปพรุนของวัสดุ จึงส่งผลดีต่อการส่งถ่ายน้ำออกสู่ภายนอก

2.9.2 การนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ร่วม เพื่อการอบแห้งที่ลดลง ในกรณีนี้ที่ผิวของวัสดุจะแห้ง และมีความชื้นหนาแน่นอยู่ในศูนย์กลางของวัสดุ ซึ่งการใช้พลังงานไมโครเวฟ ณ เวลานี้จะทำให้เกิดความร้อนภายในจนแรงดันไอน้ำจะดันความชื้นสู่ผิวซึ่งพร้อมที่จะระเหยออกไป

2.9.3 มีการทดลองนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในช่วงการอบแห้งที่คงที่ เมื่อมาถึงช่วงการอบแห้งที่คงที่แล้วในการอบแห้งด้วยลมร้อนธรรมดานั้น การระเหยของน้ำจะช้ามากทำให้เสียเวลาและ พลังงานในการอบแห้งมาก ในบางกรณีที่นำพลังงานไมโครเวฟมาร่วมในช่วงนี้พบว่ามีประสิทธิภาพอย่าง มากในการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

## 2.10 หลักการทำงานและส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

หลักการทำงานเริ่มต้น จะมีการให้ความร้อนกับวัสดุอบแห้ง 2 ทาง คือ ทางแรกเมื่ออากาศที่ใช้ ในการอบแห้งถูกเป่าเข้ามาทาง Blower โดย Heater จะเป็นตัวให้ความร้อนกับอากาศ แล้วผ่านระบบ ท่อเข้าสู้ห้องอบแห้ง ทางที่สอง คือ การแผ่รังสีความร้อนของเตาไมโครเวฟ โดยมีหลอดแมกนีตรอนเป็น ต้นกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2,450 +50 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจากทั้งลองทางทำให้ น้ำมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้น เมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างภายในวัสดุที่อบแห้งกับภายนอก ทำให้ เกิดการระเหยของน้ำขึ้นแล้วปริมาณน้ำที่ระเหย จะถูกพาออกไปกับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง (พิรามิตร ปัดถา และคณะ, 2548)

## 2.11 การวัดค่าการแตกตัวอิสระของน้ำ

ภาพประกอบ 7 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้

ปริมาณน้ำอิสระ เป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่ออายุการเก็บของอาหาร ในขณะที่อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปัจจัยอื่น ๆ มีผลกระทบต่อความเร็วในการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร ปริมาณน้ำอิสระจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมการเสียของอาหารตัวอย่างเช่น แบคทีเรียเกือบ ทุกชนิดไม่สามารถเติบโตได้ที่ ปริมาณน้ำอิสระ ต่ำกว่า 0.91 วัดโดยใช้เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ดังแสดงภาพประกอบ 7 ในขณะที่ราส่วนมากหยุดการเจริญเติบโต เมื่อปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.80 เราสามารถประเมินได้จากการวัดค่า ปริมาณน้ำอิสระ ว่าจุลินทรีย์ ชนิดใดเป็น หรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเสีย ปริมาณน้ำอิสระ เป็นปัจจัยชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดที่มี อยู่เพื่อการเจริญของจุลินทรีย์นอกจากนั้น ปริมาณน้ำอิสระ ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ และวิตามินในอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหารอย่างชัดเจนเครื่องวัด ค่า ปริมาณน้ำอิสระ จะวัดปริมาณน้ำอิสระ (Free Water; หนังสืออ้างอิงบางฉบับอาจใช้เป็น Unbound หรือ Active Water) ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งกระบวนการรักษาอาหารหลาย ๆ กระบวนการ มีจุดมุ่งหมายที่จะป้องกันการเสียของอาหารโดยการลดปริมาณน้ำที่มีสำหรับจุลินทรีย์ การลดปริมาณน้ำ อิสระจะลดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ไม่ต้องการให้เกิดในระหว่างการเก็บรักษาด้วยกระบวนการที่ นำมาใช้เพื่อลดปริมาณน้ำอิสระสำหรับผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคที่ใช้กับมนุษย์ (consumer product) ได้แก่ เทคนิคการเพิ่มความเข้มข้น การทำให้แห้งการแช่แข็งแบบแห้ง (freeze drying) การแช่เยือก แข็งก็เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมในการควบคุมการเสียน้ำในอาหารแช่แข็งจะอยู่ในรูปของผลึกน้ำแข็ง ซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถนำมาใช้ทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของอาหารได้

2.11.1 ผลของปริมาณน้ำอิสระต่อการเสียของอาหาร

เนื่องจาก ยีสต์ ราและแบคทีเรียจำเป็นต้องใช้น้ำอิสระในการเจริญเติบโต โดยการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่าปริมาณน้ำอิสระ ต่ำกว่า 0.6 จะช่วยควบคุมการเสียเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ ตัวอย่าง ของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารและระดับของปริมาณน้ำอิสระ ที่จุลินทรีย์เหล่านี้ สามารถเจริญเติบโตได้แสดงในตาราง 2 ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดในการลดปริมาณน้ำอิสระ ในอาหาร คือการ กำจัดน้ำในอาหาร เช่นการทำให้สุก การอบ หรือการทำให้แห้งด้วยกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง

ตาราง 2 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารต่อระดับปริมาณน้ำอิสระ

| water activity | จุลลินทรีที่เจริญได้ ที่ค่า $a_w$ ระดับน้ำหรือสูงกว่า | อาหาร |
|---|---|---|
| 0.95 | จุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (microbial spoilage) ส่วนใหญ่ ยีสต์บางชนิด แบคทีเรียก่อโรค (pathogen) ได้แก่ *Eschericiae coli*, *Clostridium perfringens* | อาหารสด เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ เช่น เนื้อหมู ไก่ เนื้อวัว น้ำนม ไข่ ไส้กรอกสุก เช่น ไส้กรอก แฟรงค์เฟอร์เตอร์ ขนมปัง |
| 0.91 | Salmonella, Clostridium fruit juice concentrates with 55% sucrose or 12% NaCl Botulinum, Lactobacillus, และราบางชนิด | เนยแข็ง (cheese) บางชนิด เช่น Cheddar cheese, Swiss cheese, Provolone) , cured meat เช่น แฮม, น้ำผลไม้เข้มข้น |
| 0.85 | ยีสต์หลายชนิด | ไส้กรอกหมัก, sponge cakes, dry cheese, margarine, foods with 65% sucrose or 15% NaCl |
| 0.80 | ราส่วนใหญ่ ยีสต์ใน สกุล Saccharomyces sp., *Staphylococcus aureus* | น้ำผลไม้เข้มข้น, นมข้นหวาน , condensed milk, น้ำเชื่อม, flour, high-sugar cakes, some meat jerky products |
| 0.75 | แบคทีเรียที่ทนเกลือด (halophilic bacteria) *Mycotoxigenic aspergilli* | แยม, marmalade, glace fruits, marzipan, marshmallow, some meat jerky products |
| 0.65 | ราที่ชอบความแห้ง (xerophilic mold) | Rolled oats ความชื้น 10%, jelly, molasses, nuts |
| 0.60 | ยีสต์บางชนิด ราไม่กี่ชนิด | ผลไม้แห้งความชื้น 15-20%, caramel, toffee, honey |
| 0.50 | จุลินทรีย์ทุกชนิดไม่สามารถเจริญได้ | ก๋วยเตี๋ยวความชื้น 12% , เครื่องเทศความชื้น 10% |
| 0.40 | | ไข่ผง ความชื้น5% |
| 0.30 | | คุกกี้, แครกเกอร์, ขอบขนมปัง ความชื้น 3-5% |
| 0.03 | | นมผง ความชื้น 2-3% |

**2.12 คลอโรฟิลล์ (chlorophyll)**

คลอโรฟิลล์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในทุกส่วนที่เป็นสีเขียวของพืช มักพบมากในใบ และในส่วนอื่นๆ เช่น ลำต้น กิ่ง ดอก ผล และรากที่มีสีเขียว โดยเฉพาะในพืชตระกูลผักที่มีสีเขียวเกือบทุกส่วน นอกจากนั้น ยังพบได้ในสาหร่ายทุกชนิด และแบคทีเรียบางชนิด

คลอโรฟิลล์เป็นสารสำคัญในพืชที่ทำหน้าที่รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์เพื่อไปใช้ในการสร้างพลังงานในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างสารอินทรีย์ เช่น น้ำตาล คลอโรฟิลล์เป็นสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีฟ้า และสีแดง และดูดกลืนแสงสีเหลือง และสีเขียวได้น้อย ดังนั้น เราจึงมองเห็นใบพืชมีสีเขียวได้ เนื่องจากคลอโรฟิลล์ดูดกลืนแสงสีฟ้า และสีแดงไว้ ส่วนแสงสีเขียวจะสะท้อนออกมาทำให้ตามองเห็นองค์ประกอบสำคัญคลอโรฟิลล์จะประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน (N) ดังนั้น ถ้าในดินขาดธาตุธาตุไนโตรเจนจะทำให้พืชขาดคลอโรฟิลล์ด้วย ทำให้การสังเคราะห์แสงของพืชลดลง พืชมีการเจริญเติบโตน้อย ลำต้นแคระแกร็น ใบหยิกงอ หากขาดมากจะทำให้พืชหยุดการเจริญเติบโต และตายได้ นอกจากนี้ ยังพบธาตุอื่นที่มีความจำเป็นต่อการสร้างคลอโรฟิลล์ เช่น เหล็ก (Fe) (ภาคภูมิ พระประเสริฐ, 2550)

สูตรโครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัว ที่ประกอบด้วยวงแหวนไพรอล (Pyrrole ring) โดยมีไนโตรเจน และแมกนีเซียมเชื่อมพันธะเป็นองค์ประกอบอยู่ตรงกลาง และส่วนที่ 2 คือ ส่วนหางที่มีไฮโดรคาร์บอนสายยาว เรียกว่า ไฟทอล (Phytol)

จากสูตรโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ที่เหมือนกัน พบว่า ในองค์ประกอบของโมเลกุลจะมีไนโตรเจนจำนวน 4 อะตอม จึงถือได้ว่าธาตุไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการสร้างสารสีเขียวของคลอโรฟิลล์สำหรับการเจริญเติบโตของพืชเป็นอย่างยิ่ง

**2.13 การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน**

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Breakeven Point : BP , PP) คือ จุดที่รายได้เท่ากับต้นทุน หรือมีกำไรเท่ากับศูนย์ ในการวิเคราะห์เรื่องนี้ เกี่ยวพันธ์กับ การหาความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุน (Cost) ปริมาณ (Quantity) รายได้ (Revenue) และ กำไร (Profit) ในบางตำราเรียกว่า การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุน ปริมาณ และกำไร (Cost Volume Profit analysis) นับเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับ ใช้ในการกำหนดนโยบาย วางแผน และตัดสินใจทางเลือกต่าง ๆ ในการลงทุน ซึ่งการวิเคราะห์นี้ เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ในระยะสั้นและมีข้อมูลค่อนข้างแน่นอนชัดเจนเพื่อประกอบการตัดสินใจที่ถูกต้อง การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนเกี่ยวพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือ

1) ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost : FC) ค่าใช้จ่ายคงที่ เช่น ค่าเครื่องจักร ค่าโรงงาน ค่าที่ดิน เงินเดือน และ ค่าใช้จ่ายที่คงที่ที่ไม่ว่าจะแปรเปลี่ยนปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือมีค่าใช้จ่ายคงที่ไม่ว่าจะมีปริมาณการผลิตเท่าไร

2) ต้นทุนแปร (Variable Cost : VC) ค่าใช้จ่ายแปรผัน เช่น ค่าวัตถุดิบ ค่าแรงงาน โดยตรง อีกนัยหนึ่งคือค่าที่แปรผันตามปริมาณการผลิต

3) ต้นทุนแปรต่อหน่วย (Variable Cost per Unit : v) เช่น ในการผลิตปลากระป๋อง มีปลาในกระป๋องและกระป๋อง เป็นต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

4) ต้นทุนรวม (Total Cost : TC) โดยปกติคือ ผลรวมของต้นทุนคงที่และต้นทุนแปร ผันทั้งหมด

5) ปริมาณ (Quantity : Q) คือ ปริมาณการผลิตซึ่งในการวิเคราะห์นี้ โดยปกติถือว่ามี ค่าเท่ากันระหว่างปริมาณการผลิตและปริมาณการขาย

6) รายได้ทั้งหมด (Total Revenue : TR) คือ รายได้ที่ได้จากการขาย ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของ ราคาขายกับปริมาณการผลิต (การขาย)

7) ราคาขาย (Price : P) โดยปกติคือ ราคาขายต่อหนึ่งหน่วย (Unit Price)

8) กำไร (Profit : P)โดยปกติคือ กำไรจากการขายของผลิตภัณฑ์ (ที่สมมติว่าปริมาณ การขายเท่ากับปริมาณการผลิต)

การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน คือการวิเคราะห์โดยใช้สูตรเพื่อแสดงการคำนวน และ ระยะเวลาคืนทุนในรูปแบบตัวเลข ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$\text{Break Even Point} = \frac{\text{Fixedcost}}{\text{Price} - \text{Variablecosts}} \qquad (2.3)$$

$$\text{คือ จุดคุ้มทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายคงที่ทั้งสิ้น}}{\text{ราคาค่าบริการต่อหน่วย} - \text{ค่าใช้จ่ายแปรผันต่อหน่วย}}$$

$$\text{Pay Back Period} = \frac{\text{Fixedcost}}{\text{Profit}} \qquad (2.4)$$

$$\text{คือ ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายคงที่}}{\text{กำไร}}$$

**2.14 การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทน (Rate of return analysis)**

การลงทุนในโครงการทางวิศวกรรมนั้น มักเป็นการลงทุนขนาดใหญ่และใช้เงินลงทุนเป็นจำนวนมาก จึงมีความจำเป็นที่ผู้ลงทุนจะต้องคำนวณหาอัตราผลตอบแทนที่คุ้มค่ากับการลงทุน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่สามารถตอบสนองความพึงพอใจ (Minimum attractive rate of return, MARR) ซึ่งส่วนมากค่า MARR จะกำหนดจาก อัตราดอกเบี้ยเงินกู้หรืออัตราดอกเบี้ยเงินฝาก ในกรณีที่ผู้ลงทุนใช้วิธีกูยืมเงินจากแหล่งเงินกู้อัตราผลตอบแทนของโครงการที่ถูกเลือกจะต้องมีค่าสูงกว่าอัตราเงินกู้เพื่อที่จะมีเงินจากผลตอบแทนที่เพียงพอสำหรับนำมาชำระให้แหล่งเงินกู้และในกรณีที่เป็นการลงทุนโดยใช้เงินส่วนตัวของหน่วยงานเอง อัตราผลตอบแทนของโครงการที่ถูกเลือกจะต้องมีค่าสูงกว่าอัตราเงินฝากเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสำหรับการถอนเงินคงคลังออกจากธนาคาร เพื่อนำมาลงทุนในโครงการดงกล่าวถ้าอัตราผลตอบแทนที่คำนวณได้ ของโครงการมีค่ามากกว่า MARR ก็สามารถสรุปได้ว่าโครงการดั่งกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน หรือในกรณีที่เป็นการเปรียบเทียบกันหลายโครงการ โครงการที่ให้อัตราผลตอบแทนสูงสุดจะเป็นโครงการที่ได้รับการพิจารณา ทั้งนี้อัตราผลตอบแทน ที่ได้จากการคำนวณนี้ คืออัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันหรือมูลค่าเทียบเท่ารายปี ของเงินลงทุน (PWD) มีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันหรือมูลค่าเทียบเท่ารายปี ของผลประโยชน์ที่ได้รับ (PWB) ในกรณีที่คำนวณโดยใช้ มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบัน (Present worth, PW) ดังสมการที่ 2.5

$$PW_{D,i\%} = PW_{B,i\%} \qquad (2.5)$$

ในกรณีที่คำนวณโดยใช้มูลค่าเทียบเท่ารายปี (Equivalent uniform annual worth, EUAW) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.4

$$EUAW_{D,i\%} = EUAW_{B,i\%} \qquad (2.6)$$

โดยกำหนดให้ $PW_D$ คือ มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของเงินลงทุน (บาท)

$PW_B$ คือ มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของผลตอบแทน (บาท)

$EUAW_D$ คือ มูลค่าเทียบเท่ารายปีของเงินลงทุน (บาท)

$EUAW_B$ คือ มูลค่าเทียบเท่ารายปีของผลตอบแทน (บาท)

i% คือ อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันหรือมูลค่าเทียบเท่ารายปีของเงินลงทุนมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันหรือมูลค่าเทียบเท่ารายปีของผลประโยชน์ที่ได้รับ

**2.15 ค่าสี**

สี เป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพได้ง่ายที่สุด วิธีหนึ่งในการอธิบายสีของวัตถุผลิตภัณฑ์ด้วยคำพูด มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ ดังนั้นการวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (bias) ของผู้บรรยายสีของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ปัจจัยที่ทำให้เกิดสีมีอยู่ 3 ประเภท (จาตุพงศ์ วาฤทธิ์, 2547)

2.14.1 แหล่งกำเนิดแสง (light source)

แหล่งกำเนิดแสงมีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงถ้ามีแสง แตกต่างจากสีขาวเมื่อตกกระทบกับวัตถุจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับมาเกิดสีที่แตกต่างไป เช่น แสงจาก หลอด incandescent จะเพิ่มแสงสีส้ม ในขณะที่ fluorescent จะให้แสงขาวเย็น

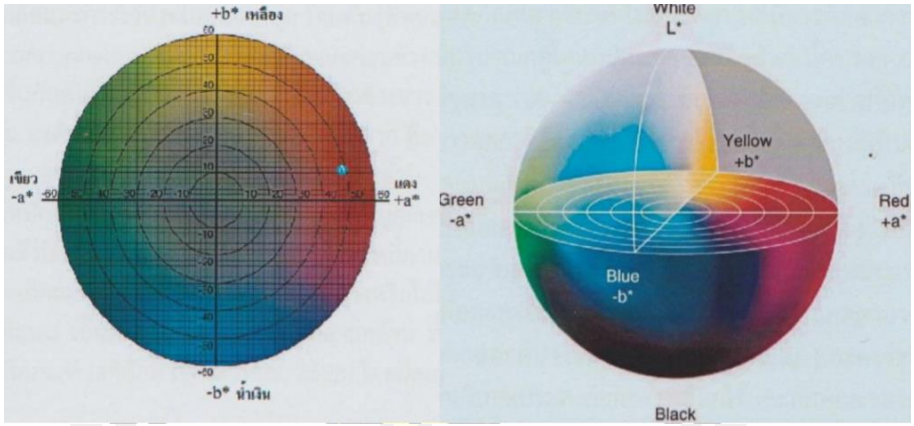
2.14.2 วัตถุที่มอง (specimen)

วัตถุที่ทึบแสง (Opaque) จะให้การสะท้อนแสงเพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุที่โปร่งแสง (translucent) และโปร่งใส (transparent) ลักษณะของการตกกระทบของแสงบนวัตถุ

2.14.3 ผู้สังเกตการณ์ (observer)

ผู้สังเกตการณ์นั้นมีผลอย่างยิ่งต่อการบรรยายสีที่มองเห็น ผู้สังเกตการณ์ต่างคนจะ บรรยายลักษณะสีต่างกันขึ้นอยู่กับสรีระทางกายภาพของตาแต่ละคน ในร่างกายคนจะมีเซลล์อยู่ 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการวัดสี คือเซลล์รูปแท่ง และเซลล์รูปโคน เซลล์รูปแท่งจะตอบสนองได้ดีกับการมองเห็นในที่เกี่ยวกับความมืดสว่าง ส่วนเซลล์รูปโคนจะตอบสนองต่อสีที่มองเห็น การรายงานสีมีการรายงานด้วยกันอยู่หลายระบบในการวิจัยนี้ใช้ระบบ CIE L* a” และ b*

ในระบบสี La” และ b* นี้ ค่า L* จะหมายถึงความสว่าง ส่วน a และ b* จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ สีค่าa” และ b*จะบอกทิศทางของสี เช่น +a” หมายถึงอยู่ในทิศทางสีแดง 2” หมายถึงอยู่ในทิศทางสีเขียว, b* หมายถึงอยู่ในทิศทางสีเหลือง และ b* หมายถึงอยู่ในทิศทางสีน้ำเงิน เมื่อ ค่า a" และ b* เพิ่มขึ้นและจุดดังกล่าวเคลื่อนที่ออกจากจุดศูนย์กลางความอิ่มตัวของสีก็จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 8 ซึ่งแสดงให้เห็นค่าสีต่าง ๆ ของปริภูมิสี L* a และ b* อย่างชัดเจน




ที่มา : (จารุพงศ์ วาฤทธิ์, 2547)

ภาพประกอบ 8 ค่าสีในระบบ CIE L*a*b

**2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

การอบแห้งผักโขมด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน เพื่อศึกษาอัตราการอบแห้งผักโขม โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ซึ่งมีหัวข้อในการศึกษาดังต่อไปนี้

2.15.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเครื่องอบแห้งด้วยระบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

การศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ได้มีการศึกษาถึงการออกแบบเครื่องอบแห้งและประยุกต์ใช้งานอบแห้งผลิตภัณฑ์พืชผักต่าง ๆ ได้แก่

สาวิตรี คำหอม และ คณะ (2555) ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งพริกโดยใช้เตาอบแบบไมโครเวฟ เตาอบแบบลมร้อน และเตาอบแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยพิจารณาคุณลักษณะการอบแห้ง คุณภาพของพริกแห้ง รวมไปถึงพลังงานที่ใช้และต้นทุนในการผลิต พบว่ากระบวนการผลิตพริกแห้งด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมี ความเหมาะสมสำหรับการนำไปพัฒนาต่อไปในเชิงพาณิชย์มากที่สุด ซึ่งพริกที่ผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขั้วเขียวไม่แตก และไม่เหี่ยว สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน คือ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที กำลังไมโครเวฟที่ใช้เท่ากับ 0.61 วัตต์ต่อกรัมพริกแห้ง ซึ่งใช้พริกสด 560 กรัม ต่อการทดลอง และมีต้นทุน (พิจารณาเฉพาะค่าไฟฟ้า) การอบแห้งเท่ากับ 17 บาทต่อกิโลกรัมพริกแห้ง

ธราวุธ บุญน้อม และคณะ (2555) ศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการอบพริกแห้งโดยมี วัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการผลิตพริกแห้ง และศึกษาต้นทุนในกระบวนการผลิต พบว่าการอบแห้งพริกโดยใช้ เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน สามารถผลิตพริกแห้งที่มีคุณภาพ เทียบเคียงกันกับ

ท้องตลาด มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขั้วเขียวไม่แตก และไม่เหี่ยว สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน คือ อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาทีที่คลื่นไมโครเวฟเท่ากับ 0.61 วัตต์ต่อ กรัมพริกแห้ง ค่าความชื้นของพริกลดลงจาก 71.80 ถึง 8.61 เปอร์เซ็นต์ (ฐานเปียก) ภายในเวลา 150 นาที และมีต้นทุนการอบแห้งเท่ากับ 17 บาทต่อกิโลกรัมพริกแห้ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางการ พัฒนาระบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนให้ใช้ในเชิงพาณิชย์ได้

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล (2555) ศึกษาคุณภาพของขนุนแห้งสายพันธุ์ทองประเสริฐ ด้วยการอบแห้งแบบไมโครเวฟและลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว โดยในทุกการทดลองจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 วัตต์ และกำลังของไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ (ใช้เวลาอบแห้ง 3 นาที) สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.1 m/s และทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง จะทดลองอบแห้งขนุนในช่วงอุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นของขนุนอยู่ในช่วง 300-400% ฐานแห้ง และอบแห้งจนค่าความชื้นสุดท้ายของขนุนอยู่ในช่วง 12-19% ฐานแห้ง จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการอบแห้งขนุนขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้งอย่างมากเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้น สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การหดตัว สี และความยอมรับในการบริโภค พบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE*) เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม พบว่า ค่าความเป็นสีแดง (a*) และการหดตัวมีค่าลดลง

มงคลชัย คำปากดี และคณะ (2557) ศึกษาดักแด้ไหมจากการเก็บเกี่ยวรังไหม นิยมนำมาทอดเพื่อรับประทานเนื่องจากมีรสชาติดีและมีปริมาณโปรตีนสูง เพื่อหลีกเลี่ยงการทอดจึงสนใจแปรรูปดักแด้ไหมโดยใช้การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสำหรับคนที่รักสุขภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังของไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่มีผลต่อจลนศาสตร์การอบแห้งดักแด้ไหมโดยใช้กำลังไมโครเวฟ 143 270 323 และ 394 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วของอากาศ 1 เมตรต่อวินาที เปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว พบว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูงขึ้น อัตราการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สำหรับค่าความสิ้นเปลื้องพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งดักแด้ไหมที่ดีที่สุด คือ สภาวะการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 323 วัตต์ ระยะเวลาและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งลดลง เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว

สุวิทย์ แพงกันยา และคณะ (2558) ศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนในด้านคุณภาพทางด้านสีและเนื้อสัมผัส รวมทั้งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์

เป็นเวลา 1 นาที ตามด้วย 400 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที แล้วตามด้วย 250 วัตต์ ร่วมกับลมร้อน 65 องศาเซลเซียส เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับใช้ผลิตทุเรียนแผ่นอบแห้งไขมันต่ำเพื่อสุขภาพ เนื่องจากให้ความกรอบสูงสุดและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

ณัฐพล กระจ่าง (2560) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งและปัจจัยของสภาวะที่มีผลต่อการอบแห้ขมิ้นชัน เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลศึกษาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งและสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้งโดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้สภาวะการอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่ การอบแห้งลมร้อน อบแห้งกำลังไมโครเวฟ 600 800 และ 1,000 วัตต์ อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.5 m/s ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของขมิ้นชัน พบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและกำลังของไมโครเวฟ โดยที่การอบแห้งที่อุณหภูมิและกำลังของไมโครเวฟสูงขึ้นส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นชันภายหลังการอบแห้ง พบว่าสภาวะการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟให้ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และค่าความเป็นสีแดง (a*) ใกล้เคียงกันและไม่มีความแตกต่าง สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีแดง (a*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีค่าไม่แตกต่างกัน

ธราวุธ บุญน้อม (2561) ศึกษาการทดลองอบแห้งพริกด้วยต้นแบบเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยพิจารณาคุณภาพของพริกด้านสี ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และต้นทุนพลังงาน โดยต้นแบบที่ใช้ประกอบด้วย ชุดผลิตคลื่น ไมโครเวฟ จากแมกนีตรอน 6 ตัว แต่ละตัว แผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ 2,450 เมกกะเฮิร์ต กำลัง 1,200 วัตต์ ขนาดห้องอบ 210 ลิตร และชุดผลิตลมร้อนแบบหมุนวน ขนาด 5,000 วัตต์ อุณหภูมิสูงสุด 180 องศาเซลเซียส และพริกแห้งที่อบด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีลักษณะผิวเป็นสีแดงใสขั้วเขียว และไม่แตก โดยแบบจำลอง Logistic มีความเหมาะสมที่สุด ในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งพริกด้วยเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ซึ่งจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นได้ในนำไปพัฒนาใช้ต่อไปในระดับเชิงพาณิชย์ เพราะเป็นเทคโนโลยีที่สะอาด ใช้เวลาอบแห้งสั้น และผลผลิตมีคุณภาพสูง

มงคลชัย คำปากดี (2561) ศึกษาผลของความหนาแน่นกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิ อากาศร้อน และความเร็วลมต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งดักแด้ไหม คุณภาพ แบบจำลองคณิตศาสตร์ การใช้พลังงานจำเพาะและสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการ

อบแห้งดักแด้ไหมด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็ว 0.5 และ1.0 เมตรต่อวินาที ส่วนที่สอง การอบแห้งด้วย ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 0.67 1.00 และ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับ อากาศร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ความชื้นดักแด้ไหมเริ่มต้นร้อยละ 72 ฐานเปียก อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 ฐานเปียก หลังการอบแห้งวิเคราะห์คุณภาพด้านสี ความสว่าง (L*) ความเป็นสีแดง (a*) และความ เป็นสีเหลือง (b*) พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว อัตราการอบแห้ง เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลม โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาในการลดความชื้น 945 585 และ 405 นาที ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาทีใช้เวลาอบแห้ง 465 345 และ 225 นาที ตามลำดับส่วนอัตราการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นไมโครเวฟ โดยอุณหภูมิไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง การอบแห้งที่ความหนาแน่นไมโครเวฟ 1.33 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับลมร้อนทุกระดับอุณหภูมิใช้เวลาในการอบแห้ง 16 นาที

วัลลี ภาคพจน์ และคณะ (2562) ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้เบอร์ 4 ที่ 3 วัย (ระยะดิบ ระยะ กึ่งดิบกึ่งสุก และระยะสุก) ในการอบแห้งกำหนดให้ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้น้อยกว่า 0.6 และปริมาณความชื้นไม่เกิน 6% โดยการแปรระดับอุณหภูมิในการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส โดยนำตัวอย่างเปลือกมะม่วงมาวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และปริมาณความชื้นทุกชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้และความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 0.6 และ 6% เปลือกมะม่วงระยะสุกอบแห้งอุณหภูมิ 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส มีค่าความสว่าง (L*) ปริมาณแคโรทีนอยด์ทั้งหมดและเส้นใยสูงกว่าเปลือกมะม่วงระยะกึ่งดิบกึ่งสุกและระยะดิบ ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน คลอโรฟิลล์ทั้งเอและบีในเปลือกมะม่วงระยะดิบที่อบแห้ง ทั้ง 3 อุณหภูมิมีค่ามากที่สุด อย่างไรก็ตามเปลือกมะม่วงระยะดิบอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุด

รุ่งโรจน์ ตับกลาง และคณะ (2563) ได้ศึกษาระดับอุณหภูมิและระยะเวลาทำแห้งที่เหมาะสมที่สุดแก่ผลิตภัณฑ์กระท้อนแช่อิ่มอบแห้งแบบลมร้อน โดยนำผลกระท้อนจากแหล่งปลูกเดียวกันมาทำการศึกษาผลของระดับอุณหภูมิ (50, 60, และ 70 องศาเซลเซียส) และระยะเวลาในการอบแห้ง (8, 9 และ 10 ชั่วโมง) ต่อคุณภาพของกระท้อนแช่อิ่ม ด้วยวิธีแฟคทอเรียล 32 ในแผนการทดลองแบบสุ่ม จากนั้นนำผลิตภัณฑ์มาตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ เคมี ปริมาณจุลินทรีย์ และทาง

ประสาทสัมผัส ผลพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (interaction effect) และอิทธิพลหลัก (main effect) มีผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพ เคมี และปริมาณจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์กระท้อนแช่อิ่มหลังอบแห้ง โดยภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งกระท้อนแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ร่วมกับระยะเวลาการอบแห้ง 8 ชั่วโมง ส่งผลให้คุณลักษณะทางกายภาพมีความเหมาะสมที่สุด ขณะที่ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับระยะเวลาการอบ 8 ชั่วโมง ส่งผลให้คุณลักษณะทางเคมีมีความเหมาะสมที่สุด แม้ว่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่กลับไม่มีผลกระทบต่อปริมาณยีสต์และรา อย่างไรก็ตามปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราที่ตรวจพบในผลิตภัณฑ์จากทุกสภาวะการอบแห้งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ ชุมชน ผักและผลไม้แช่อิ่ม การศึกษานี้แนะนำสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งกระท้อนแช่อิ่มคือ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง

อณัฐธิชา จันทะพันธ์ และคณะ (2563) ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและคุณภาพในด้านสีของใบกะเพราอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพาน ใบกระเพราจะถูอบแห้งที่ช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟช่วงกำลัง 300 ถึง 500 วัตต์ ความร้อนลมตั้งไว้ที่ 0.3 เมตรต่อนาที และมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ในขณะที่ใช้ความเร็วสายพาน (ไป-กลับ) 0.02 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า อัตราการลดลงของความชื้นในใบกะเพราจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งและกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความสว่าง (L*) และสีเหลือง (b*) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ค่าความสว่างและความความเป็นสีเหลืองจะเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบกะเพราไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการทดลองนี้คือ ใช้ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟ 500 วัตต์ (2x250 วัตต์)

2.15.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผักโขม

ผักโขมได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาความเหมาะสมในการเก็บรักษา โดยได้ศึกษาตัวอย่างการอบแห้งผักโขม โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผักโขม ได้แก่

นฤมล พงษ์รามัญ และคณะ (2554) ศึกษาผลของการเติมใบผักโขมผงต่อคุณภาพหลังการต้ม ลักษณะทางกายภาพ และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์บะหมี่แห้ง โดยนำใบผักโขมสด มาล้างน้ำให้สะอาด ผึ่งลมพอแห้ง จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

นาน 3 ชั่วโมง หรือจนมีความชื้นประมาณร้อยละ 7- 8 บดใบผักโขมแห้งให้เป็นผงละเอียดด้วยเครื่องบด ขนาดรูตะแกรง 0.2 มิลลิเมตร แล้วบรรจุใส่ถุงพลาสติกปิดสนิทและเก็บในภาชนะทึบแสง เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง นำใบผักโขมผงมาวิเคราะห์ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า เส้นใย โปรตีน และไขมัน และคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรตจาก 100 (ร้อยละของปริมาณเถ้า+เส้น ใย+โปรตีน+ไขมัน) ผลการเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของบะหมี่ที่เติมใบผักโขมผงกับบะหมี่ที่ไม่เติมใบผักโขมผง พบว่าบะหมี่ที่เติมผักโขม มีปริมาณเถ้า โปรตีน ไขมัน และเส้นใย สูงกว่า

จุรีมาศ ดีอำมาตย์ (2557) ศึกษาการเสริมคุณค่าทางโภชนาการโดยใช้ผงผักโขมในคุกกี้เนย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมผงผักโขมที่เหมาะสม ศึกษาการใช้ผงผักโขมต่อปริมาณแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์คุกกี้เนย และศึกษาทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการเตรียมผงผักโขม 4 แบบ คือ ผักโขมที่ผ่านการลวกและไม่ลวกนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 และ 60 องศาเซลเซียส และบดละเอียดร่อนผ่านตะแกรง ผลการศึกษาพบว่าคุกกี้เนย มีสี และกลิ่นที่พอเหมาะ มีรสชาติกลมกล่อม เนื้อสัมผัสกรอบร่วน และยังคงลักษณะที่ดีของคุกกี้เนย อีกทั้งเมื่อทดสอบทางกายภาพด้านค่าสีของคุกกี้ผงผักโขมมีค่าความสว่างน้อยกว่าคุกกี้เนย สูตรพื้นฐาน ส่วนค่า $A_w$ ไม่มีความแตกต่างกันจึงทำให้ไม่มีผลต่ออายุการเก็บ ส่วนค่าความแข็ง และค่าความแตกหัก ไม่มีความแตกต่างกัน

Mujaffar and Loy (2016a) ศึกษาพฤติกรรมการคืนตัวของใบผักโขมอบแห้ง โดยใช้ตัวอย่างใบผักโขมหลังการอบแห้ง 20 กรัม ที่อุณหภูมิ 35, 50, และ 60 องศาเซลเซียส ต่อพฤติกรรมการคืนตัวของใบผักโขมแห้ง อบแห้งที่ระดับพลังงานไมโครเวฟ 700 วัตต์ ก่อนการคืนตัวในน้ำ ยิ่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการคืนตัวสูงขึ้นส่งผลให้ความชื้นของใบผักโขมมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนการคืนตัวมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 60 องศาเซลเซียส กระบวนการดังกล่าวถูกอธิบายโดยแบบจำลอง Peleg โดยที่ค่า Peleg ($K_1$) และค่าความจุ Peleg ($K_2$) ลดลงเมื่ออุณหภูมิการคืนตัวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแตกต่างของสี ระหว่างใบผักโขมสดกับใบผักโขมอบแห้งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะสูงกว่าใบผักโขมที่คืนสภาพที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าการคืนสภาพใบผักโขมแห้งด้วยไมโครเวฟทำได้ดีที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แต่ใบผักโขมที่ผ่านการคืนสภาพจะมีสีเข้มกว่าใบผักโขมสด การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส ช่วยเพิ่มความสามารถในการคืนสภาพและสีของใบผักโขม

Mujaffar and Loy (2016b) ศึกษาการอบแห้งผักโขมอบแห้งที่ระดับพลังงานไมโครเวฟ 200, 500, 700 และ 1,000 วัตต์ ใช้ตัวอย่างผักโขม 20 กรัม ที่ระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้นส่งผลให้การอบแห้งเร็วขึ้นและมีค่าคงที่อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากระดับพลังงานไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 1000 วัตต์ และค่าการแพร่กระจาย ($D_{eff}$) เพิ่มขึ้นจาก $3.04 \times 10^{-10}$ ถึง $2.82 \times 10^{-9}$ $m^2/s$ ทำให้การอบแห้งที่ระดับพลังงานไมโครเวฟ 1000 วัตต์ เกิดรอยไหม้ที่ 540 วินาที ใบผักโขม

สามารถทำให้แห้งที่พลังงาน 700 วัตต์ จากความชื้นเริ่มต้น 6.00 กรัม $H_2O$/g DM (85.7% wb) ถึง 0.08 g $H_2O$/g DM (7.6% wb) ใน 11.5 นาที จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ ของการตัดสินใจ (Coefficient of determination, $R^2$) ที่สูงสุดและ ค่าค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด ดังนั้นแบบจำลอง Alibas จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า กระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟกับลมร้อน ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งผลไม้และพืชผักทางการเกษตรอย่างแพร่หลาย และมีการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟโดยใช้ตัวอย่างผักโขม 20 กรัม พบว่าระดับกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิลมร้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง และคุณภาพของผักโขม ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการศึกษาการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้ปริมาณตัวอย่างผักโขมเพิ่มขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม คุณภาพหลังการอบแห้ง ต้นทุนในการผลิต และวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

# บทที่ 3

# วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 การเตรียมผักโขม

ผักโขมได้มาจากการปลูกเองในพื้นที่ เขตอำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยผักโขมใช้ระยะเวลาในการเจริญเติบโตจนสามารถนำมาใช้ในการทดลองจะมี อายุ 30 วัน จึงจะทำการเก็บและเลือกส่วนใบ ที่มีขนาดใบ 4 – 10 เซนติเมตร (กมลทิพย์ ประเทศ, 2543) ดังแสดงภาพประกอบ 9

ภาพประกอบ 9 ผักโขมทีปลูกที่เขตอำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์

## 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน สร้างและทดลองที่คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ห้องอบแห้งผลิตภัณฑ์ มีขนาด ยาว 60 เซนติเมตร กว้าง 60 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร ผนังสแตนเลสผิวเรียบ ประกอบด้วยถาดหมุนภายในห้องอบ จำนวน 8 ชั้น มีแมกนีตรอนติดตั้งที่ผนัง ด้านหลังห้องอบ จำนวน 4 ตัว โดยแต่ละตัวให้กำลังสูงสุดได้ที่ 1,000 วัตต์ มีทางเข้าของอากาศด้านขวาและทางออกของอากาศทางด้านซ้ายของห้องอบ

2) ห้องลมร้อน ประกอบด้วยตัวทำความร้อนแบบแท่งขนาด 1 กิโลวัตต์ จำนวน 6 ตัว ติดตั้งภายในห้องแลกเปลี่ยนความร้อน

3) พัดลม ชนิดเหวี่ยงหนีศูนย์ แบบหน้าตัดโค้ง ขนาด 8 นิ้ว ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 0.5 แรงม้า

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลในการอบแห้ง

(1) เครื่องคอมพิวเตอร์ 1 ชุด

(2) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ความระเอียด 2 ตำแหน่ง

(3) สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด Type K

(4) เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

(5) เครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์

2) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาความชื้นของผักโขม

(1) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

(2) กระป๋องสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร

(3) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล ความละเอียด 3 ตำแหน่ง

3) เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

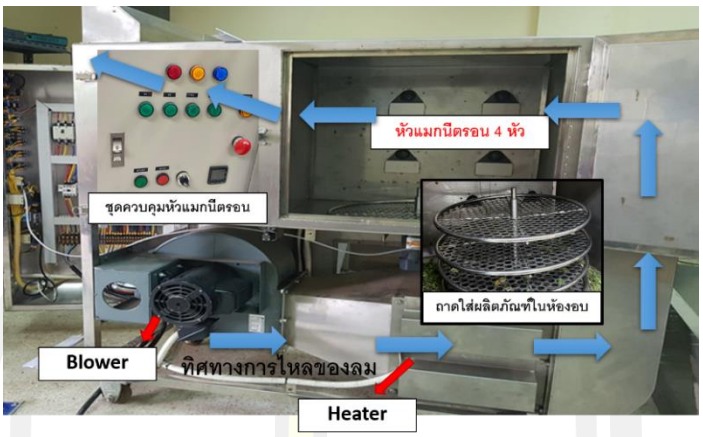
(1) เครื่องวัดสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939

(2) เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ AQUALAB รุ่น 4TE

(3) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

**3.3 การทำงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน**

จากภาพประกอบ 10 แสดงอุปกรณ์ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้ คืออากาศภายนอกเครื่องอบแห้งจะถูกดูดด้วยพัดลม เข้าท่ออากาศเพื่อผ่านไปยังห้องทำความร้อนโดยฮีตเตอร์ ซึ่งมีจุดวัดความเร็วลมก่อนเข้าห้องทำความร้อน อากาศร้อนจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับฮีตเตอร์ตามอุณหภูมิความร้อนที่กำหนดในการอบแห้ง โดยจะวัดอุณหภูมิที่ห้องทำความร้อนโดยสายเทอโมคัปเปิลและอุณหภูมิอากาศจะวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าของห้องอบแห้งเพื่อส่งสัญญาณมายังชุดควบคุมเพื่อทำการตัดต่อการทำงานของตัวทำความร้อน พร้อมกันนี้แมกนีตรอนก็จะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เพื่อสร้างคลื่นไมโครเวฟส่งเข้าไปในห้องอบแห้งทำงานพร้อมกับอากาศร้อนเพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ โดยแมกนีตรอนจะถูกควบคุมด้วยโปรแกรม Arduino เพื่อควบคุมการการทำงานของแมกนีตรอน




ภาพประกอบ 10 แผนผังโครงสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

**3.4 การออกแบบการทดลอง**

การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มี 2 ปัจจัย ได้แก่

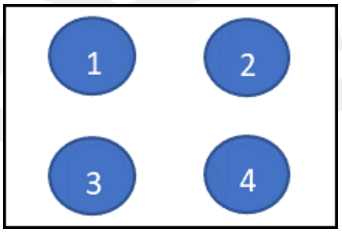
3.4.1 กำลังไมโครเวฟ 5 ระดับ ได้แก่ 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 วัตต์

3.4.2 อุณหภูมิลมร้อน 2 ระดับ ได้แก่ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

**3.5 วิธีการทดลอง**

3.5.1 เตรียมใบผักโขม 2,000 กรัม นำมาล้างให้สะอาดผึ่งให้แห้ง แบ่งใส่ถาดอบแห้ง 7 ถาด (ถาดละ 286 กรัม)

3.5.2 อบแห้งใบผักโขมที่เตรียมจากข้อ 1 ใช้ความเร็วลมในห้องอบแห้งที่ 1 เมตร/วินาที อบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 5 ระดับ ได้แก่ 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ลักษณะการเปิดปิดแมกนีตรอนแบบคู่ในแนวทแยง ดังภาพประกอบ 11 และกำหนดระยะเวลาในการเปิดปิดแมกนีตรอน ดังตาราง 3 และอบแห้งจนกระทั่งค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ น้อยกว่า 0.6




ภาพประกอบ 11 ลำดับหัวแมกนีตรอนในห้องอบแห้ง

ตาราง 3 แสดงระยะเวลาในการเปิดปิดแมกนีตรอนแบบคู่ในแนวทแยง การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 4 ระดับ ได้แก่ 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 วัตต์ โดยรอบการเปิดปิดแมกนีตรอน 120 วินาที ต่อรอบการทำงาน ดังสมการ 3.1

$$\text{กำลังไมโครเวฟที่ทำงานจริง} = \frac{\text{ระยะเวลาเปิด}}{\text{ระยะเวลาทำงานทั้งหมด}} \times \text{กำลังไมโครเวฟ} \times \text{รอบการทำงาน} \quad (3.1)$$

ตาราง 3 ระยะเวลาการเปิดปิดแมกนีตรอน

| | 2,000 W | | 1,500 W | | 1,000 W | | 500 W | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Time/sec | 1,4 | 2,3 | 1,4 | 2,3 | 1,4 | 2,3 | 1,4 | 2,3 |
| 5 | ■ | | ■ | | ■ | | ■ | |
| 10 | ■ | | ■ | | ■ | | | |
| 15 | ■ | | ■ | | | | | |
| 20 | ■ | | | | | | | |
| 25 | | ■ | | ■ | | ■ | | ■ |
| 30 | | ■ | | ■ | | ■ | | |
| 35 | | ■ | | ■ | | | | |
| 40 | | ■ | | | | | | |
| 45 | ■ | | ■ | | ■ | | ■ | |
| 50 | ■ | | ■ | | ■ | | | |
| 55 | ■ | | ■ | | | | | |
| 60 | ■ | | | | | | | |
| 65 | | ■ | | ■ | | ■ | | ■ |
| 70 | | ■ | | ■ | | ■ | | |
| 75 | | ■ | | ■ | | | | |
| 80 | | ■ | | | | | | |
| 85 | ■ | | ■ | | ■ | | ■ | |
| 90 | ■ | | ■ | | ■ | | | |
| 95 | ■ | | ■ | | | | | |
| 100 | ■ | | | | | | | |
| 105 | | ■ | | ■ | | ■ | | ■ |
| 110 | | ■ | | ■ | | ■ | | |
| 115 | | ■ | | ■ | | | | |
| 120 | | ■ | | | | | | |

■ เปิดการทำงานของแมกนีตรอน □ ปิดการทำงานของแมกนีตรอน

**3.6 คุณภาพผักโขมหลังการอบแห้ง**

3.6.1 การวิเคราะห์ค่าความชื้น

การวิเคราะห์ค่าความชื้นของผักโขม สุ่มตัวอย่างทั้ง 2 ซ้ำ ไปหาความชื้นหลังจากการอบแห้ง นำตัวอย่างผักโขม 3 กรัม ใส่ในกระป๋องสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ที่ผ่านการอบเพื่อไล่ความชื้น จำนวน 4 ตัวอย่าง นำไปเข้าตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง (AOAC, 2005) จากนั้นนำผักโขมมาชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งระบบดิจิตอล ความละเอียด 3 ตำแหน่ง นำข้อมูลผลต่างของน้ำหนักผักโขม ก่อนและหลังการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความชื้นของผักโขม โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ 3.2

$$M_w = \frac{W - d}{d} \times 100 \qquad (3.2)$$

เมื่อ $M_w$ คือ ร้อยละความชื้นฐานเปียก (% w.b.)

w คือ มวลของวัสดุชื้น (กรัม)

d คือ มวลของวัสดุแห้ง (กรัม)

3.6.2 การวิเคราะห์ค่าสี

เตรียมตัวอย่างผักโขม โดยบดผักโขมอบแห้งด้วยเครื่องบดให้ละเอียด นำผงผักโขมใส่แก้วใส ประมาณ 2/3 ของแก้ว จากนั้นนำตัวอย่างไปวางบนแท่นของเครื่องวัด และทำซ้ำตัวอย่างละ 5 ซ้ำ โดยใช้เครื่องวัดค่าสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939 ดังภาพประกอบ 12 นำมาใช้ในการวัดค่าสีของผักโขมอบแห้งในระบบ CIE L* (ค่าความสว่างหรือความมืด) a* (ค่าสีแดงหรือสีเขียว) b* (ค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน)

ค่า L* คือความสว่าง มีค่าอยู่ในช่าง 0-100

0 คือโทนสีมืด

100 คือโทนสีสว่าง

ค่า a* คือค่าสีแดงและเขียว

ถ้า a* เป็น – แสดงความเป็นสีเขียว

a* เป็น + แสดงความเป็นสีแดง

ค่า b* คือค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน

ถ้า b* เป็น – แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

b* เป็น + แสดงความเป็นสีเหลือง

จากนั้นนำค่า L a* b* มาคำนวณเพื่อหาค่ามุมของสี (hue) และ ความเข้มของสี (chroma) ดังสมการ 3.3 และ 3.4

$$\text{Hue angle} = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (3.3)$$

$$\text{Chroma} = (a^{*2}+b^{*2})^{1/2} \quad (3.4)$$

ภาพประกอบ 12 เครื่องวัดสี รุ่น Color Flex EZ CFEZ0939

3.6.3 การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์

การวิเคราะห์คลอโรฟิลล์ดัดแปลงจากงานวิจัยของ ศุภชาติ ธรรมนิติเวทย์ (2562) ทำการตัดผักโขมให้เป็นชิ้นเล็กปริมาณ 100 มิลลิกรัม หลีกเลี่ยงการใช้เนื้อเยื่อบริเวณเส้นใบและขอบใบ บดให้ละเอียด สกัดด้วย อะซิโตนปริมาตร 20 มิลลิลิตร จนเนื้อเยื้อเปลี่ยนเป็นสีขาวใส กรองกากออก ปรับปริมาตรของสารละลายด้วยอะซิโตนให้เท่ากับ 30 มิลลิลิตร จากนั้นหุ้มภาชนะบรรจุสารละลายคลอโรฟิลล์ด้วย ฟรอยด์เพื่อป้องกันการสูญเสียคลอโรฟิลล์จากการโดนแสง นำสารละลายคลอโรฟิลล์ที่สกัดด้วยอะซิโตน ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวช่วงคลื่น 645 และ 663 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง spectrophotometer ดังภาพประกอบ 13 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณ คลอโรฟิลล์ (a) คลอโรฟิลล์ (b) โดยมีสมการความสัมพันธ์ตามที่แสดงในสมการ 3.5

$$\text{คลอโรฟิลล์เอ (a)} = [12.7\ (OD663)-2.69(OD645)] \times \frac{V}{1{,}000xm}$$

$$\text{คลอโรฟิลล์บี (b)} = [22.9\ (OD645)-4.68(OD663)] \times \frac{V}{1{,}000xm} \qquad (3.5)$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ทั้งหมด} = [(20.9\ (OD645)+8.02(OD663)] \times \frac{V}{1{,}000xm}$$

V = ปริมาตรของสารละลายที่ตรวจวัดคลอโรฟิลล์
m = น้ำหนักตัวอย่าง
OD = ค่าการดูดกลืนแสง

ภาพประกอบ 13 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

**3.7 ศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ**

ความสิ้นเปลืองการใช้ไฟฟ้าของเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนั้น ได้ทำการวัดค่าการใช้พลังงานของอุปกรณ์ในเครื่องอบแห้ง ได้แก่ ไมโครเวฟ ฮีตเตอร์ และพัดลมดูดอากาศ ด้วยเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าโวลต์มิเตอร์และแอมป์มิเตอร์ ที่ทำการทดลองทั้ง 10 เงื่อนไข ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าแต่ละอุปกรณ์ได้ดังสมการ 3.6

$$P = E \times I \qquad (3.6)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)
E คือ แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมป์)

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) คือ อัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.7

$$SEC = \frac{3.6 * E}{(Wt - Wd)} \quad (3.7)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำ)
E คือ ปริมาตรพลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์)
$W_t$ คือ น้ำหนักผักโขมที่เวลาใด ๆ (กรัม)
$W_d$ คือ น้ำหนักแห้งของผักโขม (กรัม)
3.6 คือ ตัวเลขแปลงหน่วยของพลังงานไฟฟ้า

**3.8 การหาต้นทุนในการอบแห้งและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์**

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ผักโขมเพื่อนำออกขายและคำนวณระยะเวลาคืนทุนของเครื่อง สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.8

$$\text{Break Even Point} = \frac{\text{Fixedcost}}{\text{Price} - \text{VariableCosts}} \quad (3.8)$$

เมื่อ Break Even Point คือ จุดคุ้มทุน
Fixed cost คือ ค่าใช้จ่ายคงที่ทั้งสิ้น
Price คือ ราคาขายต่อหน่วย
Variable Costs คือ ค่าใช้จ่ายผันแปรต่อหน่วย

การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทน (Rate of return analysis) ที่คุ้มค่ากับการลงทุน เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับอัตราผลตอบแทนต่ำสุด ได้ดังสมการ 3.9

$$PW_{D,i\%} = PW_{B,i\%} \quad (3.9)$$

ในกรณีที่คำนวณโดยใช้มูลค่าเทียบเท่ารายปี (Equivalent uniform annual worth, EUAW) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.10

$$EUAW_{D,i\%} = EUAW_{B,i\%} \quad (3.10)$$

โดยกำหนดให้ $PW_D$ คือ มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของเงินลงทุน (บาท)

$PW_B$ คือ มูลค่าเทียบเท่าปัจจุบันของผลตอบแทน (บาท)

$EUAW_D$ คือ มูลค่าเทียบเท่ารายปีของเงินลงทุน (บาท)

$EUAW_B$ คือ มูลค่าเทียบเท่ารายปีของผลตอบแทน (บาท)

i % คือ อัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันหรือมูลค่าเทียบเท่ารายปีของเงินลงทุนมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันหรือมูลค่าเทียบเท่ารายปีของผลประโยชน์ที่ได้รับ

# บทที่ 4

## ผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการทดลองการอบแห้ง ด้วยกำลังไมโครเวฟ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ทำการอบแห้งผักโขมจนค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 จากนั้นนำผักโขมไป วิเคราะห์ค่าความชื้น ค่าสี ค่าคลอโรฟิลล์ ของผักโขมภายหลังการอบแห้ง และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังต่อไปนี้

### 4.1 ผลการวิเคราะห์ ค่าความชื้น เวลาในการอบแห้งและปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์ผักโขม

ผลการทดลองหาค่าความชื้น ระยะเวลาในการอบแห้งและปริมาณน้ำอิสระ หลังการอบแห้งผักโขมด้วยกำลังไมโครเวฟ 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 วัตต์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ความชื้น ระยะเวลาและปริมาณน้ำอิสระของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | ค่าความชื้น เริ่มต้น (% w.b) | ค่าความชื้น สุดท้าย (% w.b) | ค่า $a_w$ หลังอบ |
|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 0 | 8 | 87.67±0.34 | 12.62±0.46 | 0.56±0.02 |
| | 500 | 4 | 86.32±0.25 | 12.35±0.41 | 0.55±0.02 |
| | 1,000 | 3 | 86.65±0.08 | 11.90±0.43 | 0.53±0.02 |
| | 1,500 | 2.5 | 87.39±0.11 | 11.77±0.36 | 0.53±0.01 |
| | 2,000 | 2 | 87.56±0.07 | 11.59±0.42 | 0.48±0.01 |
| 60 | 0 | 8 | 87.20±0.09 | 12.56±0.30 | 0.54±0.02 |
| | 500 | 4 | 86.98±0.35 | 12.50±0.51 | 0.51±0.01 |
| | 1,000 | 3 | 87.24±0.21 | 11.67±0.57 | 0.50±0.01 |
| | 1,500 | 2.5 | 87.42±0.15 | 11.37±0.50 | 0.47±0.01 |
| | 2,000 | 2 | 87.76±0.32 | 11.03±0.44 | 0.46±0.01 |

จากตาราง 4 พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังไมโครเวฟส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลวงเข้าไปในตัวผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดความร้อนจากภายในและภายนอกพร้อมกัน ส่งผลให้ความชื้นสามารถเคลื่อนมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ และเกิดการระเหยของน้ำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Mujaffar and Loy (2016b) ที่อบแห้งผักโขมที่กำลังไมโครเวฟ 200 500 700 และ 1,000 วัตต์ โดยที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุด

ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ความชื้นสุดท้ายสูงกว่าอุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลมร้อนทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้นส่งผลทำให้ความชื้นเกิดการระเหยได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ณัฐพล กระจ่าง (2560) ได้อบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่ 60 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด

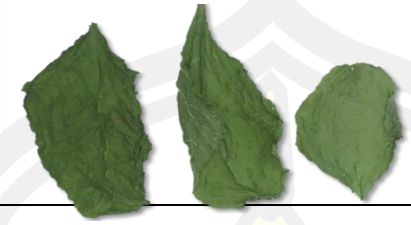
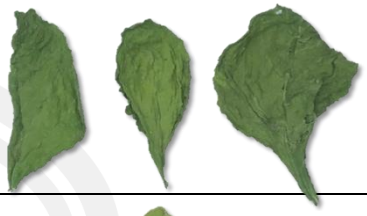
ปริมาณน้ำอิสระที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.6 แสดงว่าสามารถชะลอการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียใจ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2545)

**4.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพ**

การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของผักโขมอบแห้ง

ผลค่าสีของผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน จากลักษณะปรากฏ เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้น มีแนวโน้มที่โทนสีของผลิตภัณฑ์ผักโขมจะมีโทนไปทางสีเขียวเหลือง ดังแสดงภาพประกอบ 14

| กำลังไมโครเวฟ (watt) | อุณหภูมิ 50 °C | อุณหภูมิ 60 °C |
|---|---|---|
| 0 |  |  |
| 500 | | |
| 1,000 | | |
| 1,500 | | |
| 2,000 | | |

ภาพประกอบ 14 ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลังไมโครเวฟต่าง ๆ

ตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ค่าสี L* a* b* ของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | L* | a* | b* |
|---|---|---|---|---|
| 50℃ | 0 | 43.81±0.53$^{d}$ | -5.05±0.10$^{h}$ | 18.93±0.03$^{h}$ |
| | 500 | 43.63±0.10$^{d}$ | -2.90±0.04$^{e}$ | 19.46±0.04g |
| | 1,000 | 43.60±0.27$^{d}$ | -2.55±0.11$^{d}$ | 22.10±0.04$^{e}$ |
| | 1,500 | 42.72±0.17$^{e}$ | -1.63±0.21$^{c}$ | 22.56±0.03$^{d}$ |
| | 2,000 | 42.26±0.65$^{f}$ | -0.79±0.05$^{b}$ | 22.89±0.05$^{d}$ |
| 60℃ | 0 | 46.74±0.47$^{a}$ | -6.86±0.06$^{i}$ | 21.04±0.02$^{f}$ |
| | 500 | 46.71±0.28$^{a}$ | -4.00±0.04$^{g}$ | 22.58±0.03$^{e}$ |
| | 1,000 | 46.11±0.92$^{b}$ | -3.18±0.47$^{f}$ | 23.91±0.02$^{c}$ |
| | 1,500 | 43.42±0.62$^{c}$ | -1.51±0.10$^{c}$ | 24.96±0.02$^{b}$ |
| | 2,000 | 43.68±0.02$^{d}$ | -0.38±0.02$^{a}$ | 25.31±0.02$^{a}$ |

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$)

จากตาราง ANOVA (ภาคผนวก ข) แสดงให้เห็นว่าทั้งกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี L* a* b* พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า L* ลดลง เนื่องจากระดับกำลังไมโครเวฟเพิ่มทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เรียกว่าเมลลาร์ด ดังภาพประกอบ 14 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mujaffar and Loy (2016b) ที่การอบแห้งผักโขมที่กำลังไมโครเวฟ 200 500 700 และ 1,000 วัตต์ พบว่าอบแห้งที่ 1,000 วัตต์ ค่า L* ต่ำที่สุด และที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ค่า L* ต่ำกว่าอุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลงส่งผลให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลลดลง

ค่า a* มีค่าเป็นลบแสดงความเป็นสีเขียว พบว่ากำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า a* ลดลง เนื่องจากกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นจะให้พลังงานความร้อนสูงสามารถทำลายคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นรงควัตถุสีเขียวที่ไม่เสถียรต่อความร้อน ดังแสดงในตาราง 7 และที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ค่า a* ต่ำกว่าอุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากการอบแห้งที่ใช้เวลานานสามารถทำให้คลอโรฟิลล์สลายได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อณัฐธิชา จันทะพันธ์ และคณะ (2563) ได้อบแห้งใบกะเพราด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ค่า a* สูงที่สุด

ค่า b* มีค่าเป็นบวกแสดงความเป็นสีเหลือง พบว่ากำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า b* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้คลอโรฟิลล์ซึ่งแสดงความเป็นสีเขียวลดลงและความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเมลลาร์ด ที่ทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ รุ่งโรจน์ ตับกลาง และคณะ (2563) ได้อบแห้งกระท้อนแช่อิ่มที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ค่า b* สูงที่สุด

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบกับค่าผงผักโขมในท้องตลาดค่าสี L* a* b* มีค่า 50.38 -3.76 20.88 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าจากการทดลองที่สภาวะกำลังไมโครเวฟไม่เกิน 1,000 วัตต์ และที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า L* a* b* ใกล้เคียงกับท้องตลาด

ตาราง 6 ผลการวิเคราะห์ค่า Chroma และค่า Hue angle ของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | Chroma | Hue angle |
|---|---|---|---|
| 50°C | 0 | $19.50\pm0.18^{h}$ | $104.66\pm0.03^{b}$ |
| | 500 | $19.88\pm0.22^{g}$ | $98.35\pm0.06^{d}$ |
| | 1,000 | $22.36\pm0.14^{e}$ | $96.30\pm0.10^{e}$ |
| | 1,500 | $22.76\pm0.14^{d}$ | $95.03\pm0.83^{e}$ |
| | 2,000 | $22.94\pm0.06^{d}$ | $90.94\pm0.06^{g}$ |
| 60°C | 0 | $21.84\pm0.28^{f}$ | $107.93\pm0.03^{a}$ |
| | 500 | $22.31\pm0.65^{e}$ | $100.15\pm0.02^{c}$ |
| | 1,000 | $23.62\pm0.58^{c}$ | $98.66\pm0.02^{d}$ |
| | 1,500 | $25.09\pm0.09^{b}$ | $93.71\pm0.05^{f}$ |
| | 2,000 | $25.72\pm0.42^{a}$ | $91.93\pm0.02^{g}$ |

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$)

จากตาราง 6 พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า Hue angle ของผักโขมอบแห้งมีแนวโน้มลดลง อยู่ในช่วง 91.93 - 100.15 องศา มีค่าไปทางสีเขียวเหลือง และค่า Chroma มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 19.88 – 25.72 องศา และที่อุณหภูมิลมร้อนทั้งสองค่าส่งผลต่อค่า Hue angle ของผักโขมอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วงสีเขียว และค่า Chroma เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมอบแห้ง

ค่าคลอโรฟิลล์ของใบผักโขมอบแห้ง จากการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส หลังการอบแห้งทั้ง 10 เงื่อนไข ดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 ผลการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมอบแห้ง

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | คลอโรฟิลล์ a (mg/100g) | คลอโรฟิลล์ b (mg/100g) | คลอโรฟิลล์รวม (mg/100g) |
|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 0 | 8 | $3.23\pm0.03^{d}$ | $0.87\pm0.11^{a}$ | $4.16\pm0.07^{cd}$ |
| | 500 | 4 | $3.54\pm0.01^{c}$ | $0.47\pm0.05^{b}$ | $4.07\pm0.04^{d}$ |
| | 1,000 | 3 | $4.21\pm0.04^{a}$ | $0.74\pm0.01^{a}$ | $5.02\pm0.02^{a}$ |
| | 1,500 | 2.5 | $2.57\pm0.09^{f}$ | $0.44\pm0.03^{b}$ | $3.05\pm0.06^{g}$ |
| | 2,000 | 2 | $1.84\pm0.01^{g}$ | $0.23\pm0.05^{c}$ | $2.09\pm0.07^{i}$ |
| 60 | 0 | 8 | $2.85\pm0.05^{e}$ | $0.76\pm0.12^{a}$ | $3.66\pm0.18^{e}$ |
| | 500 | 4 | $3.42\pm0.04^{c}$ | $0.83\pm0.04^{a}$ | $4.32\pm0.08^{c}$ |
| | 1,000 | 3 | $3.75\pm0.12^{b}$ | $0.72\pm0.03^{a}$ | $4.55\pm0.08^{b}$ |
| | 1,500 | 2.5 | $2.81\pm0.04^{e}$ | $0.46\pm0.06^{b}$ | $3.32\pm0.11^{f}$ |
| | 2,000 | 2 | $2.43\pm0.03^{f}$ | $0.16\pm0.03^{c}$ | $2.63\pm0.05^{h}$ |

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวตั้ง แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p<0.05$)

จากตาราง 7 กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ สามารถรักษาปริมาณคลอโรฟิลล์ a b และคลอโรฟิลล์รวมได้ดีที่สุด เนื่องจากผักโขมอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟที่ระดับสูงเกินไปทำให้ผักโขมยิ่งได้รับความร้อนก็จะยิ่งทำให้สูญเสียปริมาณคลอโรฟิลล์มาก (ขวัญชนก ศรัทธาสุข, 2556) ซึ่งสอดคล้องกับการวัดค่าความเป็นสีเขียว a* ลดลง ดังตาราง 5

อบแห้งผักโขมด้วยอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส คลอโรฟิลล์ a และ b สูงกว่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเป็นผลทำให้คลอโรฟิลล์เสื่อมสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วัลลี ภาคพจน์ และคณะ (2562) ได้อบแห้งเปลือกมะม่วงน้ำดอกไม้ที่อุณหภูมิ 55 60 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำที่สุด

จากการทดลองพบว่าที่เงื่อนไขอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณคลอโรฟิลล์สูงที่สุด เนื่องจากการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อย ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เสื่อมสภาพน้อยลง

**4.3 ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ**

ผลการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งผักโขมโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีดังแสดงในตาราง 8

ตาราง 8 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | การใช้ไฟฟ้า (kWh) | | | | น้ำที่ระเหย (g) | SEC (MJ/Kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Microwave | Blower | Heater | Total | | |
| 50°C | 0 | 8 | 0 | 0.72 | 120.53 | 121.25 | 1,753.75 | 0.249 |
| | 500 | 4 | 0.50 | 0.36 | 60.27 | 61.13 | 1,727.72 | 0.127 |
| | 1,000 | 3 | 1.50 | 0.27 | 45.20 | 46.97 | 1,733.64 | 0.098 |
| | 1,500 | 2.5 | 2.81 | 0.225 | 37.67 | 40.70 | 1,750.23 | 0.084 |
| | 2,000 | 2 | 4 | 0.18 | 30.13 | 34.31 | 1,751.72 | 0.071 |

ตาราง 8 (ต่อ)

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | การใช้ไฟฟ้า (kWh) | | | | น้ำที่ระเหย (g) | SEC (MJ/Kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Microwave | Blower | Heater | Total | | |
| 60°C | 0 | 8 | 0 | 1.76 | 129.60 | 131.36 | 1,744.43 | 0.271 |
| | 500 | 4 | 0.50 | 0.88 | 64.80 | 66.18 | 1,740.03 | 0.137 |
| | 1,000 | 3 | 1.50 | 0.66 | 48.60 | 50.76 | 1,745.18 | 0.105 |
| | 1,500 | 2.5 | 2.81 | 0.55 | 40.50 | 43.86 | 1,749.34 | 0.090 |
| | 2,000 | 2 | 4 | 0.44 | 32.40 | 36.84 | 1,755.72 | 0.076 |

จากตาราง 8 พบว่ากำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งลดลง เกิดจากระยะเวลาอบแห้งลดลงส่งผลให้ใช้พลังงานความร้อนจาก Heater และ Blower น้อยลง และที่อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น โดยการอบแห้งที่ระยะเวลาเท่ากัน ที่อุณหภูมิสูงจะใช้พลังงานความร้อนมากกว่า

**4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน**

ปริมาณการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งผักโขมโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีดังแสดงในตาราง 9

ตาราง 9 ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งผักโขม

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | การใช้ไฟฟ้า (kWh) | | | | ค่าพลังงาน (บาท) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Microwave | Blower | Heater | Total | |
| 50°C | 0 | 8 | 0 | 0.72 | 120.53 | 121.25 | 485.00 |
| | 500 | 4 | 0.50 | 0.36 | 60.27 | 61.13 | 244.52 |
| | 1,000 | 3 | 1.50 | 0.27 | 45.20 | 46.97 | 187.88 |
| | 1,500 | 2.5 | 2.81 | 0.225 | 37.67 | 40.70 | 162.80 |
| | 2,000 | 2 | 4 | 0.18 | 30.13 | 34.31 | 137.24 |

ตาราง 9 (ต่อ)

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | การใช้ไฟฟ้า (kWh) | | | | ค่าพลังงาน (บาท) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Microwave | Blower | Heater | Total | |
| 60°C | 0 | 8 | 0 | 1.76 | 129.60 | 131.36 | 525.44 |
| | 500 | 4 | 0.50 | 0.88 | 64.80 | 66.18 | 264.72 |
| | 1,000 | 3 | 1.50 | 0.66 | 48.60 | 50.76 | 203.04 |
| | 1,500 | 2.5 | 2.81 | 0.55 | 40.50 | 43.86 | 175.44 |
| | 2,000 | 2 | 4 | 0.44 | 32.40 | 36.84 | 147.36 |

หมายเหตุ : ค่าพลังงานไฟฟ้า 4 บาท/ยูนิต

จากตาราง 9 ในส่วนของการใช้พลังงานไฟฟ้าอบแห้งผักโขมที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ต่ำลง เนื่องจากกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาอบแห้งลดลง และที่อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นทำให้ทำให้ค่าพลังงานที่ใช้สูงขึ้น เนื่องจากใช้พลังงานความร้อนมากขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

**4.5 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์**

จากผลการทดลองการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมเมื่อพิจารณาในแง่ของคุณภาพและพลังงาน และนำมาวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ผักโขม เพื่อนำออกขาย คำนวณระยะเวลาคืนทุน และจุดคุ้มทุนของเครื่อง ค่าใช้จ่าย และรายได้จากการอบแห้ง

ในการคำนวณโดยต้นทุนคงที่คือ เครื่องอบแห้งราคา 150,000 บาท และคิดค่าซ่อมบำรุงเครื่องเป็น 5% ของราคาเครื่องในทุกปี ผลผลิตของผักโขมสามารถเก็บเกี่ยวได้ตลอดทั้งปีซึ่งผักโขมเป็นผักที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติใช้ระยะเวลาในการโตเต็มที่ 30 วัน จึงจะเก็บเกี่ยวได้ การอบแห้งผักโขมแต่ละวันจะทำการผลิต 6 ครั้ง ครั้งละ 2 กิโลกรัม รวมเป็น 12 กิโลกรัม ซึ่งหลังการอบแห้งจะเหลือน้ำหนัก 1.602 กิโลกรัม และมีค่าใช้จ่ายในการอบแห้งดังแสดงใน ตาราง 10

ตาราง 10 ต้นทุนแปรผันในการอบแห้งใน 1 วัน

| ต้นทุน | ปริมาณ | ราคาต่อหน่วย | รวม (บาท) |
|---|---|---|---|
| ค่าผักโขม | 12 กิโลกรัม | 30 บาท ต่อ 1 กิโลกรัม | 360 |
| ค่าพลังไฟฟ้า | 47.36 kWh | 4 บาท ต่อ 1 ยูนิต | 1,136.64 |
| ค่าแรง | 1 คน | 300 บาท ต่อ 1 วัน | 300 |
| รวมทั้งหมด | | | 1,796.64 |

หมายเหตุ : อบแห้งผักโขม 6 ครั้งต่อวัน

ในแต่ละวันจะทำการอบแห้งผักโขมได้ 6 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น 1,796.64 บาท จะได้ผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งที่ปริมาณ 1.602 กิโลกรัมกรัมต่อวัน ได้ราคาขายผลิตภัณฑ์คือต้นทุนแปรผันหารด้วยปริมาณผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งที่ได้ต่อวันเท่ากับ 1,121.49 บาทต่อกิโลกรัม โดยกำหนดราคาขายผลิตภัณฑ์ดังนี้ 1,200 1,300 1,400 และ 1,500 บาท คำนวณมูลค่าผลผลิตภายใน 1 ปี ในแต่ละปีจะอบแห้งผลิตภัณฑ์ใช้เวลา 300 วัน จะได้ผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้ง 481 กิโลกรัม ดังแสดงในตาราง 11

ตาราง 11 รายได้จาการขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในระยะเวลา 1 ปี

| ราคาขายผลิตภัณฑ์ต่อ 1 กิโลกรัม | รายได้จากการขาย (บาท) |
|---|---|
| 1,200 | 577,200 |
| 1,300 | 625,300 |
| 1,400 | 673,400 |
| 1,500 | 721,500 |

คำนวณค่าใช้จ่ายภายในแต่ละปีดังนี้ เครื่องอบแห้งราคา 150,000 บาท คิดค่าซ่อมบำรุง 5% ของราคาเครื่องอบแห้ง คือ 7,500 บาท ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งผลิตภัณฑ์แต่ละวันคูณด้วยจำนวนวันที่ทำการอบแห้งเท่ากับ 538,992 บาท รวมค่าใช้จ่ายในการอบผลิตภัณฑ์และค่าซ่อมบำรุงในแต่ละปี คือ 546,492 บาท เมื่อนำราคาที่ได้จากการขายไปหักลบกับค่าใช้จ่ายก็จะได้กำไร ดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 กำไรสุทธิในแต่ละปี

| ราคาขายผลิตภัณฑ์ต่อ 1 กิโลกรัม | กำไรสุทธิในแต่ละปี (บาท) |
|---|---|
| 1,200 | 30,708 |
| 1,300 | 78,808 |
| 1,400 | 126,908 |
| 1,500 | 175,008 |

คำนวณระยะเวลาคืนทุนโดยไม่คิดอัตราดอกเบี้ยที่ได้รับเพิ่มขึ้นจากการลงทุนในแต่ละปี ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ผักโขมเพื่อออกวางขาย จะคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนทำได้โดยการนำมูลค่าเครื่อง 150,000 บาท ไปหารกับรายได้จาการขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งภายในระยะเวลาเป็นปี ก็จะทราบระยะเวลาการคืนทุนของการใช้เครื่องอบแห้งผักโขมออกวางขายในราคาต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง 13

ตาราง 13 ระยะเวลาคืนทุนในการขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในราคาต่าง ๆ

| ราคาขายผลิตภัณฑ์ต่อ 1 กิโลกรัม | ระยะเวลาคืนทุน (ปี) |
|---|---|
| 1,200 | 4.88 |
| 1,300 | 1.90 |
| 1,400 | 1.18 |
| 1,500 | 0.85 |

หาอัตราผลตอบแทนภายในการลงทุน โดยกำหนดอายุโครงการ 5 ปี ราคาเครื่องอบแห้ง 150,000 บาท กำหนดราคาขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งกิโลกรัมละ 1,200 1,300 1,400 และ 1,500 บาท ดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 14 อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return : IRR) และผลิตภัณฑ์ในราคาต่าง ๆ

| ราคาขายผลิตภัณฑ์ (บาท) | กำไรสุทธิในแต่ละปี (บาท) | ร้อยละอัตราผลตอบแทนภายใน |
|---|---|---|
| 1,200 | 30,708 | 1 |
| 1,300 | 78,808 | 44 |
| 1,400 | 126,908 | 80 |
| 1,500 | 175,008 | 114 |

จากตาราง 14 พบว่าที่อายุโครงการ 5 ปี การขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งกิโลกรัมละ 1,200 1,300 1,400 และ 1,500 บาท ได้อัตราผลตอบแทนภายในการลงทุนร้อยละ 1 44 80 และ 114 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอัตราผลตอบแทนภายในเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจลงทุน จึงเลือกขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในราคา 1,300 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งกำหนดราคาขายต่ำกว่าท้องตลาด ข้อมูลจากบริษัท Feaga Life (2021) ที่ขายผงผักโขมกิโลกรัมละ 1,375 บาท และร้อยละอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 44 ซึ่งมากกว่าค่า MRR 6% ดังนั้นโครงการนี้น่าลงทุน ซึ่งปกติแล้ว IRR จะอยู่ที่ 14-18% จึงจะมีโอกาสได้กำไร (ไพบูลย์ แย้มเพื่อน , 2548)

# บทที่ 5

## สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ที่กำลังไมโครเวฟ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ และอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยอบแห้งจนกระทั่งค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าสี คลอโรฟิลล์ พลังงานที่ใช้ รวมถึงการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปได้ดังนี้

### 5.1 ระยะเวลาในการอบแห้งและความชื้น

ที่เงื่อนไขการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟ 0 500 1,000 1,500 และ 2,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบแห้ง 8 4 3 2.5 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 11.03-12.62 ร้อยละฐานเปียก ค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.48-0.57

### 5.2 คุณภาพของผักโขมอบแห้ง

การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1) ผลการวิเคราะห์ค่าสีของผักโขมอบแห้ง

พบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นค่า L* a* ลดลง และค่า b* เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ค่า L* a* b* ต่ำกว่า อุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส

เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่า Hue angle มีแนวโน้มลดลง และค่า Chroma มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ค่า Hue angle และ ค่า Chroma เพิ่มขึ้น

2) ผลการวิเคราะห์ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมอบแห้ง

พบว่าที่กำลังไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าคลอโรฟิลล์สูงที่สุด

### 5.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

พบว่ากำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งลดลง และที่อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้นทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งสูงขึ้น

**5.4 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน**

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟ 1,000 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาในแง่ของคุณภาพและพลังงาน

**5.5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์**

พบว่าที่อายุโครงการ 5 ปี ขายผลิตภัณฑ์ผักโขมอบแห้งในราคา 1,300 บาทต่อกิโลกรัม ได้ร้อยละอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 44

**5.6 ข้อเสนอแนะ**

เครื่องอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนนั้นใช้ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อน ซึ่งฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเยอะที่สุดในระบบ จึงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูงไม่เหมาะสำหรับผลิตหรือแปรรูปสินค้าในระดับครัวเรือน ซึ่งเราสามารถลดต้นทุนการผลิตได้โดยการเปลี่ยนระบบทำความร้อนของเครื่องอบแห้งจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าไปใช้ฮีตเตอร์แบบแก๊ส เพื่อลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้าลง

**บรรณานุกรม**


กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2547.การอบแห้ง (Drying). ตอนที่ 4 บทที่ 4 การอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่น ๆ. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส (ผอส.) ด้านความร้อน (4-33 - 4-51). [Online], Available: http://eng.sut.ac.th/ae/engsut/content/tray-dryer. [21 August 2021].

กองบรรณาธิการ. 2562. ประโยชน์ผักโขม ไอเดียการกินการใช้ผักโขมเพื่อสุขภาพและข้อควรระวัง. [Online], Available: https://www.technologychaoban.com/folkways/article_21454. [21 August 2021].

กมลทิพย์ ประเทศ. 2543. การสำรวจพรรณไม้ในอุนทยานประวัติศาสตร์กำแพงเพชร (ผักโขม) อำเภอเมือง จังหวัดกำแพงเพชร. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร. [Online], Available: https://arit.kpru.ac.th/contents/pdf/local/91. [21 August 2021].

ขวัญชนก ศรัทธาสุข. 2556. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. คลอโรฟิลล์กับสุขภาพ. [Online], Available: http://biology.ipst.ac.th/?p=963. [21 August 2021].

จาตุพงศ์ วาฤทธิ์. 2547. เอกสารประกอบการสอนวิชาสมบัติทางกายภาพของผลผลิตเกษตร. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. [Online], Available: https://sites.google.com/site/ea340properties/. [21 August 2021].

จุรีมาศ ดีอำมาตย์. 2557. การเสริมคุณค่าทางโภชนาการโดยใช้ผงผักโขมในคุกกี้เนย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดร ปีที่ 6 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2561. 10 หน้า.

ชาลิดา บรมพิชัยชาติกุล. 2555. การปรับปรุงคุณภาพแมคคาดาเมียโดยวิธีการอบแห้งแบบหลายขั้นตอน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 เมษายน - มิถุนายน 2555. 16 หน้า.

ณัฐพล กระจ่าง. 2560. การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด. วิทยานิพนธ์สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 170 หน้า.

เดชา ศิริภัทร. 2538. ผักขม:ความขมที่เป็นทั้งผักและยา. [Online], Available: https://www.doctor.or.th/article/detail/3913. [21 August 2021].

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

ธนาวุธ บุญน้อม และคณะ. 2555. การศึกษาการประยุกต์ใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในกระบวนการผลิตพริกแห้ง. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 4-5 เมษายน 2555 จังหวัดเชียงใหม่. 7 หน้า.

ธราวุธ บุญน้อม. 2561.การศึกษากระบวนการผลิตพริกแห้งโดยใช้เตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ระดับต้นแบบ. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ปีที่ 24 ฉบับที่ 1 (2561) 38-46.

ทิพวรรณ นิ่งน้อย. 2558. วิธีมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์อาหาร. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. 241 หน้า.

นฤมล พงษ์รามัญ และคณะ. 2554. ศึกษาผลของการเติมใบผักโขมผงต่อคุณภาพหลังการต้ม. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร ปีที่ 42 ฉบับที่ 2 (พิเศษ) พฤษภาคม – สิงหาคม 2554. 4 หน้า.

บริษัท Feaga life. 2562. ผงผักซุปเปอร์ฟู้ดเพื่อสุขภาพ. http://www.feagalifethailand.com.

ไพบูลย์ แย้มเพื่อน. 2548. อัตราผลตอบแทนการลงทุน. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: เอเชียเพรส; 2548.

พิรามิตร ปัดถา และคณะ. 2548. การอบแห้งหมากด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ภาคภูมิ พระประเสริฐ. 2550. คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) สารสกัดจากพืช. สรีรวิทยาของพืช. [Online], Available: http://www.siamchemi.com/คลอโรฟิลล์/. [21 August 2021].

มงคลชัย คำปากดี และคณะ. 2557. การอบแห้งดักแด้ไหมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห้งแระเทศไทยครั้งที่ 28 วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น.

มงคลชัย คำปากดี. 2561. การอบแห้งดักแด้ไหมอีรี่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน. ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 125 หน้า.

รุ่งโรจน์ ตับกลาง และคณะ. 2563. ผลของอุณหภูมิและเวลาทำแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กระท้อนแช่อิ่มอบแห้ง. วารสารวิจัย ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2564 สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก. 11 หน้า

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ. 2545. Water Activity กับการควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร. [Online], Available: https://www.playsotec.com/17390808/water-activity/. [21 August 2021].

ร้อยทิศ ญาติเจริญ. 2558. การอบแห้งถั่วลิสงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบถังหมุน.การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต. 9 หน้า.

วัลลี ภาคพจน์ และคณะ. 2562. อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและเคมีของเปลือกมะม่วงผง. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติครั้งที่ 20 วันที่ 15 มีนาคม 2562 มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 11 หน้า.

วิบูลย์ ช่างเรือ. 2561. การให้ความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ. ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. [Online], Available: http://www.butane.chem.uiuc.edu. & http://www.pueschner.con. [21 August 2021].

ศุภชาติ ธรรมนิติเวทย์. 2562. การสกัดสารสีจากใบพืชสำหรับใช้ในการศึกษาทางสรีรวิทยาของพืช. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 2 เกษตรนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก. 9 หน้า.

สุธาทิพ ภมรประวัติ. 2550. มูลนิธิหมอชาวบ้านเรื่องผักขม. [Online], Available: http://www.doctor.or.th/article/detail/4092. [21 August 2021].

สาวิตรี คำหอม และคณะ. 2555. การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการผลิตพริกแห้ง ด้วยเตาอบไมโครเวฟ ลมร้อน และเตาอบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย. 6 หน้า.

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล. 2555. การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์ คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 117-129.

สุวิทย์ แพงกันยา และคณะ. 2558. การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา) ปีที่ 46 เล่มที่ 4 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 11 หน้า.

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ . 2562. เทคนิคอบแห้งผลไม้แบบธรรมชาติด้วยการใช้ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ (มะม่วงน้ำดอกไม้). ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อณัฐธิชา จันทะพันธ์ และคณะ. 2563. การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 45 เล่มที่ 3. 11 หน้า.

อดุลย์ศักดิ์ ไชยราช. 2562. ผักโขม ผักขม ผักโหม ผักพื้นบ้านคุณค่าสูง แต่ต้องกินอย่างพอดี. กลุ่มยุทธศาสตร์และสารสนเทศ สำนักงานเกษตรอุตรดิตถ์. [Online], Available: https://www.technologychaoban.com/folkways/article_21454. [21 August 2021].

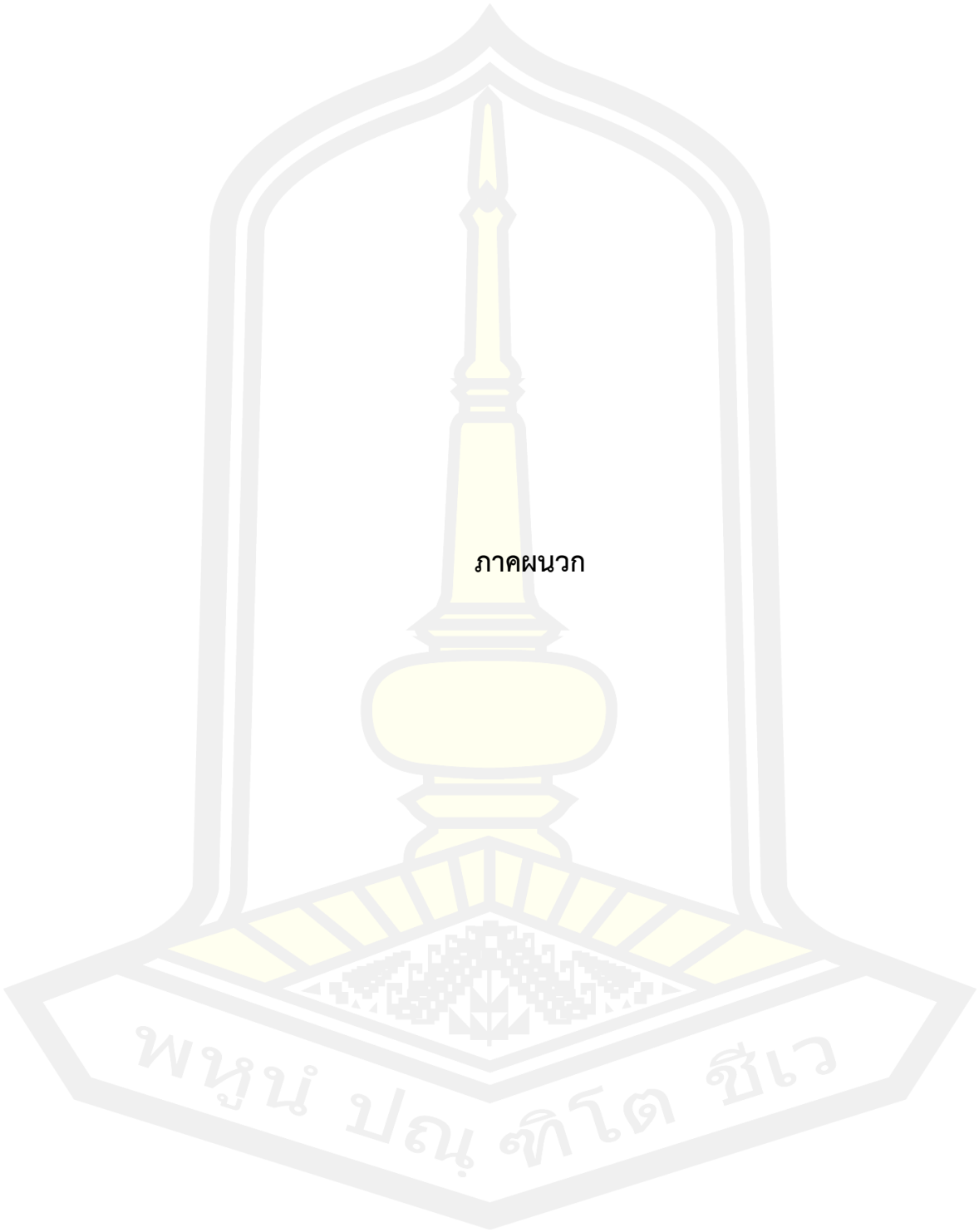
AOAC . 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International. inHorwitz. W. (Ed.), 18th ed. Gaithersburg, Maryland: AOAC International.

Brooker, D. B., Fred W. B, Carl W. 15 Hall. 1981. Drying cereal grains (3rd edition). Inc. 265 p.

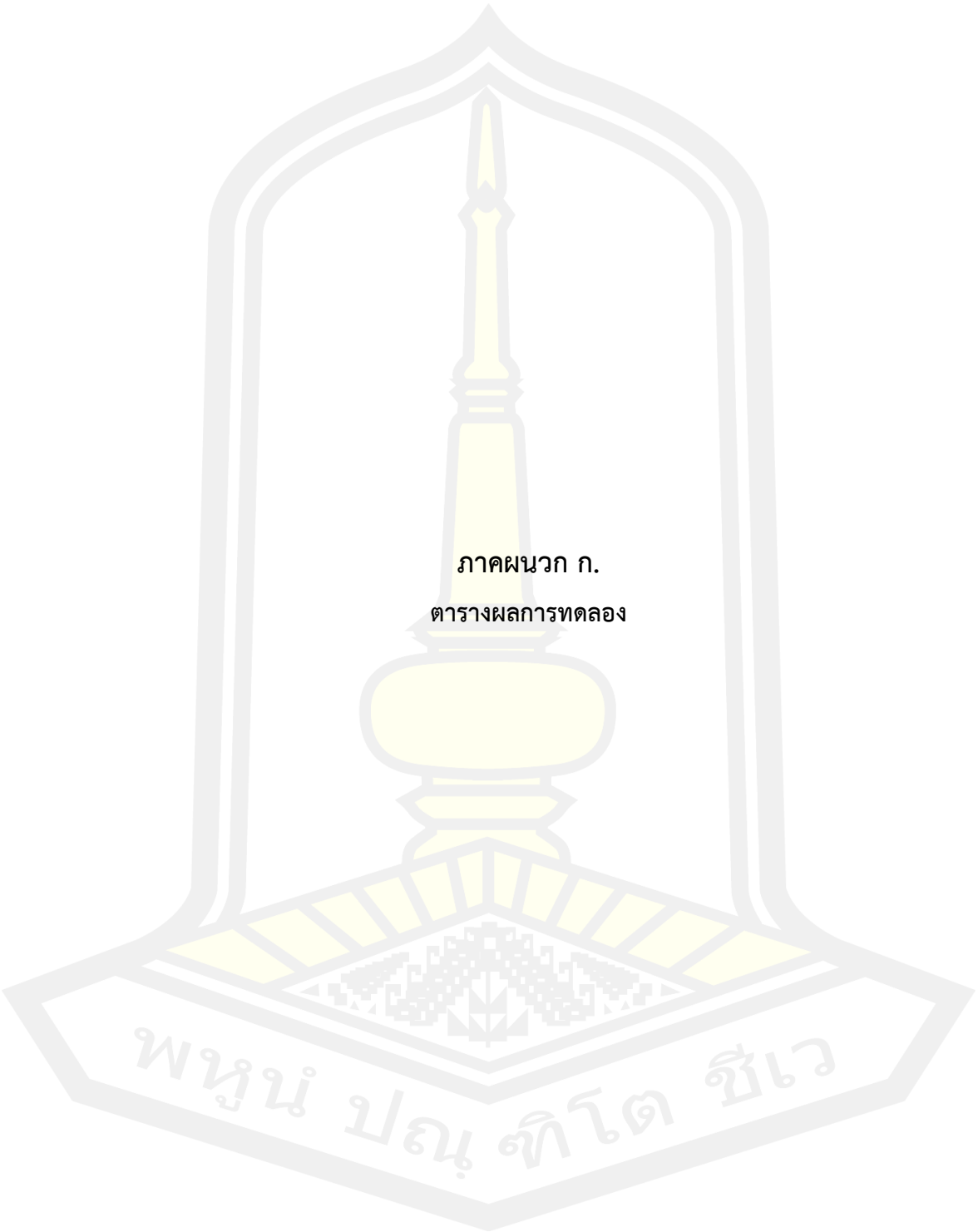
Mujaffar, S., and Alex L. L., 2016a. The Rehydration Behavior of Microwave-Dried Amaranth (Amaranthus Dubius) Leaves. Food Science & Nutrition 5, no. 3 399–406 p.

Mujaffar, S., and Alex L. L., 2016b. Drying Kinetics of Microwave-Dried Vegetable Amaranth (Amaranthus Dubius) Leaves. Journal of Food Research 5, no. 6 (October 13, 2016): 33 p.

Song, Z., Jing, C., Yao, L., Zhao, X., Sun, J., Wang, W., Ma, c. 2017. Coal slime hot air/microwave combined drying characteristies and energy analysis. Fuel Processing technology, 156, 491-499 p.



# ภาคผนวก



# ภาคผนวก ก.

## ตารางผลการทดลอง

ตาราง ก.1 ค่าความชื้นการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | น้ำที่ระเหย (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 ℃ | 0 | 8 | 2,000.480 | 241.860 | 1,758.620 | 87.91 |
| | 500 | 4 | 2,001.570 | 270.240 | 1,731.330 | 86.50 |
| | 1,000 | 3 | 2,000.670 | 266.000 | 1,734.670 | 86.70 |
| | 1,500 | 2.5 | 2,003.900 | 251.130 | 1,752.770 | 87.47 |
| | 2,000 | 2 | 2,000.880 | 249.890 | 1,750.990 | 87.51 |

ตาราง ก.2 ค่าความชื้นการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | น้ำที่ระเหย (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 ℃ | 0 | 8 | 2,000.430 | 251.560 | 1,748.870 | 87.42 |
| | 500 | 4 | 2,001.330 | 277.220 | 1,724.110 | 86.15 |
| | 1,000 | 3 | 2,000.770 | 268.160 | 1,732.610 | 86.60 |
| | 1,500 | 2.5 | 2,001.500 | 253.810 | 1,747.690 | 87.32 |
| | 2,000 | 2 | 2,000.380 | 247.940 | 1,752.440 | 87.61 |

ตาราง ก.3 ค่าความชื้นการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | น้ำที่ระเหย (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 °C | 0 | 8 | 2,000.300 | 254.670 | 1,745.630 | 87.27 |
| | 500 | 4 | 2,000.730 | 255.470 | 1,745.260 | 87.23 |
| | 1,000 | 3 | 2,000.620 | 252.210 | 1,748.410 | 87.39 |
| | 1,500 | 2.5 | 2,001.400 | 249.670 | 1,751.730 | 87.53 |
| | 2,000 | 2 | 2,000.810 | 240.280 | 1,760.530 | 87.99 |

ตาราง ก.4 ค่าความชื้นการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| อุณหภูมิ (°C) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | เวลา (hr) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | น้ำที่ระเหย (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 °C | 0 | 8 | 2,000.600 | 257.380 | 1,743.220 | 87.13 |
| | 500 | 3 | 2,000.230 | 265.430 | 1,734.800 | 86.73 |
| | 1,000 | 5 | 2,000.160 | 258.220 | 1,741.940 | 87.09 |
| | 1,500 | 2.5 | 2,000.660 | 253.720 | 1,746.940 | 87.32 |
| | 2,000 | 2 | 2,000.290 | 249.380 | 1,750.910 | 87.53 |

ตาราง ก.5 ค่าความชื้นหลังการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| รอบที่ | กำลังไมโครเวฟ (watt) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 3.020 | 2.617 | 13.34 |
| 2 | | 3.010 | 2.631 | 12.59 |
| 3 | | 3.040 | 2.669 | 12.20 |
| 4 | | 3.060 | 2.676 | 12.55 |
| 1 | 500 | 3.039 | 2.645 | 12.96 |
| 2 | | 3.048 | 2.672 | 12.34 |
| 3 | | 3.034 | 2.656 | 12.46 |
| 4 | | 3.070 | 2.681 | 12.67 |
| 1 | 1,000 | 3.356 | 2.984 | 11.08 |
| 2 | | 3.043 | 2.674 | 12.13 |
| 3 | | 3.046 | 2.679 | 12.05 |
| 4 | | 3.052 | 2.680 | 12.19 |
| 1 | 1,500 | 3.041 | 2.703 | 11.11 |
| 2 | | 3.024 | 2.656 | 12.17 |
| 3 | | 3.061 | 2.688 | 12.19 |
| 4 | | 3.079 | 2.708 | 12.05 |
| 1 | 2,000 | 3.029 | 2.670 | 11.85 |
| 2 | | 3.056 | 2.680 | 12.30 |
| 3 | | 3.081 | 2.742 | 11.00 |
| 4 | | 3.051 | 2.714 | 11.05 |

ตาราง ก.6 ค่าความชื้นหลังการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| รอบที่ | กำลังไมโครเวฟ (watt) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 3.013 | 2.637 | 12.48 |
| 2 | | 3.023 | 2.621 | 13.30 |
| 3 | | 3.025 | 2.649 | 12.43 |
| 4 | | 3.020 | 2.656 | 12.05 |
| 1 | 500 | 3.051 | 2.685 | 12.00 |
| 2 | | 3.034 | 2.652 | 12.59 |
| 3 | | 3.040 | 2.686 | 11.64 |
| 4 | | 3.054 | 2.683 | 12.15 |
| 1 | 1,000 | 3.041 | 2.684 | 11.74 |
| 2 | | 3.024 | 2.674 | 11.57 |
| 3 | | 3.061 | 2.679 | 12.48 |
| 4 | | 3.079 | 2.711 | 11.95 |
| 1 | 1,500 | 3.050 | 2.693 | 11.70 |
| 2 | | 3.010 | 2.656 | 11.76 |
| 3 | | 3.030 | 2.677 | 11.65 |
| 4 | | 3.040 | 2.689 | 11.55 |
| 1 | 2,000 | 3.039 | 2.681 | 11.78 |
| 2 | | 3.031 | 2.679 | 11.61 |
| 3 | | 3.061 | 2.712 | 11.40 |
| 4 | | 3.079 | 2.719 | 11.69 |

ตาราง ก.7 ค่าความชื้นหลังการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| รอบที่ | กำลังไมโครเวฟ (watt) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 3.050 | 2.666 | 12.59 |
| 2 | | 3.010 | 2.633 | 12.52 |
| 3 | | 3.030 | 2.665 | 12.05 |
| 4 | | 3.040 | 2.652 | 12.76 |
| 1 | 500 | 3.002 | 2.641 | 12.03 |
| 2 | | 3.036 | 2.671 | 12.02 |
| 3 | | 3.039 | 2.651 | 12.77 |
| 4 | | 3.069 | 2.696 | 12.15 |
| 1 | 1,000 | 3.028 | 2.687 | 11.26 |
| 2 | | 3.002 | 2.660 | 11.39 |
| 3 | | 3.040 | 2.687 | 11.61 |
| 4 | | 3.023 | 2.690 | 11.02 |
| 1 | 1,500 | 3.039 | 2.697 | 11.25 |
| 2 | | 3.031 | 2.675 | 11.75 |
| 3 | | 3.052 | 2.701 | 11.50 |
| 4 | | 3.055 | 2.691 | 11.91 |
| 1 | 2,000 | 3.008 | 2.679 | 10.94 |
| 2 | | 3.029 | 2.691 | 11.16 |
| 3 | | 3.003 | 2.675 | 10.92 |
| 4 | | 3.008 | 2.671 | 11.20 |

ตาราง ก.8 ค่าความชื้นหลังการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| รอบที่ | กำลังไมโครเวฟ (watt) | น้ำหนักก่อนอบ (g) | น้ำหนักหลังอบ (g) | ปริมาณความชื้น (% w.b.) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 3.008 | 2.626 | 12.70 |
| 2 | | 3.029 | 2.643 | 12.74 |
| 3 | | 3.003 | 2.615 | 12.92 |
| 4 | | 3.008 | 2.642 | 12.17 |
| 1 | 5,00 | 3.028 | 2.647 | 12.58 |
| 2 | | 3.002 | 2.635 | 12.23 |
| 3 | | 3.040 | 2.655 | 12.66 |
| 4 | | 3.023 | 2.613 | 13.56 |
| 1 | 1,000 | 3.002 | 2.659 | 11.43 |
| 2 | | 3.036 | 2.657 | 12.48 |
| 3 | | 3.039 | 2.655 | 12.64 |
| 4 | | 3.069 | 2.714 | 11.57 |
| 1 | 1,500 | 3.050 | 2.689 | 11.84 |
| 2 | | 3.010 | 2.698 | 10.37 |
| 3 | | 3.030 | 2.696 | 11.02 |
| 4 | | 3.040 | 2.697 | 11.28 |
| 1 | 2,000 | 3.039 | 2.689 | 11.52 |
| 2 | | 3.031 | 2.721 | 10.23 |
| 3 | | 3.052 | 2.725 | 10.71 |
| 4 | | 3.055 | 2.701 | 11.59 |

ตาราง ก.9 ค่าปริมาณน้ำอิสระหลังการอบแห้งผักโขมร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | รอบที่ 1 | รอบที่ 2 | รอบที่ 3 |
|---|---|---|---|---|
| 50℃ | 0 | 0.601 | 0.545 | 0.558 |
| | 500 | 0.592 | 0.540 | 0.534 |
| | 1,000 | 0.555 | 0.525 | 0.515 |
| | 1,500 | 0.549 | 0.529 | 0.536 |
| | 2,000 | 0.468 | 0.488 | 0.496 |

ตาราง ก.10 ค่าปริมาณน้ำอิสระหลังการอบแห้งผักโขมร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | รอบที่ 1 | รอบที่ 2 | รอบที่ 3 |
|---|---|---|---|---|
| 60℃ | 0 | 0.558 | 0.538 | 0.563 |
| | 500 | 0.539 | 0.569 | 0.535 |
| | 1,000 | 0.521 | 0.541 | 0.563 |
| | 1,500 | 0.538 | 0.548 | 0.518 |
| | 2,000 | 0.471 | 0.479 | 0.487 |

ตาราง ก.11 ค่าปริมาณน้ำอิสระหลังการอบแห้งผักโขมร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | รอบที่ 1 | รอบที่ 2 | รอบที่ 3 |
|---|---|---|---|---|
| 50℃ | 0 | 0.551 | 0.585 | 0.538 |
| | 500 | 0.522 | 0.510 | 0.511 |
| | 1,000 | 0.495 | 0.515 | 0.512 |
| | 1,500 | 0.489 | 0.459 | 0.496 |
| | 2,000 | 0.467 | 0.475 | 0.464 |

ตาราง ก.12 ค่าปริมาณน้ำอิสระหลังการอบแห้งผักโขมร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| อุณหภูมิ (℃) | กำลังไมโครเวฟ (watt) | รอบที่ 1 | รอบที่ 2 | รอบที่ 3 |
|---|---|---|---|---|
| 60℃ | 0 | 0.548 | 0.538 | 0.525 |
| | 500 | 0.517 | 0.512 | 0.522 |
| | 1,000 | 0.521 | 0.498 | 0.513 |
| | 1,500 | 0.458 | 0.478 | 0.468 |
| | 2,000 | 0.474 | 0.458 | 0.466 |

ตาราง ก.13 ค่าสีของผักโขมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| รอบที่ | เงื่อนไขการอบแห้ง | L* | a* | b* | Chroma | Hue |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 43.33 | -4.96 | 18.92 | 19.56 | 104.68 |
| 2 | | 43.28 | -4.95 | 18.90 | 19.54 | 104.67 |
| 3 | | 43.28 | -4.95 | 18.93 | 19.57 | 104.65 |
| 4 | | 43.30 | -4.93 | 18.93 | 19.56 | 104.59 |
| 5 | | 43.31 | -4.98 | 18.98 | 19.62 | 104.70 |
| 1 | 500W | 43.53 | -2.89 | 19.46 | 19.67 | 98.44 |
| 2 | | 43.54 | -2.84 | 19.47 | 19.68 | 98.29 |
| 3 | | 43.54 | -2.84 | 19.40 | 19.61 | 98.32 |
| 4 | | 43.53 | -2.85 | 19.50 | 19.71 | 98.31 |
| 5 | | 43.51 | -2.88 | 19.48 | 19.69 | 98.40 |
| 1 | 1,000W | 43.87 | -2.37 | 22.10 | 22.23 | 96.12 |
| 2 | | 43.86 | -2.46 | 22.15 | 22.29 | 96.34 |
| 3 | | 43.85 | -2.48 | 22.12 | 22.26 | 96.39 |
| 4 | | 43.84 | -2.46 | 22.08 | 22.22 | 96.36 |
| 5 | | 43.90 | -2.44 | 22.05 | 22.18 | 96.31 |
| 1 | 1,500W | 42.85 | -1.84 | 22.60 | 22.67 | 94.65 |
| 2 | | 42.88 | -1.85 | 22.53 | 22.61 | 94.69 |
| 3 | | 42.89 | -1.82 | 22.54 | 22.61 | 96.62 |
| 4 | | 42.92 | -1.81 | 22.56 | 22.63 | 94.59 |
| 5 | | 42.88 | -1.82 | 22.57 | 22.64 | 94.61 |
| 1 | 2,000W | 42.81 | -0.85 | 22.81 | 22.81 | 90.95 |
| 2 | | 42.93 | -0.87 | 22.89 | 22.89 | 91.05 |
| 3 | | 42.92 | -0.84 | 22.93 | 22.93 | 90.95 |
| 4 | | 42.88 | -0.85 | 22.93 | 22.93 | 90.92 |
| 5 | | 42.88 | -0.86 | 22.91 | 22.91 | 90.85 |

ตาราง ก.14 ค่าสีของผักโขมที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| รอบที่ | เงื่อนไขการอบแห้ง | L* | a* | b* | Chroma | Hue |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 44.34 | -5.16 | 18.72 | 19.42 | 104.68 |
| 2 | | 44.31 | -5.15 | 18.30 | 19.01 | 104.67 |
| 3 | | 44.33 | -5.15 | 18.83 | 19.52 | 104.65 |
| 4 | | 44.32 | -5.13 | 18.93 | 19.61 | 104.59 |
| 5 | | 44.31 | -5.18 | 18.97 | 19.66 | 104.70 |
| 1 | 500W | 43.72 | -2.96 | 19.86 | 20.08 | 98.44 |
| 2 | | 43.75 | -2.94 | 19.89 | 20.11 | 98.29 |
| 3 | | 43.74 | -2.94 | 19.89 | 20.11 | 98.32 |
| 4 | | 43.73 | -2.95 | 19.87 | 20.09 | 98.31 |
| 5 | | 43.72 | -2.91 | 19.86 | 20.07 | 98.40 |
| 1 | 1,000W | 43.36 | -2.66 | 22.31 | 22.46 | 96.12 |
| 2 | | 43.35 | -2.64 | 22.34 | 22.51 | 96.34 |
| 3 | | 43.32 | -2.65 | 22.33 | 22.48 | 96.39 |
| 4 | | 43.34 | -2.67 | 22.36 | 22.54 | 96.36 |
| 5 | | 43.33 | -2.65 | 22.35 | 22.51 | 96.31 |
| 1 | 1,500W | 42.54 | -1.45 | 22.86 | 22.91 | 94.65 |
| 2 | | 42.57 | -1.46 | 22.82 | 22.88 | 94.69 |
| 3 | | 42.58 | -1.43 | 22.84 | 22.88 | 96.62 |
| 4 | | 42.51 | -1.42 | 22.85 | 22.90 | 94.59 |
| 5 | | 42.57 | -1.43 | 22.87 | 22.91 | 94.61 |
| 1 | 2,000W | 41.63 | -0.72 | 22.98 | 22.98 | 90.95 |
| 2 | | 41.64 | -0.75 | 23.02 | 23.02 | 91.05 |
| 3 | | 41.63 | -0.74 | 23.01 | 23.01 | 90.95 |
| 4 | | 41.68 | -0.75 | 22.98 | 22.98 | 90.92 |
| 5 | | 41.64 | -0.76 | 22.99 | 22.99 | 90.85 |

ตาราง ก.15 สีของผักโขมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1

| รอบที่ | เงื่อนไขการอบแห้ง | L* | a* | b* | Chroma | Hue |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 46.28 | -6.82 | 21.07 | 22.15 | 107.93 |
| 2 | | 46.29 | -6.83 | 21.06 | 22.14 | 107.97 |
| 3 | | 46.28 | -6.81 | 21.03 | 22.11 | 107.94 |
| 4 | | 46.31 | -6.78 | 21.04 | 22.11 | 107.86 |
| 5 | | 46.33 | -6.80 | 21.01 | 22.08 | 107.93 |
| 1 | 500W | 46.90 | -4.04 | 22.59 | 22.95 | 100.14 |
| 2 | | 46.97 | -4.04 | 22.55 | 22.91 | 100.16 |
| 3 | | 47.05 | -4.03 | 22.61 | 22.97 | 100.11 |
| 4 | | 47.01 | -4.05 | 22.58 | 22.94 | 100.17 |
| 5 | | 47.02 | -4.05 | 22.55 | 22.91 | 100.18 |
| 1 | 1,000W | 46.94 | -3.63 | 23.93 | 24.20 | 98.62 |
| 2 | | 46.95 | -3.65 | 23.92 | 24.20 | 98.67 |
| 3 | | 47.03 | -3.63 | 23.89 | 24.16 | 98.64 |
| 4 | | 47.04 | -3.65 | 23.90 | 24.18 | 98.68 |
| 5 | | 47.04 | -3.64 | 23.90 | 24.18 | 98.66 |
| 1 | 1,500W | 45.84 | -1.63 | 24.95 | 25.00 | 93.74 |
| 2 | | 45.88 | -1.59 | 24.96 | 25.01 | 93.64 |
| 3 | | 45.88 | -1.61 | 24.99 | 25.04 | 93.68 |
| 4 | | 45.87 | -1.62 | 24.94 | 24.99 | 93.72 |
| 5 | | 45.85 | -1.65 | 24.96 | 25.01 | 93.78 |
| 1 | 2,000W | 43.64 | -0.38 | 25.32 | 25.33 | 91.92 |
| 2 | | 43.69 | -0.42 | 25.32 | 25.33 | 91.97 |
| 3 | | 43.70 | -0.38 | 25.27 | 25.28 | 91.90 |
| 4 | | 43.68 | -0.37 | 25.33 | 25.34 | 91.92 |
| 5 | | 43.67 | -0.34 | 25.32 | 25.33 | 91.94 |

ตาราง ก.16 สีของผักโขมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซ้ำ 2

| รอบที่ | เงื่อนไขการอบแห้ง | L* | a* | b* | Chroma | Hue |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 47.22 | -6.93 | 20.48 | 21.61 | 107.93 |
| 2 | | 47.13 | -6.94 | 20.47 | 21.60 | 107.97 |
| 3 | | 47.28 | -6.92 | 20.44 | 21.57 | 107.94 |
| 4 | | 47.21 | -6.89 | 20.43 | 21.57 | 107.86 |
| 5 | | 47.13 | -6.91 | 20.42 | 21.54 | 107.93 |
| 1 | 500W | 46.43 | -3.97 | 21.31 | 21.68 | 100.14 |
| 2 | | 46.43 | -3.95 | 21.35 | 21.71 | 100.16 |
| 3 | | 46.46 | -3.96 | 21.31 | 21.67 | 100.11 |
| 4 | | 46.47 | -3.95 | 21.38 | 21.74 | 100.17 |
| 5 | | 46.44 | -3.96 | 21.36 | 21.71 | 100.18 |
| 1 | 1,000W | 45.23 | -2.72 | 22.92 | 23.09 | 98.62 |
| 2 | | 45.24 | -2.74 | 22.91 | 23.08 | 98.67 |
| 3 | | 45.22 | -2.72 | 22.88 | 23.05 | 98.64 |
| 4 | | 45.25 | -2.74 | 22.89 | 23.06 | 98.68 |
| 5 | | 45.24 | -2.73 | 22.89 | 23.06 | 98.66 |
| 1 | 1,500W | 44.63 | -1.44 | 25.14 | 25.19 | 93.74 |
| 2 | | 44.67 | -1.39 | 25.16 | 25.20 | 93.64 |
| 3 | | 44.67 | -1.40 | 25.11 | 25.14 | 93.68 |
| 4 | | 44.72 | -1.41 | 25.13 | 25.16 | 93.72 |
| 5 | | 44.64 | -1.44 | 25.14 | 25.20 | 93.78 |
| 1 | 2,000W | 43.14 | -0.41 | 26.13 | 26.13 | 91.92 |
| 2 | | 43.19 | -0.38 | 26.09 | 26.10 | 91.97 |
| 3 | | 43.17 | -0.39 | 26.15 | 26.18 | 91.90 |
| 4 | | 43.16 | -0.41 | 26.12 | 26.14 | 91.92 |
| 5 | | 43.17 | -0.41 | 26.11 | 26.13 | 91.94 |

ตาราง ก.17 สีของผักโขมอบแห้งที่ขายตามท้องตลาด

| รอบที่ | เงื่อนไขการอบแห้ง | L* | a* | b* | Chroma | Hue |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ซ้ำ 1 | 49.85 | -3.57 | 20.64 | 20.95 | 99.81 |
| 2 | | 49.91 | -3.60 | 20.68 | 20.99 | 99.87 |
| 3 | | 49.92 | -3.62 | 20.69 | 21.00 | 99.92 |
| 4 | | 49.95 | -3.61 | 20.71 | 21.02 | 99.88 |
| 5 | | 49.93 | -3.59 | 20.65 | 20.96 | 99.86 |
| 1 | ซ้ำ 2 | 50.47 | -3.87 | 21.03 | 21.38 | 100.42 |
| 2 | | 50.49 | -3.86 | 20.98 | 21.33 | 100.42 |
| 3 | | 50.51 | -3.86 | 21.02 | 21.37 | 100.40 |
| 4 | | 50.51 | -3.85 | 21.02 | 21.37 | 100.38 |
| 5 | | 50.53 | -3.87 | 20.99 | 21.34 | 100.44 |
| 1 | ซ้ำ 3 | 50.68 | -3.83 | 21.01 | 21.36 | 100.33 |
| 2 | | 50.67 | -3.82 | 20.96 | 21.31 | 100.32 |
| 3 | | 50.77 | -3.81 | 20.95 | 21.29 | 100.30 |
| 4 | | 50.77 | -3.83 | 20.97 | 21.32 | 100.35 |
| 5 | | 50.74 | -3.82 | 20.93 | 21.28 | 100.34 |

ตาราง ก.18 ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมหลังการอบแห้งร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำที่1

| รอบที่ | เงื่อนการอบแห้ง | ค่าคลอโรฟิลล์ (a) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์ (b) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์รวม (ml/100g) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 2.82 | 0.66 | 3.53 |
| 2 | | 2.81 | 0.67 | 3.54 |
| 3 | | 2.80 | 0.68 | 3.53 |
| 1 | 500W | 3.55 | 0.43 | 4.04 |
| 2 | | 3.56 | 0.45 | 4.07 |
| 3 | | 3.55 | 0.43 | 4.03 |
| 1 | 1,000W | 4.17 | 0.76 | 5.00 |
| 2 | | 4.19 | 0.74 | 5.00 |
| 3 | | 4.20 | 0.75 | 5.03 |
| 1 | 1,500W | 2.53 | 0.45 | 3.02 |
| 2 | | 2.50 | 0.46 | 3.00 |
| 3 | | 2.49 | 0.47 | 3.00 |
| 1 | 2,000W | 1.83 | 0.19 | 2.05 |
| 2 | | 1.83 | 0.19 | 2.05 |
| 3 | | 1.83 | 0.18 | 2.04 |

ตาราง ก.19 ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมหลังการอบแห้งร่วมกับลมร้อน 50 องศาเซลเซียส ซ้ำที่2

| รอบที่ | เงื่อนการอบแห้ง | ค่าคลอโรฟิลล์ (a) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์ (b) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์รวม (ml/100g) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 2.91 | 0.82 | 3.79 |
| 2 | | 2.86 | 0.85 | 3.77 |
| 3 | | 2.88 | 0.86 | 3.80 |
| 1 | 500W | 3.58 | 0.49 | 4.12 |
| 2 | | 3.52 | 0.53 | 4.11 |
| 3 | | 3.50 | 0.51 | 4.07 |
| 1 | 1,000W | 4.24 | 0.73 | 5.05 |
| 2 | | 4.23 | 0.72 | 5.02 |
| 3 | | 4.24 | 0.74 | 5.05 |
| 1 | 1,500W | 2.62 | 0.43 | 3.09 |
| 2 | | 2.66 | 0.40 | 3.10 |
| 3 | | 2.63 | 0.42 | 3.09 |
| 1 | 2,000W | 1.86 | 0.25 | 2.14 |
| 2 | | 1.84 | 0.32 | 2.19 |
| 3 | | 1.84 | 0.22 | 2.09 |

ตาราง ก.20 ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมหลังการอบแห้งร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำที่ 1

| รอบที่ | เงื่อนการอบแห้ง | ค่าคลอโรฟิลล์ (a) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์ (b) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์รวม (ml/100g) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 3.32 | 0.77 | 4.15 |
| 2 | | 3.20 | 0.83 | 4.10 |
| 3 | | 3.23 | 0.79 | 4.08 |
| 1 | 500W | 3.40 | 0.80 | 4.27 |
| 2 | | 3.41 | 0.80 | 4.27 |
| 3 | | 3.36 | 0.82 | 4.24 |
| 1 | 1,000W | 3.85 | 0.68 | 4.59 |
| 2 | | 3.82 | 0.72 | 4.60 |
| 3 | | 3.87 | 0.70 | 4.64 |
| 1 | 1,500W | 2.84 | 0.52 | 3.41 |
| 2 | | 2.83 | 0.50 | 3.38 |
| 3 | | 2.85 | 0.50 | 3.40 |
| 1 | 2,000W | 2.44 | 0.18 | 2.65 |
| 2 | | 2.45 | 0.18 | 2.66 |
| 3 | | 2.47 | 0.17 | 2.67 |

ตาราง ก.21 ค่าคลอโรฟิลล์ของผักโขมหลังการอบแห้งร่วมกับลมร้อน 60 องศาเซลเซียส ซ้ำที่ 2

| รอบที่ | เงื่อนการอบแห้ง | ค่าคลอโรฟิลล์ (a) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์ (b) (ml/100g) | ค่าคลอโรฟิลล์รวม (ml/100g) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0W | 3.22 | 0.94 | 4.22 |
| 2 | | 3.18 | 0.97 | 4.22 |
| 3 | | 3.20 | 0.93 | 4.20 |
| 1 | 500W | 3.47 | 0.87 | 4.40 |
| 2 | | 3.43 | 0.86 | 4.35 |
| 3 | | 3.46 | 0.85 | 4.38 |
| 1 | 1,000W | 3.62 | 0.78 | 4.47 |
| 2 | | 3.66 | 0.81 | 4.54 |
| 3 | | 3.68 | 0.77 | 4.52 |
| 1 | 1,500W | 2.74 | 0.42 | 3.21 |
| 2 | | 2.80 | 0.45 | 3.29 |
| 3 | | 2.79 | 0.39 | 3.22 |
| 1 | 2,000W | 2.41 | 0.12 | 2.57 |
| 2 | | 2.41 | 0.16 | 2.60 |
| 3 | | 2.43 | 0.14 | 2.60 |

ตาราง ก.22 คำนวณกำลังไฟฟ้าของ Heater

| สายไฟ | กระแสไฟฟ้า (A) | | กำลังไฟฟ้า(Kw) | |
|---|---|---|---|---|
| | 50 C | 60 C | 50 C | 60 C |
| R(2) | 11.6 | 10.3 | 2.55 | 2.27 |
| S(2) | 6.1 | 5.3 | 1.34 | 1.17 |
| T(2) | 0 | 0 | 0.00 | 0.00 |
| N2 | 16.1 | 13.1 | 3.54 | 2.88 |
| N2 | 6.1 | 6 | 1.34 | 1.32 |
| N2 | 6.3 | 6.1 | 1.39 | 1.34 |
| R(3) | 12.1 | 11.4 | 2.66 | 2.51 |
| S(3) | 6.1 | 6 | 1.34 | 1.32 |
| T(3) | 11.9 | 10.4 | 2.62 | 2.29 |
| N2 | 8 | 8 | 1.76 | 1.76 |
| N2 | 6.6 | 6.5 | 1.45 | 1.43 |
| N2 | 12.4 | 10.6 | 2.73 | 2.33 |
| NM | 3.2 | 3.1 | 0.70 | 0.68 |
| M | 3.5 | 3.2 | 0.77 | 0.70 |
| n2ล่าง | 0.4 | 0.4 | 0.09 | 0.09 |
| L6 | 0.5 | 0.5 | 0.11 | 0.11 |
| รวม | 110.9 | 100.9 | 24.40 | 22.20 |

ตาราง ก.23 การใช้พลังงานของไฟฟ้าในการอบของ Heater ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

| เงื่อนไข | เวลาที่ใช้ในการอบ | เวลาทำงาน Heater | | กำลังงานที่ใช้ (kwh) | พลังงานที่ใช้ (kwh) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | เปิด (ชม.) | ปิด (ชม.) | | |
| 50 C | 8 ชม. | 5.33 | 2.67 | 22.60 | 120.53 |
| 500 W 50 C | 4 ชม | 2.67 | 1.33 | 22.60 | 60.27 |
| 1,000 W 50 C | 3 ชม | 2.00 | 1.00 | 22.60 | 45.20 |
| 1,500 W 50C | 2.30 ชม | 1.67 | 0.83 | 22.60 | 37.67 |
| 2,000 W 50 C | 2 ชม | 1.33 | 0.67 | 22.60 | 30.13 |

ตาราง ก.24 การใช้พลังงานของไฟฟ้าในการอบของ Heater ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

| เงื่อนไข | เวลาที่ใช้ในการอบ | เวลาทำงาน Heater | | กำลังงานที่ใช้ (kwh) | พลังงานที่ใช้ (kwh) |
|---|---|---|---|---|---|
| | | เปิด (ชม.) | ปิด (ชม.) | | |
| 60 C | 8 ชม. | 5.33 | 2.67 | 24.30 | 129.60 |
| 500 W 60 C | 4 ชม | 2.67 | 1.33 | 24.30 | 64.80 |
| 1,000 W 60 C | 3 ชม | 2.00 | 1.00 | 24.30 | 48.60 |
| 1,500 W 60C | 2.30 ชม | 1.67 | 0.83 | 24.30 | 40.50 |
| 2,000 W 60 C | 2 ชม | 1.33 | 0.67 | 24.30 | 32.40 |

ตาราง ก.25 การใช้พลังงานของไฟฟ้าในการอบของ Blower ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

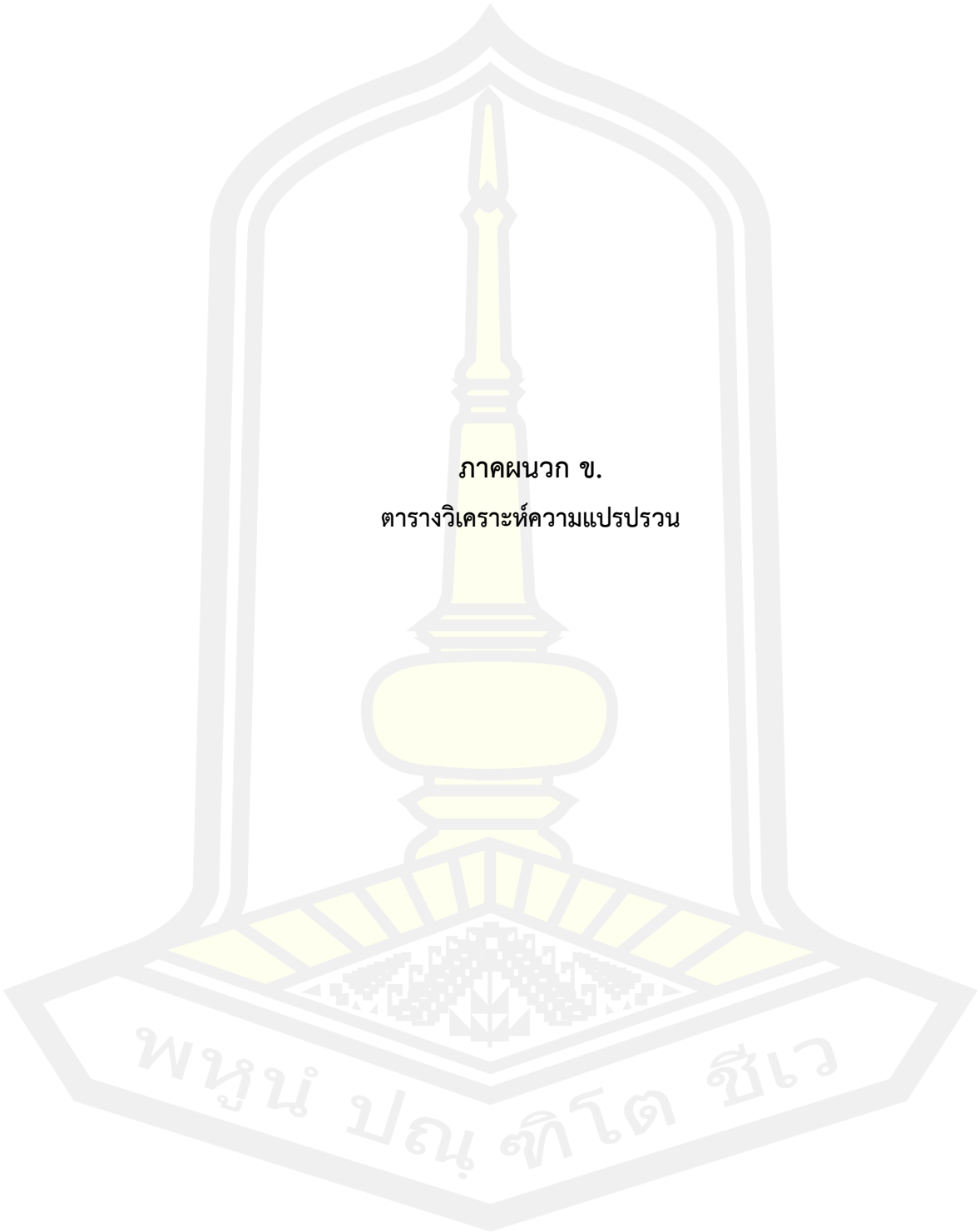
| เงื่อนไข | เวลาที่ใช้ในการอบ | กำลังงานที่ใช้(kwh) | พลังงานที่ใช้ (kwh) |
|---|---|---|---|
| 50C | 8 ชม | 0.22 | 0.72 |
| 500 W 50 C | 4 ชม | 0.22 | 0.36 |
| 1,000 W 50 C | 3 ชม. | 0.22 | 0.27 |
| 1,500 W 50C | 2 ชม. 30นาที | 0.22 | 0.225 |
| 2,000 W 50 C | 2 ชม. | 0.22 | 0.18 |

ตาราง ก.26 การใช้พลังงานของไฟฟ้าในการอบของ Blower ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

| เงื่อนไข | เวลาที่ใช้ในการอบ | กำลังงานที่ใช้(kwh) | พลังงานที่ใช้ (kwh) |
|---|---|---|---|
| 60C | 8 ชม | 0.22 | 1.76 |
| 500 W 60 C | 4 ชม | 0.22 | 0.88 |
| 1,000 W 60 C | 3 ชม. | 0.22 | 0.66 |
| 1,500 W 60C | 2 ชม. 30นาที | 0.22 | 0.55 |
| 2,000 W 60 C | 2 ชม. | 0.22 | 0.44 |

ตาราง ก.27 การใช้พลังงานของไฟฟ้าในการอบของ Microwave

| เงื่อนไข | เมเนติกตัวที่ 1 และ 4 | | พลังงาน (kwh) | เมเนติกตัวที่ 2 และ 3 | | พลังงาน (kwh) | พลังงานรวม (kwh) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | เปิด (hr) | ปิด (hr) | | เปิด (hr) | ปิด (hr) | | |
| 500W | 0.67 | 3.33 | 0.34 | 0.33 | 3.67 | 0.17 | 0.50 |
| 1,000W | 1.00 | 2.00 | 1.00 | 0.50 | 2.50 | 0.50 | 1.50 |
| 1,500W | 1.25 | 1.25 | 1.88 | 0.625 | 1.875 | 0.94 | 2.81 |
| 2,000W | 1.33 | 0.67 | 2.66 | 0.67 | 1.33 | 1.34 | 4.00 |



# ภาคผนวก ข.

## ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตาราง ข.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอุณหภูมิต่อค่าสี L* ของผลิตภัณฑ์

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 244.793[a] | 9 | 27.199 | 109.903 | .000 |
| Intercept | 197406.933 | 1 | 197406.933 | 797655.694 | .000 |
| Temperature | 149.793 | 1 | 149.796 | 605.264 | .000 |
| microwave | 83.364 | 4 | 20.841 | 84.211 | .000 |
| temperature*microwave | 11.636 | 4 | 2.909 | 11.754 | .000 |
| Error | 22.274 | 90 | .247 | | |
| Total | 197673.999 | 100 | | | |
| Corrected Total | 267.066 | 99 | | | |

ตาราง ข.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอุณหภูมิต่อค่าสี a* ของผลิตภัณฑ์

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 360.034[a] | 9 | 40.004 | 1232.503 | .000 |
| Intercept | 834.517 | 1 | 834.517 | 25711.186 | .000 |
| Temperature | 334.717 | 4 | 83.679 | 2578.131 | .000 |
| microwave | 9.132 | 1 | 9.132 | 281.369 | .000 |
| temperature*microwave | 16.184 | 4 | 4.046 | 124.659 | .000 |
| Error | 2.921 | 90 | .032 | | |
| Total | 1197.472 | 100 | | | |
| Corrected Total | 362.955 | 99 | | | |

ตาราง ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอุณหภูมิต่อค่าสี b* ของผลิตภัณฑ์

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 409.463[a] | 9 | 45.496 | 408.563 | .000 |
| Intercept | 50093.602 | 1 | 50093.602 | 449850.945 | .000 |
| Temperature | 279.926 | 4 | 69.981 | 628.448 | .000 |
| microwave | 122.235 | 1 | 122.235 | 1097.697 | .000 |
| temperature*microwave | 7.303 | 4 | 1.826 | 16.395 | .000 |
| Error | 10.022 | 90 | .111 | | |
| Total | 50513.087 | 100 | | | |
| Corrected Total | 419.485 | 99 | | | |

ตาราง ข.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอุณหภูมิต่อค่าคลอโรฟิลล์ a ของผลิตภัณฑ์

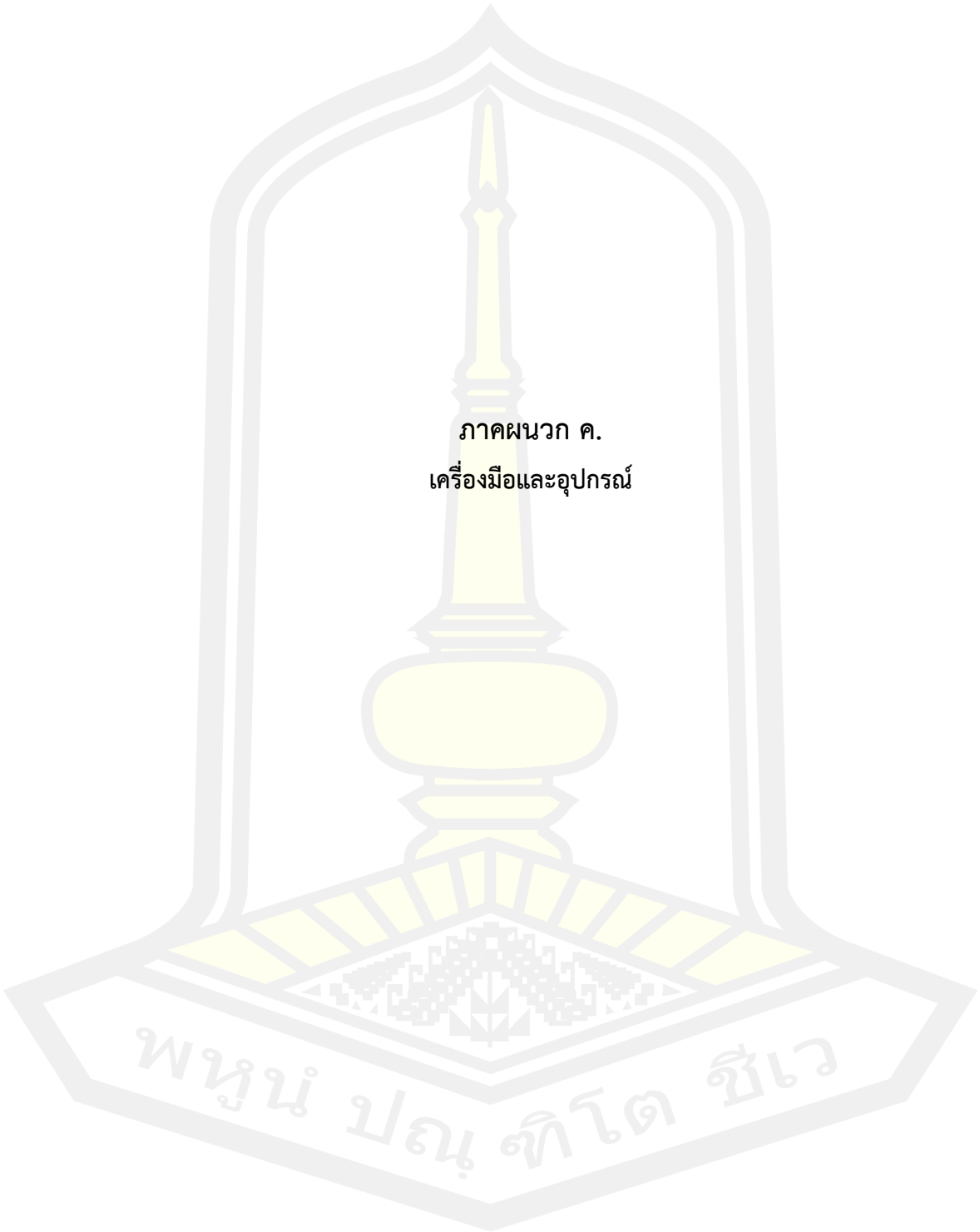
| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 26.545[a] | 9 | 2.949 | 1079.736 | .000 |
| Intercept | 563.715 | 1 | 563.715 | 206363.954 | .000 |
| Temperature | .237 | 1 | .237 | 86.717 | .000 |
| microwave | 24.196 | 4 | 6.049 | 2214.401 | .000 |
| temperature*microwave | 2.112 | 4 | .528 | 193.326 | .000 |
| Error | 3137 | 50 | .003 | | |
| Total | 590.397 | 60 | | | |
| Corrected Total | 26.682 | 59 | | | |

ตาราง ข.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอุณหภูมิต่อค่าคลอโรฟิลล์ b ของผลิตภัณฑ์

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 3.484[a] | 9 | .387 | 134.170 | .000 |
| Intercept | 19.517 | 1 | 19.517 | 6764.143 | .000 |
| Temperature | .114 | 1 | .114 | 39.651 | .000 |
| microwave | 3.040 | 4 | .760 | 263.437 | .000 |
| temperature*microwave | .329 | 4 | .082 | 28.533 | .000 |
| Error | .144 | 50 | .003 | | |
| Total | 23.145 | 60 | | | |
| Corrected Total | 3.628 | 59 | | | |

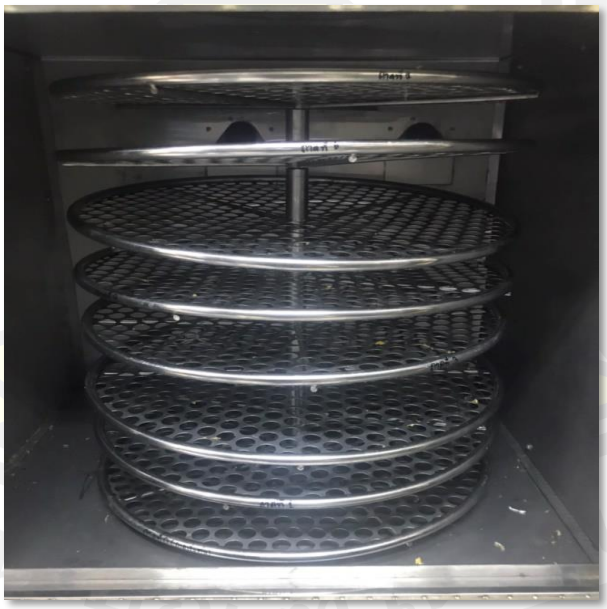
ตาราง ข.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของการอบแห้งผักโขมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอุณหภูมิต่อค่าคลอโรฟิลล์รวม ของผลิตภัณฑ์

| Source | Type III Sum of Squares | df | Mean Square | F | Sig. |
|---|---|---|---|---|---|
| Corrected Model | 45.213[a] | 9 | 5.024 | 1025.172 | .000 |
| Intercept | 816.302 | 1 | 816.302 | 166580.900 | .000 |
| Temperature | .702 | 1 | .702 | 143.256 | .000 |
| microwave | 42.565 | 4 | 10.641 | 2171.555 | .000 |
| temperature*microwave | 1.946 | 4 | .486 | 99.267 | .000 |
| Error | .245 | 50 | .005 | | |
| Total | 861.760 | 60 | | | |
| Corrected Total | 45.458 | 59 | | | |

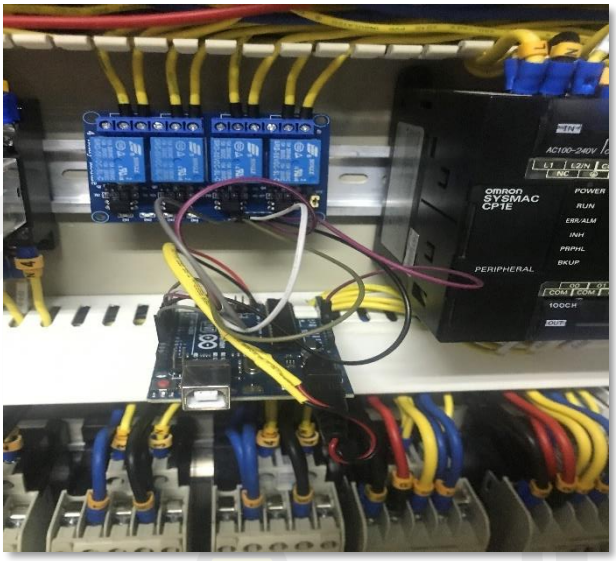


# ภาคผนวก ค.
## เครื่องมือและอุปกรณ์

ภาพ ค.1 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน



ภาพ ค.2 ห้องอบแห้งและถาดใส่ผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง




ภาพ ค.3 ชุดควบคุมแมกนีตรอนด้วยโปรแกรม Arduino

ภาพ ค.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก

ภาพ ค.5 ผักโขมอบแห้งที่ขายตามท้องตลาด

# ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|---|
| **ชื่อ** | นายรุกขชาติ ผลผาด |
| **วันเกิด** | 25 มกราคม พ.ศ.2530 |
| **สถานที่เกิด** | จังหวัดกาฬสินธุ์ |
| **สถานที่อยู่ปัจจุบัน** | 4/7 ถ.บายพาสหัวคู ต.เมือง อ.เมืองกาฬสินธุ์ จ.กาฬสินธุ์ 46000 |
| **ตำแหน่งหน้าที่การงาน** | พนักงานพราชการ (ครู) วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ |
| **สถานที่ทำงานปัจจุบัน** | วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์ ต.เมือง อ.เมืองกาฬสินธุ์ จ.กาฬสินธุ์ 46000 |
| **ประวัติการศึกษา** | พ.ศ.2548 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)<br>สาขาวิชาช่างยนต์ วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์<br>พ.ศ.2550 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)<br>สาขาวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์<br>พ.ศ.2553 ประกาศนียบัตรครูเทคนิคชั้นสูง (ปทส.)<br>สาขาวิชาเครื่องกล วิทยาลัยเทคนิคกาฬสินธุ์<br>พ.ศ.2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.)<br>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |