การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

วิทยานิพนธ์

ของ

ปกรณ์เกียรติ ภูกองพลอย

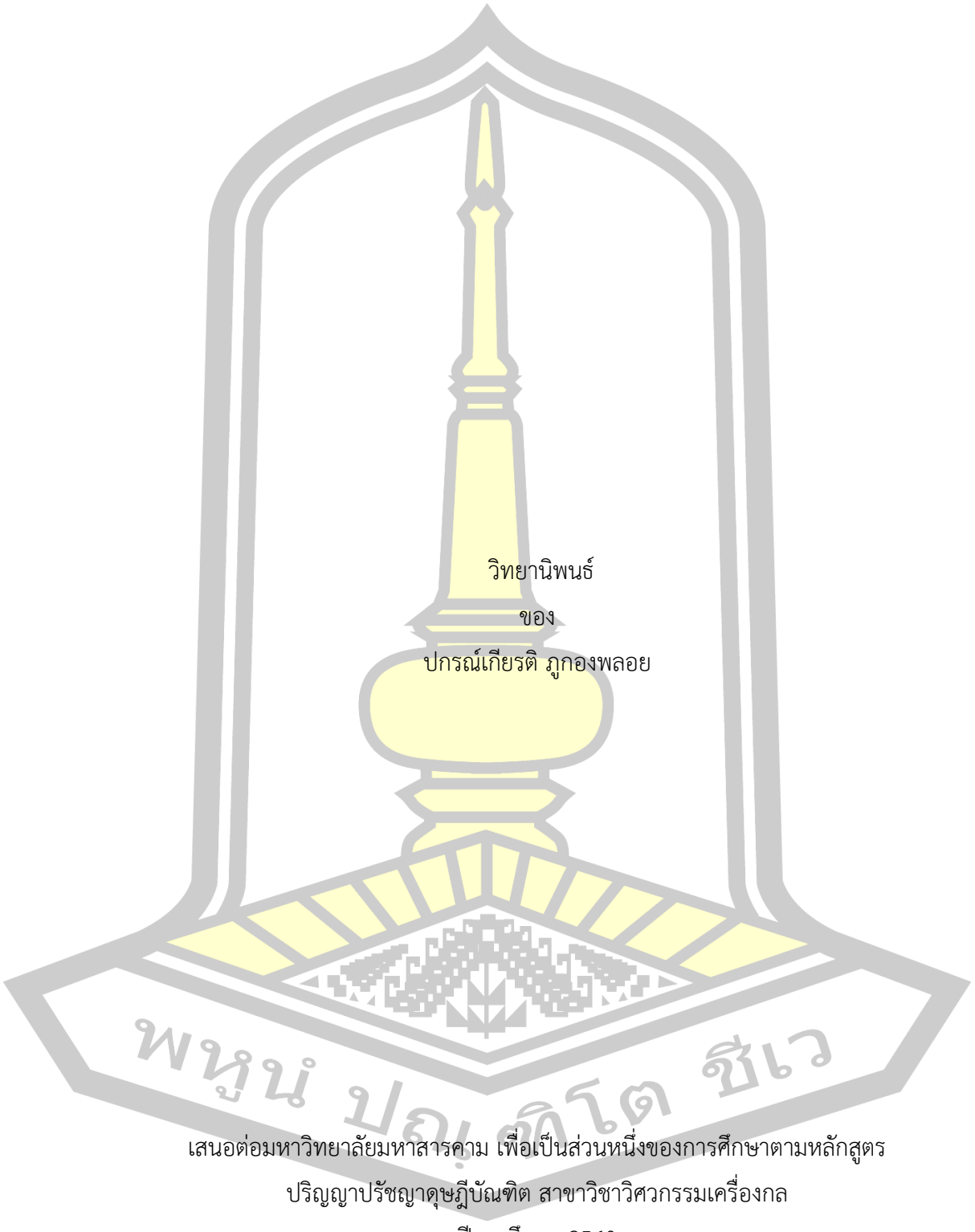
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2560

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน



วิทยานิพนธ์

ของ

ปกรณ์เกียรติ ภูกองพลอย

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2560

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Drying of Macadamia Nuts by Microwave - Hot Air Combination

Pakonkiad Poogungploy

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements

for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Academic Year 2017

Copyright of Mahasarakham University

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปกรณ์เกียรติ ภูกองพลอย แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รศ. ดร. วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์)

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

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

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. จักรมาส เลาหวณิช)

.....กรรมการ
(ผศ. ดร. ธีรพัฒน์ ชมภูคำ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน.....เดือน.....ปี.....

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

ชื่อเรื่อง การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน
ผู้วิจัย ปกรณ์เกียรติ ภูกองพลอย
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต **สาขาวิชา** วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีการศึกษา** 2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการควบคุมกำลังไมโครเวฟต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมีย คุณภาพ การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้ง การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียที่ 60-80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องตรวจจับความร้อนแบบแผ่รังสี และใช้กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนอยู่ในช่วง 40-70 องศาเซลเซียส โดยไมโครเวฟจะทำงาน เมื่ออุณหภูมิผิวต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ส่วนที่สอง การอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวใช้กำลังไมโครเวฟ 1.57-4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับลมร้อนอยู่ในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วลมคงที่ 1 เมตรต่อวินาที ความชื้นเมล็ดแมคคาเดเมียในกะลาเริ่มต้นประมาณร้อยละ 13 ฐานแห้ง อบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง วิเคราะห์คุณภาพด้านค่าสี ความสว่าง (L*) ความเป็นสีแดง (a*) ความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าน้ำอิสระ ค่าความแข็ง และความหืนโดยวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งสูงสุด 2.80 กรัมน้ำระเหยต่อนาที ในกรณีที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว และมีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่า 0.97 กรัมน้ำระเหยต่อนาที โดยอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้ง พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวค่า L* ของเนื้อในมีแนวโน้มสูงกว่าการอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว เมื่อออบแห้งที่อุณหภูมิสูงค่า a* และค่า b* จะสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อพิจารณาที่ความสว่างสูงสุด พบว่าอยู่ที่เงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส และผลการเปรียบเทียบค่า L* พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวในทุกเงื่อนไข ($p<0.05$) ค่าความแข็งของเนื้อในที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวอยู่ในช่วง 84 ถึง 143 นิวตัน และไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว อยู่ในช่วง 63 ถึง 108 นิวตัน นอกจากนี้พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และค่าเปอร์ออกไซด์จะมีค่าลดลงเมื่อระดับกำลัง

ไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สำหรับการใช้พลังงานรวมพบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น พลังงานรวมต่ำสุดของการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่า 0.42 และ0.06 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง สำหรับการอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีประสิทธิภาพสูงกว่าการอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว และการอบแห้งลมร้อนเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาในด้านพลังงานและคุณภาพ สามารถสรุปได้ว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวแมคคาเดเมียที่ 60 องศาเซลเซียส ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย เนื่องจากค่าสีความสว่างสูงสุด มีค่าความหืนในระดับต่ำและการใช้พลังงานต่ำกว่าการอบแห้งลมร้อนเพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพการอบแห้ง, เมล็ดแมคคาเดเมีย, การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ, การควบคุมอุณหภูมิผิว

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

TITLE Drying of Macadamia Nuts by Microwave - Hot Air Combination

AUTHOR Pakonkiad Poogungploy

ADVISORS Assistant Professor Dr. Nattapol Poomsa-ad

Assistant Professor Dr. Lamul Wiset

DEGREE Doctor of Philosophy **MAJOR** Mechanical Engineering

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2017

ABSTRACT

The objectives of this work are to study the effect of microwave power control on macadamia drying kinetics, quality, energy consumption and drying efficiency. The experiment was divided into 2 parts; part I was drying with surface temperature control in the range of 60-80 ℃ using a thermal radiation detector. A 850 W of microwave power combined with hot air drying at temperature in the range of 40-70 ℃ were used. Microwave was automatically worked when the surface temperature was lower than setting. Part II, drying without surface temperature control was using microwave power in the range of 1.37-4.39 W/g combined with hot air drying at temperature in the range of 40-60 ℃. The constant air velocity was fixed at 1 m/s. The initial nut moisture content of 13% dry basis (nut in shell) was dried down to ~3.5 % dry basis. Quality assessment, colour L* (lightness), a* (redness), b* (yellowness), water activity, hardness and rancidity by peroxides value were determined.

Results showed that the highest drying rate was drying without surface temperature control at 2.80 g evaporated water per minute. The highest drying rate of with surface temperature control was 0.97 g evaporated water per minute. The higher drying temperature and microwave power resulted in increase in drying rate. For the quality of macadamia after drying found that the trend of L* of kernel of drying with surface temperature control was higher than without surface temperature control. The a* and b* of high temperature drying was higher than low temperature

drying. When considering in the highest lightness, the drying with surface temperature control at 60 ℃ combined with hot air at 60 ℃. The kernel hardness of drying with and without surface temperature control was 84-143 N and 63-108 N. Moreover, the peroxide value of high drying temperature was lower than low drying temperature. The peroxide value was decreased when the microwave power increased. For the total energy consumption, it was decreased when the microwave power increased. The lowest total energy consumption of drying with and without surface temperature control was 0.42 and 0.06 kW-h. Drying efficiency of drying without surface temperature control was higher than drying with surface temperature control and only hot air drying, respectively.

From the result when considering in energy consumption and quality, it could be concluded that drying with surface temperature control of 60 C and hot air at 60 C is appropriate for macadamia drying due to highest L* value, low level of peroxides value and energy consumption was less than hot air drying alone.

Keyword : : Drying efficiency, Macadamia nut, Microwave drying, Surface temperature control

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ละมุล วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ เสนอแนะและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดมาจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์.ดร.วีรเชษฐ์ จิตตาณิชย์ ประธานกรรมการสอบ (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก) ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.จักรมาส เลาหวณิช และผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ธีรพัฒน์ ชมภูคำกรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ กรรมการสอบ (อาจารย์ระดับบัณฑิตศึกษาประจำ) ซึ่งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ขอขอบคุณ Assco.Prof. John Morris ที่ช่วยในการแก้ไขบทความสำหรับการเผยแพร่ในระดับนานาชาติ ให้ผ่านมาด้วยดี และเจ้าหน้าที่ เพื่อนๆ ในหน่วยวิจัยเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและเครื่องจักรกลเกษตรทุกคน ที่เป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัวของผู้วิจัยที่อยู่เบื้องหลัง ตลอดจนผู้แต่งหนังสือและบทความต่างๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจนสามารถให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ปกรณ์เกียรติ ภูกองพลอย

พหูน ปณฺฑิโต ชีเว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพประกอบ ..... ฐ

บทที่ 1 1

บทนำ 1

ภูมิหลัง 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

สมมุติฐานของการวิจัย 3

ขอบเขตการวิจัย 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

สถานที่ดำเนินงาน 3

บทที่ 2 4

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล 4

แมคคาเดเมีย 4

ทฤษฎีการอบแห้ง 13

หลักการพื้นฐานการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ 19

การตรวจจับอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส 25

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ 27

ปัจจัยที่มีอิทธิผลต่อคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย 35
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 39
บทที่ 3 45
วิธีดำเนินการวิจัย 45
การออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ 45
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 49
การออกแบบการทดลอง 50
การดำเนินการทดลอง 53
การวิเคราะห์คุณภาพ 56
ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (η_e) 60
การวิเคราะห์ทางสถิติ 60
บทที่ 4 61
ผลการวิจัยและการอภิปราย 61
บทที่ 5 84
สรุปผล และข้อเสนอแนะ 84
บรรณานุกรม 86
ภาคผนวก 94
ประวัติผู้เขียน 126

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 สารประกอบของเมล็ดแคคาเดเมียดิบ 6

ตาราง 2 ลักษณะแมคคาดาเมียที่ใช้ในทางการค้า 8

ตาราง 3 มาตรฐานคุณภาพของแมคคาเดเมียกำหนดโดยประเทศออสเตรเลีย 11

ตาราง 4 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน 28

ตาราง 5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น และค่า a_w ในอาหาร 37

ตาราง 6 เงื่อนไขการอบแห้งแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย 51

ตาราง 7 เงื่อนไขการอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว 53

ตาราง 8 ค่าสีของเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิว 69

ตาราง 9 ค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว 72

ตาราง 10 ค่าน้ำอิสระ a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยการควบคุมอุณหภูมิผิวควบคุมอุณหภูมิผิว 75

ตาราง 11 ค่าน้ำอิสระ a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว 76

ตาราง 12 ค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยการควบคุมอุณหภูมิผิว 77

ตาราง 13 ค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว 78

ตาราง 14 ค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยการควบคุมอุณหภูมิผิว 79

ตาราง 15 ค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว 80

ตาราง 16 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิผิว 81

ตาราง 17 การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว 82

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 ลักษณะต้นแมคคาดาเมีย 5

ภาพประกอบ 2 ลักษณะผลแมคคาดาเมีย 5

ภาพประกอบ 3 ส่วนประกอบผลแมคคาดาเมีย 5

ภาพประกอบ 4 กระบวนการผลิตแมคคาดาเมีย 7

ภาพประกอบ 5 เครื่องกะเทาะกะลาแมคคาดาเมีย 9

ภาพประกอบ 6 การคัดแยกขนาดเมล็ดด้วยมือ 9

ภาพประกอบ 7 เป็นค่า L*, Chroma และ Hue angle 12

ภาพประกอบ 8 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง 13

ภาพประกอบ 9 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง 14

ภาพประกอบ 10 กราฟการทำแห้งอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุแห้งจะคงที่และความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายยังผิววัสดุด้วยการพาความร้อน 15

ภาพประกอบ 11 แผนภูมิไซโครเมตริกกระบวนการทำให้ร้อน 17

ภาพประกอบ 12 การผสมของอากาศสองชนิดในปริมาณเท่ากัน 17

ภาพประกอบ 13 การผสมของอากาศสองชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน 18

ภาพประกอบ 14 กระบวนการแอเดียแบติกอิ่มตัว จากจุด A ไป B 18

ภาพประกอบ 15 กระบวนการแอเดียแบติกอิ่มตัว 19

ภาพประกอบ 16 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 21

ภาพประกอบ 17 อัตรากิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (a) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า (b) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้ว 22

ภาพประกอบ 18 เทอร์มอไพล์ (Thermopile sensor รุ่น TPA81) 26

ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งของเทอร์มอไพล์ค่า FOV 83 องศา และระยะห่างของ d ต่าง ๆ 27

ภาพประกอบ 20 ค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์กับค่าความชื้น 29

ภาพประกอบ 21 การเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่าง ๆ (a) พลังงานแบบดั้งเดิมที่ให้ความร้อนที่ผิว (b) พลังงานไมโครเวฟ 31

ภาพประกอบ 22 ความสัมพันธ์ของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก 35

ภาพประกอบ 23 อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและค่าน้ำอิสระ 36

ภาพประกอบ 24 แผนภาพการทำงานการควบคุมอุณหภูมิผิวคงที่และน้ำหนักตัวอย่างในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 46

ภาพประกอบ 25 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิผิววัสดุภายในห้องอบแห้ง 47

ภาพประกอบ 26 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน 48

ภาพประกอบ 27 วงจรการคบคุมของระบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน 49

ภาพประกอบ 28 ตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศทางเข้า-ออก 49

ภาพประกอบ 29 การปรับตั้งค่าและกำหนดอุณหภูมิผิวที่ต้องการควบคุม 54

ภาพประกอบ 30 การปรับตั้งค่าและกำหนดเวลาการเปิดและปิด 55

ภาพประกอบ 31 การวัดค่าสี 56

ภาพประกอบ 32 การวิเคราะห์ค่าน้ำอิสระ 56

ภาพประกอบ 33 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง 57

ภาพประกอบ 34 ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งภายใต้การควบคุมอุณหภูมิผิวแมคคาเดเมีย 62

ภาพประกอบ 35 ความชื้นและอัตราการอบแห้ง ในระหว่างการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิผิวต่างกัน 63

ภาพประกอบ 36 อัตราการอบแห้งของแมคคาเดเมีย ภายใต้เงื่อนการควบคุมอุณหภูมิผิว 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส 64

ภาพประกอบ 37 อุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้ง ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิผิว 66

ภาพประกอบ 38 อุณหภูมิผิวแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน 67

ภาพประกอบ 39 เมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียสโดยใช้ไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน 70

ภาพประกอบ 40 เมล็ดแมคคาเดเมียควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟและอากาศร้อนแตกต่างกัน 71

ภาพประกอบ 41 เมล็ดแมคคาเดเมียควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟและอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส 71

ภาพประกอบ 42 เมล็ดแมคคาเดเมียอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนที่ 60˚C 71

ภาพประกอบ 43 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 1.57 Wg^{-1} 72

ภาพประกอบ 44 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 2.56 Wg^{-1} 73

ภาพประกอบ 45 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 3.55 Wg^{-1} 73

ภาพประกอบ 46 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 4.39 Wg^{-1} 74

บทที่ 1
บทนำ

ภูมิหลัง

แมคคาเดเมีย *(Macadamia integrifolia)* เป็นที่รู้จักทั่วไปว่าพืชเคี้ยวมัน ชื่อสามัญคือ แมคคาเดเมีย มีลักษณะเป็นผลกะลาผิวเรียบ มีเปลือกหุ้มผล (husk) แข็งและหนามีสีเขียวถึงเขียวเข้มห่อหุ้มเมล็ดภายในประกอบด้วยเมล็ดทั้งกะลา (nut in shell) สีน้ำตาลห่อหุ้มเนื้อใน (kernel) สีขาวนวล เมื่อนำไปคั่วจะมีสีน้ำตาล แมคคาเดเมียมีประโยชน์และคุณค่าทางอาหาร คือ เนื้อในแมคคาเดเมียประกอบด้วยปริมาณไขมันอยู่สูงถึงร้อยละ 76 แต่ไขมันที่พบส่วนใหญ่ คือ กรดโอเลอิกซึ่งเป็นไขมันประเภทไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว ซึ่งไขมันประเภทนี้ช่วยลดระดับปริมาณคลอเรสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในกระแสเลือดทำให้ไม่เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด (Grag et al., 2003: Correa 2014) นอกจากนี้แมคคาเดเมียยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยโปรตีนคาร์โบไฮเดรต แคลเซียม โปรแตสเซียม ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีคุณประโยชน์ต่อร่างกายช่วยบำรุงสุขภาพให้แข็งแรงสมบูรณ์ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2543) จากคุณประโยชน์ทางด้านโภชนาการของแมคคาเดเมียทำให้ได้รับความสนใจ และนิยมรับประทานเพื่อรักษาสุขภาพมากขึ้น

สำหรับในประเทศไทยมีพื้นที่เพาะปลูกแมคคาเดเมีย ทั้งหมดประมาณ 5,000-6,000 ไร่ มีผลผลิตทั้งประเทศประมาณ 23,625 กิโลกรัม (กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550) แมคคาเดเมียปลูกง่ายและปรับตัวได้ดีหากปลูกในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำและมีช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิกว้าง ดังนั้นส่วนใหญ่พื้นที่เพาะปลูกแมคคาเดเมียจึงอยู่ในพื้นที่ ที่มีอากาศหนาวเย็น เช่น ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน โดยเฉพาะจังหวัดเลย มีประชากรนิยมปลูกมากในอำเภอนาแห้ว และอำเภอภูเรือ ส่วนการแปรรูปของแมคคาเดเมียเพื่อจำหน่ายนั้น ส่วนใหญ่เกษตรกรจะจำหน่ายเมล็ดอบแห้งทั้งในส่วนที่เป็นผลเต็มและส่วนที่เป็นเนื้อใน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วผู้บริโภคจะนิยมผลผลิตที่เป็นเมล็ดเนื้อในอบแห้งมากกว่าเนื่องจากสะดวกในการรับประทาน

การอบแห้งเมล็ดทั้งกะลานั้นเริ่มจากนำเมล็ดแมคคาเดเมียจากการเก็บเกี่ยวที่ร่วงลงพื้นจากต้นในสวนแล้วนำเปลือกเขียวออกจากเมล็ดทั้งกะลา ซึ่งมีความชื้นในเมล็ดทั้งกะลาประมาณร้อยละ 30 ฐานแห้ง นำมาอบแห้งให้เหลือ 3.5 ฐานแห้ง (เมล็ดทั้งกะลา) ซึ่งเหมาะสำหรับการเก็บรักษา (Mason and Wills, 2000) การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ในขั้นตอนที่สอง ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 7 วัน และขั้นตอนสุดท้าย ใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน (Australian Macadamia Society, 2008) รวมเวลาในการอบแห้งทั้งหมด 17 วัน จากปัญหาดังกล่าวพบว่า ใช้เวลานาน และประกอบกับเมล็ดแมคคาเดเมียมีเปลือกห่อหุ้มที่แข็งมาก จากเปลือกแข็งดังกล่าวเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าไปภายในเมล็ด เมื่อมีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสูง (Wang et al., 2013) นอกจากนี้ความร้อนสูงที่สะสมในเปลือกแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียจะส่งผลเสียต่อคุณภาพของเมล็ด (Tohi et al., 2002; Jongjaipak et al., 2014).

มีรายงานการปรับปรุงเทคนิคการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า (Jongjaipak et al., 2014) การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นความถี่วิทยุ (Wang et al., 2013a, 2013b) การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน (Borompichaichartkul et al., 2009) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน (Silva et al., 2006) และการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (Pankaew et al., 2016) นอกจากนี้ Pankaew et al. (2016) ได้รายงานว่าอุณหภูมิการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียที่ 50-60 องศาเซลเซียส ส่งผลดีต่อคุณภาพเมล็ดแมคคาเดเมีย ทางด้าน สี ค่าน้ำอิสระ ค่าความแข็ง กรดไขมันอิสระ และค่าเปอร์ออกไซด์

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นการเพิ่มศักยภาพการอบแห้งที่ดี เนื่องจากการระเหยความชื้นเริ่มจากภายในก่อนและจากนั้นก็จะเคลื่อนที่ไปที่ชั้นผิวของวัสดุอย่างรวดเร็ว ในทางกลับกันการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนจะระเหยความชื้นในชั้นผิวก่อน (Prabhanjan et al.,1995; Datta and Anantheswaran, 2001; Mao et al., 2003; Hebbar et al., 2003; Zhang et al., 2006; Tsubokural et al., 2009) ดังนั้นการอบแห้งด้วยไมโครเวฟด้วยร่วมกับอากาศร้อน จะเป็นการลดเวลาการอบแห้งและการใช้พลังงาน เนื่องจากการอบแห้งดังกล่าวจะเร่งการระเหยความชื้นภายในเปลือกแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมีย นอกจากนี้มีรายงานการควบคุมอุณหภูมิผิววัสดุในการอบแห้งพบว่าส่งผลดีต่อคุณภาพด้านสี การสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และใช้เวลาในการอบแห้งสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบทั่วไป เช่น การอบแห้งแอปเปิล (Sturm et al., 2014) และการอบแห้งก้านใบผักกาดหอม (Roknul et al., 2014) เป็นต้น อย่างก็ตามยังไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิว

การควบคุมการใช้กำลังไมโครเวฟในการอบแห้งเมล็ดแมคคาเมีย แอปเปิล และพริกแดง ด้วย การควบคุมการเปิด-ปิด แมกนีตรอน และควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งอยู่ในช่วง 55-75 องศาเซลเซียส (Cuccurullo et al., 2012) และพบว่าระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความผันผวนของอุณหภูมิมากขึ้นตามเวลา ทำให้นำไปสู่ผลด้านลบต่อคุณภาพผลไม้อบแห้ง (Li et al., 2010).

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน เพื่อศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟช่วยในการอบแห้ง โดยมีการควบคุมอุณหภูมิผิวที่เมล็ดและไม่ควบคุมอุณหภูมิผิว ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพสี ความแข็ง ค่าน้ำอิสระ ค่าเปอร์ออกไซด์ และประสิทธิภาพของการอบแห้ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของการควบคุมกำลังไมโครเวฟต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมีย คุณภาพ การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้ง ด้วยเครื่องไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

สมมุติฐานของการวิจัย

การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนภายใต้สภาวะที่ต่างกันด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่ควบคุมอุณหภูมิผิว มีผลทำให้สมบัติด้านต่าง ๆ ของเมล็ดแมคคาเดเมียแตกต่างกัน

ขอบเขตการวิจัย

1. เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ ยี่ห้อ Samsung รุ่น ME81Y กำลัง 850 วัตต์ ห้องอบแห้งขนาด 23 ลิตร
2. แมคคาเดเมีย สายพันธุ์ เชียงใหม่ 400 อบแห้งเมล็ดทั้งกะลา
3. ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 13 ฐานแห้ง
4. ความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง
5. ความเร็วของอากาศร้อน เท่ากับ 1.0 m/s
6. ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา
   6.1 กำลังไมโครเวฟ คือ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม
   6.2 อุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส
   6.3 การควบคุมอุณหภูมิผิว โดยใช้กำลังวัตต์สูงสุด 850 วัตต์ ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส
   6.4 คุณภาพที่ศึกษาวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าสี ค่าน้ำอิสระ ค่าความแข็งและค่าเปอร์ออกไซด์
   6.5 ประสิทธิภาพของการอบแห้ง ข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำในเมล็ดแมคคาเดเมีย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิผิวของแมคคาเดเมียได้ในการอบแห้ง
2. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย ด้วยการอบแห้งที่มีควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว
3. เป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการอบแห้งแมคคาเดเมีย ให้สามารถควบคุมคุณภาพที่เหมาะสม ภายใต้การอบแห้งที่เร็วขึ้น

สถานที่ดำเนินงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทที่ 2
ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

ในการศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยพลังงานไมโครเวฟ แบบอบแห้ง ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับ แมคคาเดเมีย ทฤษฎีการอบแห้ง ปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

แมคคาเดเมีย

1. ข้อมูลทางพฤกษศาสตร์

แมคคาดาเมียจัดว่าเป็นราชาแห่งพืชเคี้ยวมัน (nut) มีชื่อสามัญว่า *Macadamia* เป็นพืชในวงศ์ Proteaceae มีชื่อสามัญทางวิทยาศาสตร์ว่า *Macadamia tetraphylla* มี 18 สายพันธุ์ทั่วโลก Brown (1984) แต่พบว่ามีเพียง 3 สายพันธุ์เท่านั้นที่รับประทานได้คือ Macadamia integrifolia Macadamia tetraphylla และ Macadamia prealta (Kermond and Baumgardt 1996) ในทางการค้า *M. integrifolia* และ M. tetraphylla เป็นสายพันธุ์ที่มีการบริโภคมากที่สุด M. integrifolia มีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐควีนสแลนด์ประเทศออสเตรเลียและ *M. tetraphylla* มีต้นกำเนิดอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐควีนสแลนด์และตะวันออกเฉียงเหนือของรัฐนิวเซาท์เวลส์ *M. integrifolia* มีลักษณะผลกะลาผิวเรียบเป็นพันธุ์หลักในการผลิตแมคคาดาเมียเพื่อเป็นการค้าเนื่องจากให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสูงให้ปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 80 และมีน้ำตาลต่ำเพียง 4% ซึ่งถ้าหากมีน้ำตาลสูงร้อยละ 6-8 เมื่อนำไปคั่วจะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลทำให้แมคคาดาเมียมีสีเข้มขึ้นซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในการผลิต (Hamilton et al., 1980) *M. tetraphylla* ซึ่งมีผลผิวขรุขระปลูกง่ายกว่าและสามารถปรับตัวได้ดีในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำหรือช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิกว้างแต่คุณภาพของเนื้อถั่วต่ำกว่า *M. integrifolia* (บัณฑิต จันทร์งาม และคณะ, 2536)

แมคคาดาเมียเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ทรงพุ่มแผ่กว้างสูงประมาณ 18 เมตร กว้างประมาณ 15 เมตร ลักษณะคล้ายปีระมิดดังแสดงในภาพประกอบที่ 1 ลำต้นสูงตั้งตรงไม่ผลัดใบเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 30 เซนติเมตร เปลือกของลำต้นมีลักษณะหยาบสีน้ำตาลเข้มใบมีลักษณะเหมือนหอกหัวกลับใบขณะยังอ่อนมีสีชมพูแต่เมื่อแก่มีสีเขียวเข้มขอบใบมีหนามเล็กน้อยขนาดใบยาว 10-30 เซนติเมตร กว้าง 2-4 เซนติเมตร ออกดอกเป็นช่อยาวๆติดผลเป็นช่อสีดอกจะมีตั้งแต่สีขาวจนถึงสีชมพูผลลักษณะเป็นทรงกลมดังแสดงในภาพประกอบ 2 มีเปลือกหุ้มผล (husk) แข็งและหนาสีเขียวถึงเขียวเข้มห่อหุ้มเมล็ดภายในประกอบด้วยกะลาแข็ง (shell) สีน้ำตาลห่อหุ้มเนื้อใน (kernel) สีขาวนวลดังแสดงในภาพประกอบที่ 3 แมคคาดาเมียต้องการอากาศค่อนข้างเย็นอุณหภูมิที่เจริญเติบโตได้ดีคือ 10-30 องศาเซลเซียส (Trochoulias et al., 1984) ปริมาณความชื้นฝนไม่ต่ำกว่า 1000 มิลลิเมตรต่อปี และกระจายดีตลอดปี Storey (1969) สภาพดินที่ปลูกต้องมีการระบายน้ำดีความเป็นกรดเป็นด่าง 5.5-6.0 Ito (1987)

ภาพประกอบ 1 ลักษณะต้นแมคคาดาเมีย

ภาพประกอบ 2 ลักษณะผลแมคคาดาเมีย
ที่มา: Starr (2012)

ภาพประกอบ 3 ส่วนประกอบผลแมคคาดาเมีย

2. คุณค่าทางโภชนาการ

แม้ว่าแมคคาดาเมียจะมีปริมาณไขมันอยู่สูงถึงร้อยละ 76 แต่ไขมันที่พบส่วนใหญ่คือกรดโอเลอิกซึ่งเป็นไขมันประเภทไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวโดยไขมันประเภทนี้ช่วยลดระดับปริมาณคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในกระแสเลือดทำให้ไม่เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด (Grag et al., 2003) ศึกษาชายที่มีปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือดสูงจำนวน 17 คน โดยให้รับประทานแมคคาดาเมียปริมาณ 40-90 กรัม/วัน พบว่าในกระแสเลือดของผู้ถูกศึกษามีระดับคอเลสเตอรอลทั้งหมดและคอเลสเตอรอล

ชนิดแอลดีแอล (LDL-Cholesterol) ลดลงร้อยละ 3.0 และ 5.3 ตามลำดับ และระดับคอเลสเตอรอลชนิดเอชดีแอล (HDL-Cholesterol) เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.9 จึงอาจช่วยป้องกันไม่ให้เกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือดสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Salmolin and Grosvenor 2000) ศึกษากลุ่มประชากรในแถบทะเลเมดิเตอเรเนียนซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมบริโภคอาหารที่มีไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวสูงโดยการบริโภคน้ำมันมะกอกเป็นประจำพบว่ามีอัตราการตายด้วยโรคหัวใจเพียงครึ่งหนึ่งของประชากรในอเมริกาการบริโภคไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวในปริมาณเท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 40 ของพลังงานทั้งหมดจะช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอลและไม่มีผลต่อปริมาณคอเลสเตอรอลชนิดเอชดีแอลนอกจากนี้ยังทำให้คอเลสเตอรอลชนิดแอลดีแอลถูกออกซิไดส์น้อยลงอีกด้วย และนอกจากแมคคาดาเมียมีไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยวที่ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในกระแสเลือดแล้วยังเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงแมคคาดาเมีย 100 กรัม จะให้พลังงาน 718 กิโลแคลอรี ไขมันทั้งหมด 75.77 กรัม ประกอบด้วยไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว 58.88 กรัม ไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน 1.50 กรัม และไขมันอิ่มตัว 12.06 กรัม โปรตีน 7.91 กรัม คาร์โบไฮเดรต 13.82 กรัม และไม่มีคอเลสเตอรอล แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 สารประกอบของเมล็ดแคคาเดเมียดิบ

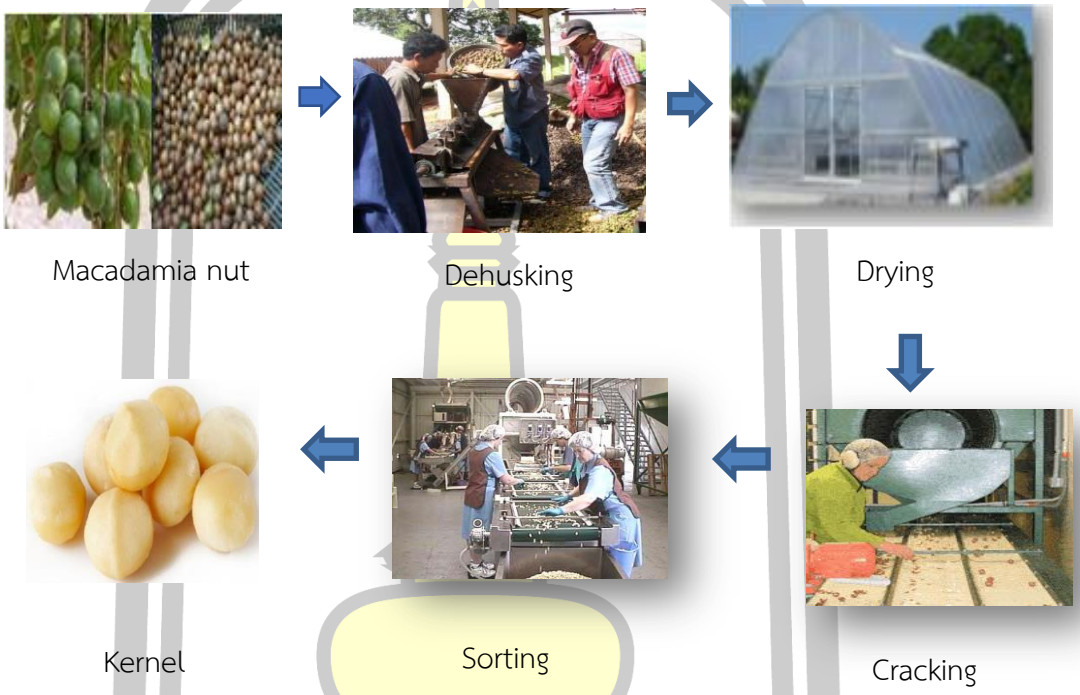
Content per 100g	AMS	USDA	NZMS	SAMAC
Protein	9.2	7.79	-	9.40
Fat (total oil)	74.0	76.8	93.4	75
- Monounsaturated	60.0	59.3	84.6	84
- Polyunsaturated	4.0	4.0	1.2	3.5
- Saturated	10.0	11.9	14.2	12.5
Ash	1.3	1.3	-	1.60
Carbohydrate (total)	7.9	12.8	-	-
- Sugar	4.6	4.14	-	4.80
Dietary Fibre	6.4	8.0	-	7.70

ที่มา: AMS (2009)

3. กระบวนการแปรรูปเมล็ดแมคคาดาเมีย

เมล็ดแมคคาเดเมียที่จะส่งเข้าโรงงาน สำหรับเข้าสู่กระบวนการแปรรูป แล้วส่งออกตลาดให้กับผู้บริโภค ซึ่งเมล็ดแมคคาเดเมียที่ถูกนำไปขาย จะเป็นกระบวนการสุดท้ายของการแปรรูป แต่มีปัญหาอยู่ว่าจะต้องเก็บรักษาไว้ในโรงงานที่มีคุณภาพ จะเห็นได้ชัดเจนว่า วิธีการเก็บรักษาที่แตกต่างกันจะเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ของเมล็ดแคคาเดเมีย ดังนั้น การจัดการเมล็ดของแมคคาเดเมียทั้งหมดที่ดี จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการขยายพันธุ์ การเจริญเติบโต กระบวนการแปรรูป และที่สำคัญส่งผลต่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แมคคาเดเมียที่มีคุณภาพสูง อย่างไรก็ตามการเก็บผลผลิตที่มีคุณภาพก็จะเป็นการควบคุมคุณภาพที่ดีและยังป้องกันผลกระทบต่างๆที่จะได้รับจากโรงงานด้วย และขั้นตอนสุดท้ายการบรรจุส่งขายให้กับผู้บริโภคต่อไป

การผลิตแมคคาดาเมียประกอบด้วยหลายขั้นตอนเมื่อแมคคาดาเมียหล่นจากต้นจะเก็บด้วยมือหรือเครื่องจักรแล้วนำเปลือกนอกสีเขียวออก (dehusking) ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (drying) เพื่อให้ความชื้นอยู่ที่ระดับร้อยละ 1.5-2 ฐานแห้ง ทำการกะเทาะกะลาแมคคาดาเมียด้วยเครื่องจักร (cracking) แล้วนำไปคัดแยกขนาดเมล็ดด้วยมือหรือเครื่องจักร (sorting) ได้เนื้อในแมคคาดาเมียก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการคั่วต่อไปดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 กระบวนการผลิตแมคคาดาเมีย

3.1 การเก็บเกี่ยวเมื่อผลแมคคาดาเมียสุกเต็มที่จะหล่นจากต้นลงสู่พื้นจึงเริ่มกระบวนการเก็บอาจใช้เครื่องจักรหรือคนเก็บด้วยมือ (กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2550)

3.2 การนำเอาเปลือกนอกสีเขียวออกการเก็บเกี่ยวเมล็ดที่มีความชื้นสูงมีความจำเป็นมากในการลดความชื้นเพื่อลดการเสื่อมเสียเมื่อเก็บผลแมคคาดาเมียแล้วขั้นตอนถัดไปคือการนำเอาเปลือกนอกสีเขียวออกโดยขั้นตอนนี้ควรทำภายใน 24 ชั่วโมง เพราะเปลือกมีความชื้นได้ถึงร้อยละ 45 ฐานแห้ง และเมล็ดมีความชื้นได้ร้อยละ 25 ฐานแห้ง (Chu et al., 1953; Kowitz et al., 1998) หากเว้นช่วงเวลาในการเก็บแมคคาดาเมียที่หล่นอยู่บนพื้นนานโดยไม่รีบเอาเปลือกออกและนำไปอบแห้งทันทีจะทำให้เมล็ดงอกเกิดเชื้อราหรือกลิ่นหืนได้ (Moltzau and Ripperton 1939)

3.3 กระบวนการอบแห้งหลังจากนำเปลือกนอกสีเขียวออกแล้วนำเมล็ดที่อยู่ในกะลาซึ่งอาจมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 25 ฐานแห้ง มาลดความชื้นให้เหลือประมาณร้อยละ 1.5-2 ฐานแห้ง ซึ่งเป็นความชื้นที่ปลอดภัยในการเก็บรักษาการอบแห้งแมคคาดาเมียสามารถกระทำได้หลายวิธีและขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากไม่ทำการอบแห้งกลิ่นและรสชาติแมคคาดาเมียเสียไปเมล็ดเกิดการเสื่อมเสียโดยกะลาจะแข็งขึ้นทำให้เนื้อในหดตัว Weinert (1993) นอกจากนี้การอบแห้งทำให้

เนื้อในไม่ติดกับกะลาทำให้ง่ายต่อการกะเทาะเปลือกการอบแห้งแมคคาดาเมียหากใช้อุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดการอบแห้งที่มากเกินไปเกิดกลิ่นหืนและเกิดสีน้ำตาลตรงกลางเมล็ด Kowitz (2004)

การอบแห้งแมคคาดาเมียความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 6-8 ฐานแห้ง ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 60 องศาเซลเซียส จะเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซิ่งตรงกลางเมล็ด Cavaletto (1981a) อาจเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเอนไซมาติกอินเวอร์ชัน (enzymatic inversion) เอนไซม์อินเวอร์เทสทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 40-45 องศาเซลเซียส นันทนา (2514)

3.4 การกะเทาะกะลาและการคัดแยกเมล็ดแมคคาดาเมียที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการกะเทาะกะลาในอุตสาหกรรมมีเครื่องมือเฉพาะสำหรับการกะเทาะกะลาดังแสดงในภาพประกอบ 4 หลังจากกะเทาะเนื้อในถูกนำมาคัดแยกขนาดนิยมทำโดยใช้เครื่องเขย่าอาจใช้ลมเป่าเพิ่มได้ซึ่งลักษณะเมล็ดที่ได้มีเต็มเมล็ดครึ่งเมล็ดเมล็ดแตกหักหรือเศษเป็นชิ้นเล็กๆ Levering (1971) สำหรับเมล็ดที่ขึ้นราหรือเกิดการเสียหายจากแมลงจะทำการคัดแยกด้วยมือดังแสดงในภาพประกอบ 5 Anon (1982) ก่อนเข้าสู่กระบวนการถัดไปเนื้อในแมคคาดาเมียแบ่งได้ 8 ลักษณะแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ลักษณะแมคคาดาเมียที่ใช้ในทางการค้า

Style	Style Name	ลักษณะ	ความกว้างเมล็ด
0	Super Premium Wholes	ขนาดไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของเมล็ดเต็ม	ตั้งแต่ 21 มิลลิเมตรขึ้นไป
1	Premium Wholes	ขนาดร้อยละ 95 ของเมล็ดเต็ม	19-21 มิลลิเมตร
2	Premium Wholes and Halves	ผสมกัน 50/50 ของเมล็ดเต็มและชิ้นใหญ่	15-19 มิลลิเมตร
3	Premium Mix	อย่างน้อยร้อยละ 15 ของน้ำหนักประกอบด้วยเมล็ดเต็มและเกือบทั้งหมดของน้ำหนักเป็นครึ่งเมล็ดและชิ้นใหญ่	ความกว้างเฉลี่ย 15 มิลลิเมตรขึ้นไป
4	Halves	อย่างน้อยร้อยละ 80 ของน้ำหนักประกอบด้วยครึ่งเมล็ดและชิ้นใหญ่	12-14 มิลลิเมตร
5	Premium Large Chips	ชิ้นใหญ่	9-12 มิลลิเมตร
6	Premium Chips	ชิ้นเล็ก	6-9 มิลลิเมตร
7	Premium Small Chips	ชิ้นเล็ก	5-6 มิลลิเมตร
8	Premium Fine Grains	ชิ้นเล็ก	3-5 มิลลิเมตร

ที่มา : International Macadamias Ltd (2007)

ภาพประกอบ 5 เครื่องกะเทาะกะลาแมคคาดาเมีย
ที่มา: Ennovation Ltd (2006)

ภาพประกอบ 6 การคัดแยกขนาดเมล็ดด้วยมือ
ที่มา: Nambuccamacnutspty Ltd (2007)

3.5 การอบหรือการคั่ว

แมคคาดาเมียก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการคั่วควรมีความชื้นประมาณร้อยละ 1.5 ฐานแห้ง หรือน้อยกว่าเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี (Moltzau and Ripperton 1939) เมล็ดที่มีความชื้นสูงระหว่างการคั่วจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่มไม่กรอบและเกิดสีน้ำตาลอย่างรวดเร็ว Cavaletto, (1980) หากต้องการได้ผลิตภัณฑ์หลังการคั่วความชื้นประมาณร้อยละ 1 ฐานแห้ง จะนิยมนำมาทอดกับน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส 12-15 นาทีหรืออบที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส 40-50 นาที Gold Crown Macadamia Association (2004)

4. การเกิดลิพิดออกซิเดชัน

ลิพิด หมายถึง สารประกอบอินทรีย์ที่มีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดโพลาร์ (apolar) เช่น อีเทอร์ คลอโรฟอร์ม เบนซิน เป็นต้น เมื่อจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม ได้แก่ simple lipids เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์

ชนิดต่าง ๆ compound lipids เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันแอลกอฮอล์ และมีสารอื่นรวมอยู่ด้วย และ derived lipids เป็นสารประกอบที่ได้จากการไฮโดรไลซิสของลิพิด 2 กลุ่ม ได้แก่ กรดไขมัน กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ วิตามินที่ละลายได้ในไขมัน เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดของลิพิดด้านสมบัติทางเคมีและค่าเปอร์ออกไซด์ ดังนี้

4.1 สมบัติทางเคมีของลิพิด ได้แก่ การหืน (rancidity) เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของไขมันและน้ำมัน ทำให้มีกลิ่นผิดปกติและสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพเปลี่ยนไป การหืนเกิดขึ้นได้ 3 แบบ ได้แก่ ลิโพไลซิส การหืนเนื่องจากออกซิเจน และ คีโตนิค สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอเฉพาะการหืนเนื่องจากออกซิเจนเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องโดยตรง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การหืนเนื่องจากออกซิเจน (oxidative rancidity) เป็นการหืนที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชั่น (autoxidation) ที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็น peroxide linkage ขึ้นระหว่างพันธะคู่ ออโตออกซิเดชั่นจะเกิดขึ้นเองแบบต่อเนื่องตลอดเวลาเมื่อไขมันและน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ การหืนด้วยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นในอากาศที่มีไขมันและน้ำมันผสมอยู่ด้วย โดยเฉพาะในไขมันและน้ำมันที่ปรุงอาหารจะเกิดขึ้นมากที่สุด

การเกิดการหืนโดยปฏิกิริยานี้ทำให้กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นกรดไขมันจำเป็นต่อร่างกายถูกทำลาย มีผลทำให้คุณค่าทางโภชนาการของไขมันและน้ำมันลดลงด้วย และยังทำลายพวกวิตามินต่าง ๆ ที่ละลายในไขมันและน้ำมันได้อีกด้วย นอกจากนี้ ไขมันและน้ำมันที่เกิดจากการหืนเนื่องจากออกซิเจนจะมากหรือน้อย สามารถตรวจสอบได้จากค่าไอโอดีนที่ลดต่ำลง และค่าเปอร์ออกไซด์

4.2 ค่าเปอร์ออกไซด์ (peroxide value, P.V.) หมายถึง จำนวนมิลลิตรของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟส ความเข้มข้น 0.002 นอร์มัล ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำมันหรือไขมัน 1 กรัม หรือหมายถึง จำนวนมิลลิสมมูลของเปอร์ออกไซด์ออกซิเจน (peroxide oxygen) ที่มีในน้ำมันหรือไขมัน 1 กิโลกรัม ถ้าค่า P.V. สูง แสดงว่าน้ำมันหรือไขมันเกิดการหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมากและค่าไอโอดินก็จะต่ำกว่าคาที่เป็นจริง (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2553)

Fourie and Basson (1989) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ในเมล็ดแมคคาดาเมียซึ่งสามารถใช้แทนการทดสอบประสาททางสัมผัสโดยผู้ทดสอบที่ผ่านการทดสอบ ดังนั้นระดับกลิ่นหืนของผลิตภัณฑ์จึงสามารถแสดงได้ด้วยค่าเปอร์ออกไซด์

Kaijser et al. (2000) ศึกษาองค์ประกอบไขมัน และ กลิ่นหืนในแมคคาดาเมียที่ปลูกในนิวซีแลนด์ 4 สายพันธุ์ พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์อยู่ระหว่าง 0.56-3.61 meq O_2/kg oil มีค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุด และกรดไขมันลิโนเลอิกสูงสุด แสดงว่าสายพันธุ์ และพื้นที่ในการปลูกแมคคาดาเมียมีผลต่อกลิ่นหืนของแมคคาดาเมีย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (Thai Industrial Standards Institute, TISI) แมคคาเดเมียอบแห้ง ฉบับที่ 1145 (พ.ศ.2549) กำหนดให้ค่าเปอร์ออกไซด์แมคคาดาเมียหลังการคั่วหรือทอด มีค่าไม่เกิน 30 meq O_2/kg oil ดังนั้นแมคคาดาเมียที่มีค่าเปอร์ออกไซด์มากกว่าค่าดังกล่าวจะไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

5. มาตรฐานคุณภาพสำหรับเมล็ดแมคคาเดเมีย

เพื่อให้สอดคล้องผลิตภัณฑ์กลุ่มแมคคาเดเมีย ในออสเตรเลียได้มีการกำหนดมาตรฐานรวมทั้งลักษณะของเมล็ดน้ำมันแมคคาเดเมียและลักษณะบรรจุภัณฑ์ ซึ่งมาตรฐานเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อการส่งออก (ตาราง 3) ซึ่งแสดงมาตรฐานการส่งออกของแมคคาเดเมียต่างๆ ที่สามารถตกลงกันระหว่างผู้นำเข้าและผู้ส่งออกเพื่อหลีกเลี่ยงข้อโต้แย้ง (Augstburger et al., 2000)

ตาราง 3 มาตรฐานคุณภาพของแมคคาเดเมียกำหนดโดยประเทศออสเตรเลีย

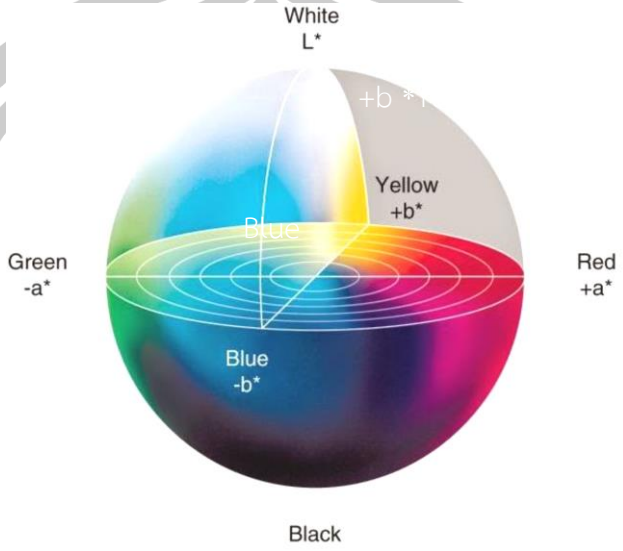
การแปรรูป	มาตรฐานการส่งออก
เมล็ดแมคคาเดเมียดิบ(raw kernel)	
- Moisture content	1.5%±0.2%
- Peroxide value	< 3 meq O_2/kg
- Free fatty acid	max 0.5
- Aflatoxin total	Max 4 ppb or as per importing countries food standards
- Yeast	Less than 20,000 cfu/g (not a food safety issue)
- Reject defects (insect damage, discoloration, shriveled)	Max 1%
- Insect damage	-
- Mould	Nil visible mould
- Colour	Uniform light cream
- Kernel appearance	Free from surface oil
- Flavour & odour	No off flavours or odours
เมล็ดแมคคาเดเมียคั่ว (roasted kernel)	
- Moisture content	Max 1.5%±0.2%
- Total plate count	Less than 30,000 cfu/g
- E. coli	Less than 3/g
- Minor roasting defects	Less than 5%
- Dark kernel	Nil

ที่มา : AMS (2012)

6. สีที่ปรากฏ

สีที่คนเรามองเห็นนั้นเป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากปัจจัย 3 อย่างด้วยกันคือ

6.1 ค่า hue angle หมายถึง คลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้แล้วเรียกกันว่าเป็นสีอะไร เช่น เขียว เหลือง น้ำเงิน แดง ซึ่งมีวิธีการวัดค่า H° คือ Hue angle ที่เป็นค่าแสดงถึง สีแท้จริงที่ปรากฏให้เห็น ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0-360 องศา Hue angle แต่ละช่วงองศา แสดงสีแตกต่างกันดังนี้



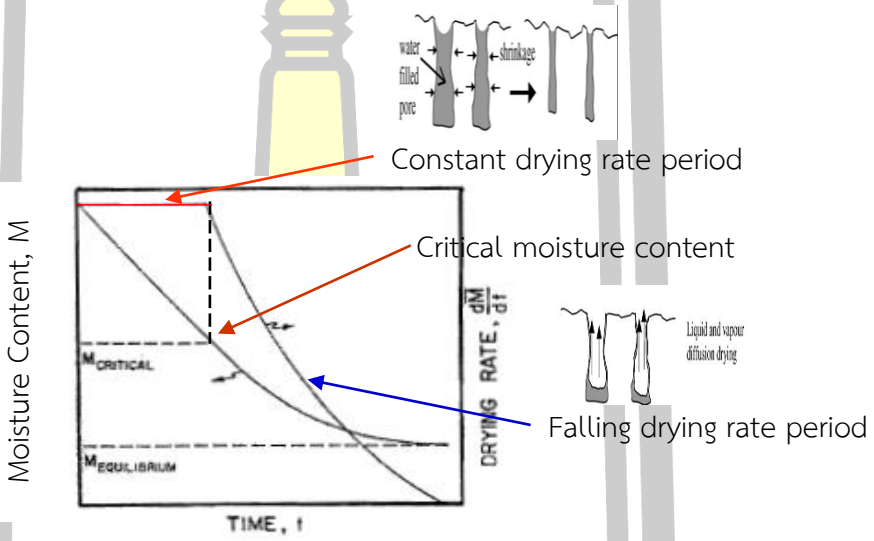
ภาพประกอบ 7 เป็นค่า L*, Chroma และ Hue angle
ที่มา: McGuire (1992)

6.2 ค่า chroma หรือ saturation หมายถึง ความเข้มของสีนั้นๆ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ความเข้มของสีพื้นฐาน ซึ่งอาจจะมีแสงสีขาว (white light) ผสมอยู่มากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งมีวิธีการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Chroma Meter CR 300 Series, Minolta, Japan) โดยค่า C* คือ Chroma เป็นค่าแสดงถึงความเข้มของสีเช่น ค่า C* มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง วัตถุมีความเข้มสีต่ำลงจนเป็นสีเทาและค่า C* มีค่าเพิ่มขึ้น หมายถึง วัตถุมีความเข้มสีเพิ่มมากขึ้น

6.3 Lightness หมายถึง การสะท้อนของสีหรือคือความสดใสของสีนั้นๆ ซึ่งมีค่า L* หรือ Lightness เป็นค่าความสว่าง มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 เช่น ค่า L* มีค่าใกล้ศูนย์ หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างน้อยจนเป็นสีคล้ำและค่า L* เข้าใกล้ 100 หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างมากจนเป็นสีขาว และสีถือว่าเป็นสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ที่มีผลทางจิตวิทยาต่อผู้บริโภค โดยจะส่งผลต่อความสุขหรือความพึงพอใจเมื่อได้บริโภคสีของผลิตภัณฑ์ อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างการอบแห้งซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหากการอบแห้งเป็นไปอย่างไม่เหมาะสม เช่น ใช้อุณหภูมิสูงเกินไปผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งอาจมีสีไม่ยอมรับของผู้บริโภค โดยทั่วไปการอบแห้งที่ดีควรรักษาให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งมีลักษณะใกล้เคียงกับสีของผลิตภัณฑ์ ก่อนการอบแห้งให้มากที่สุด การอบแห้งด้วยวิธีการต่างกันจะส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันด้วย นอกจากวิธีการอบแห้งแล้วเงื่อนไขที่ใช้ในการอบแห้ง เช่นอุณหภูมิ ความดัน ระดับความเข้มของรังสี หรือความหนาของผลิตภัณฑ์ก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์เช่นกัน

ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลซึ่งเกิดขึ้นพร้อมๆกันโดยมักจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ในการระเหยน้ำ วัสดุการเกษตรส่วนใหญ่มักมีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นรูพรุนเมื่อถูกทำให้แห้งภายใต้สภาวะอากาศที่คงที่ (อุณหภูมิความชื้นและความเร็วของอากาศมีค่าคงที่) อัตราการอบแห้งจะคงที่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นจะลดลงและความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่าความชื้นวิกฤต ค่าความชื้นวิกฤตจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุสภาวะของวัสดุสภาวะของอากาศและความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งสำหรับวัสดุที่มีความชื้นเริ่มต้นไม่สูงนัก การอบแห้งส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้นดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และลดลง
ที่มา : Brooker et al., (1992) และ Kiennemanna et al., (2005)

1. ความสำคัญของการอบแห้ง

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยโดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ประโยชน์ของการอบแห้งพอสรุปได้ดังนี้

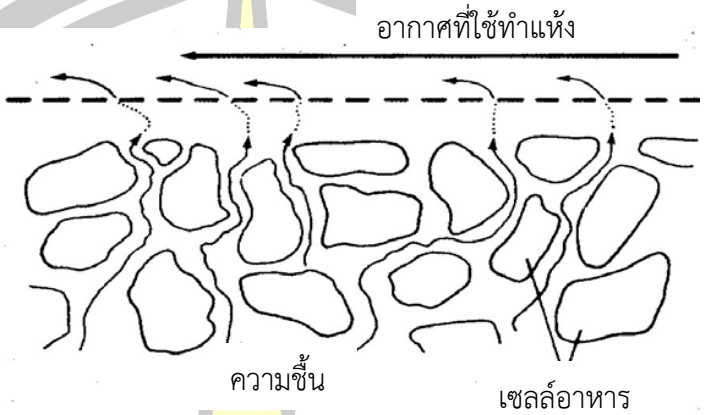
1.1 เพื่อการถนอมรักษาวัสดุวัสดุที่แห้งแล้วสามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีมีน้อย

1.2 เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนักวัสดุที่แห้งแล้วจะมีปริมาตรและน้ำหนักลดลงทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและการขนส่ง

1.3 เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตดีขึ้นในกรณีนี้อาจจะไม่จริงเสมอไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตนั้น

2. กลไกการอบแห้ง

เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าวัสดุที่เปียกความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของวัสดุและน้ำในวัสดุจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการทำแห้ง
ที่มา : ดัดแปลงจาก Fellows (1988)

จากภาพประกอบ 9 ส่งผลทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของวัสดุต่ำกว่าความดันไอด้านในของวัสดุเป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอขึ้นวัสดุชั้นด้านในจะมีความดันไอสูงกว่าจะค่อยๆ ลดต่ำลง เมื่อชั้นวัสดุเข้าใกล้อากาศแห้งความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อขับไล่น้ำออกจากวัสดุน้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วยกลไก ดังต่อไปนี้

2.1 การเคลื่อนที่ของของเหลวโดยแรงคาปิลารี

2.2 การแพร่ของของเหลวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของตัวละลายในวัสดุส่วนต่าง ๆ

2.3 การแพร่ของของเหลวซึ่งถูกดูดซับโดยผิวหน้าของของแข็งในวัสดุ

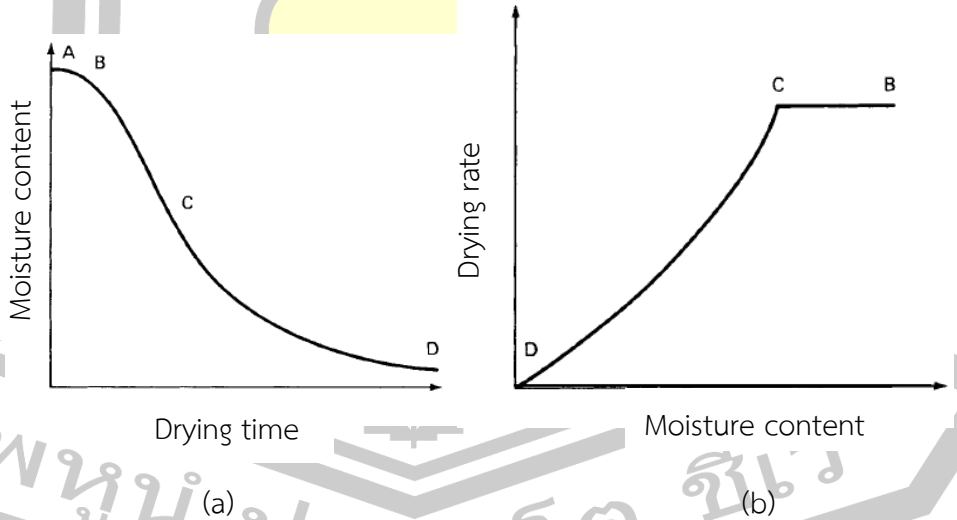
2.4 ความแตกต่างของความดันไอทำให้เกิดการแพร่ของไอน้ำในช่องอากาศของวัสดุ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540)

เมื่อนำวัสดุมาใส่เครื่องทำแห้งช่วงเวลาสั้นๆ ตอนเริ่มการอบแห้งจะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำให้ผิวหน้าของวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียกซึ่งเป็นช่วง AB หลังจากนั้นจะเป็นช่วงเวลาของการทำแห้งโดยน้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของวัสดุออกมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้าผิวหน้าจึงยังเปียกอยู่เรียกช่วงนี้ว่าเป็นช่วงอัตราเร็วคงที่ (constant rate period) และช่วงต่อเนื่องจนถึงความชื้นวิกฤติ (critical moisture content, AB ในภาพประกอบ 10 (a) แต่ในทางปฏิบัติผิวหน้าของวัสดุจะค่อยๆแห้งด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันและอัตราการทำแห้งโดยรวมจะค่อยๆลดลงในช่วงของอัตราเร็วคงที่จุดความชื้นวิกฤติของวัสดุแต่ละชนิดจึงไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

ปริมาณของวัสดุในเครื่องทำแห้งและอัตราการทำแห้งลักษณะที่สำคัญของอากาศแห้งในช่วงอัตราเร็วคงที่ได้แก่ต้องมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งสูงมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

ฟิล์มอากาศที่เคลื่อนที่รอบวัสดุจะกีดขวางการถ่ายเทความร้อนและไอน้ำระหว่างการทำแห้งความเร็วของอากาศหรือลมจะเป็นตัวกำหนดความหนาของฟิล์มถ้าความเร็วต่ำเกินไปไอน้ำจะเคลื่อนที่จากผิวหน้าของวัสดุและยังคงอยู่รอบๆทำให้มีความแตกต่างระหว่างความดันไอและอัตราการทำแห้งไม่สูงมากนักถ้าอุณหภูมิของอากาศแห้งต่ำหรือมีความชื้นสูงจะทำให้อัตราเร็วในการระเหยและการแห้งลดลง

เมื่อความชื้นของอากาศลดต่ำลงกว่าความชื้นวิกฤตอัตราการทำแห้งก็จะลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ที่ความชื้นสมดุล (ความชื้นในวัสดุสมดุลกับความชื้นของอากาศแห้ง) หรือที่เรียกว่าช่วงอัตราลดลง (falling-rate period) วัสดุแบบนอนไฮโกรสโคปิก (non-hygroscopic) จะมีช่วงอัตราลดลงเพียงช่วงเดียว CD ในภาพประกอบ 10 (a) และ (b) ในขณะที่วัสดุแบบไฮโกรสโครปิก (hygroscopic) จะมี 2 ช่วงโดยในช่วงแรกระนาบของการระเหยจะเคลื่อนที่เข้ามายังวัสดุโดยน้ำจะแพร่ผ่านวัสดุแข็งเข้าไปยังอากาศแห้งและหยุดลงเมื่อระนาบของการระเหยเคลื่อนที่เข้ามายังจุดศูนย์กลางของวัสดุและความดันย่อยของน้ำลดลงต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวช่วงที่ 2 จะเกิดเมื่อความดันย่อยของน้ำลดลงต่ำกว่าความดันไออิ่มตัวและเกิดการทำแห้งโดยการกำจัดความชื้นออกจากวัสดุ (desorption) ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงโดยอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวหน้าจะต่ำกว่าอัตราการระเหยน้ำไปยังอากาศโดยรอบผิวหน้าจึงแห้งช่วงนี้เป็นช่วงที่นานที่สุดของกระบวนการทำแห้งในวัสดุบางชนิด (Fellows, 1988) ดังภาพประกอบ 10



(a) (b)

ภาพประกอบ 10 กราฟการทำแห้งอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุแห้งจะคงที่และความร้อนทั้งหมดถูกถ่ายยังผิววัสดุด้วยการพาความร้อน

ที่มา : Fellows (1988)

3. สมบัติของอากาศชื้น

อากาศแวดล้อมประกอบด้วย อากาศแห้ง และไอน้ำ โดยอากาศแห้งจะหมายถึงโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่คือ ก๊าซไนโตรเจน และออกซิเจน สำหรับในงานอบแห้ง เราจะเรียกก๊าซ

ทั้งหมดนี้ว่า อากาศแห้ง (dry air) ซึ่งสามารถดูดกลืนไอน้ำแล้วกลายเป็นไอชื้น โดยปริมาณไอน้ำสูงสุดที่สามารถอยู่ในอากาศชื้นได้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศชื้น และปริมาณไอน้ำในอากาศชื้นนั้น อากาศที่ชื้นมีปริมาณไอน้ำสูงสุดจะอยู่ในสภาพที่อิ่มตัว ถ้าเพิ่มไอน้ำให้กับอากาศชื้นดังกล่าว ไอน้ำส่วนเกินจะควบแน่นกลายเป็นน้ำในสถานะของเหลว เราสามารถทำให้ไอน้ำอยู่ในสภาพอิ่มตัว โดยการลดอุณหภูมิหรือเพิ่มปริมาณไอน้ำในอากาศนั้น หรือทั้งสองอย่าง โดยทั่วไปสมบัติของอากาศชื้นสามารถบอกได้ด้วยตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

3.1 อัตราส่วนความชื้น หรือความชื้นสมบูรณ์ เป็นมวลของไอน้ำในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง

3.2 เอนธาลปี เป็นพลังงานความร้อนในอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง

3.3 ความดันไอน้ำ เนื่องจากอากาศชื้นประกอบด้วยไอน้ำและก๊าซต่างๆ องค์ประกอบแต่ละชนิดจะมีความดันย่อย กรณีของไอน้ำจะเรียกความดันย่อยนี้ว่า ความดันไอน้ำ กรณีของไอน้ำอิ่มตัว จะเรียกความดันนี้ว่า ความดันไอน้ำอิ่มตัว

3.4 ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นอัตราส่วนของความดันไอน้ำต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ความชื้นสัมพัทธ์จะเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดกลืนไอน้ำของอากาศชื้น ถ้าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 1 อากาศจะอยู่ในสภาพอิ่มตัว และถ้าได้รับไอน้ำเข้าไปเพิ่มเติมจะควบแน่นกลายเป็นน้ำ เราสามารถบอกความชื้นสัมพัทธ์ในรูปทศนิยมหรือในรูปเปอร์เซ็นต์ได้

3.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง เป็นอุณหภูมิของอากาศชื้น ซึ่งวัดได้ด้วยเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งหรือเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป

3.6 อุณหภูมิกระเปาะเปียก เป็นอุณหภูมิของอากาศชื้นที่วัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์กระเปาะเปียก

3.7 ปริมาตรจำเพาะ เป็นปริมาตรของอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง

3.8 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ถ้าลดอุณหภูมิของอากาศชื้นโดยไม่มีการเพิ่มหรือลดปริมาณไอน้ำในอากาศชื้น ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งไอน้ำในอากาศชื้นนั้นจะเริ่มควบแน่น เราเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

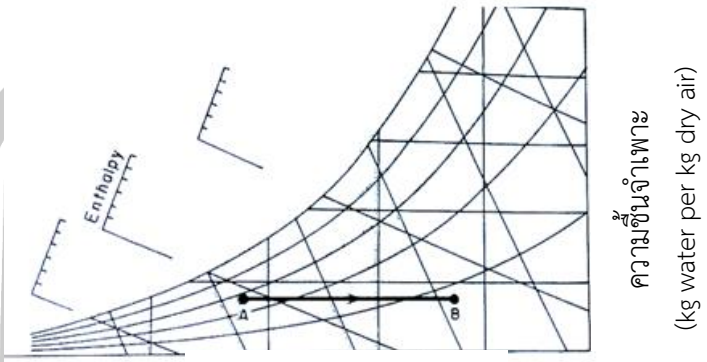
4. แผนภูมิไซโครเมตริกในกระบวนการอบแห้ง

ในการให้ความร้อนหรือการทำให้อากาศเย็น การผสมของอากาศ และการทำแห้งเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านชั้นของอาหาร จากกระบวนการดังกล่าวเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การให้ความร้อนหรือการทำให้อากาศเย็น (heating or cooling of air) การให้ความร้อนหรือการทำให้อากาศเย็น โดยไม่มีการเพิ่มหรือลดความชื้นในอากาศ ซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะ (specific humidity) มีค่าคงที่ ดังนั้น การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของอากาศจะลากเส้นในแผนภูมิไซโครเมตริกไปตามแนวนอน ดังภาพประกอบ 11 จะเป็นเส้นที่แสดงการให้ความร้อนหรือการทำให้อากาศเย็น มีข้อสังเกตว่าเมื่ออากาศได้รับความร้อน อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระบวนการจะเป็น A ไป B ในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นการทำให้เย็นกระบวนการจะเป็น B ไป A ในการคำนวณปริมาณความร้อนที่ใช้จาก A ไป B คำนวณ ดังนี้

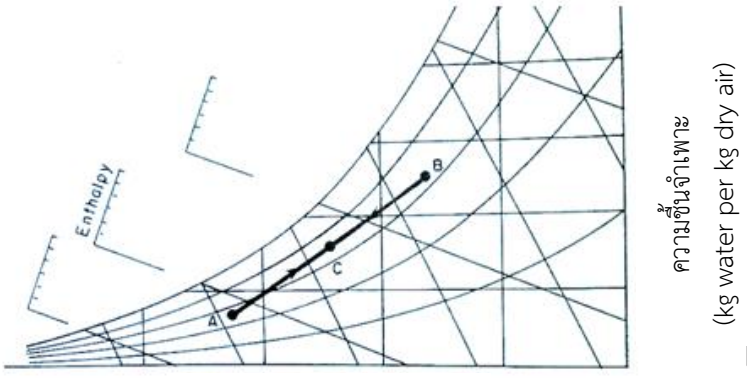
$$q = m(H_b - H_a) \quad (1)$$

โดยที่ H_a และ H_b คือ เป็นค่าเอนทัลปี (kJ/kg) เปิดได้จากแผนภูมิไซโครเมตริก

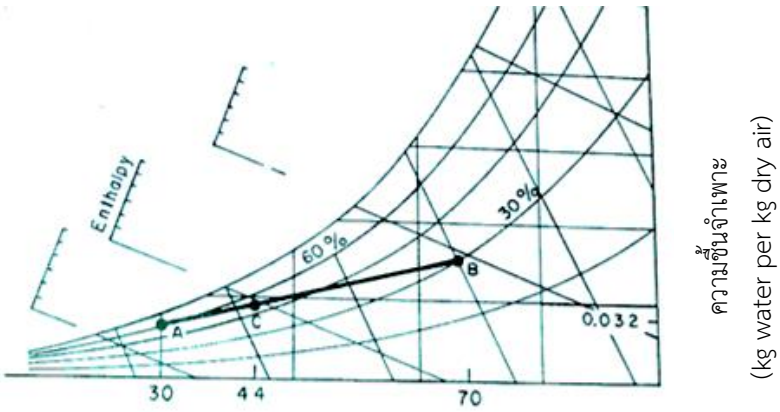


ภาพประกอบ 11 แผนภูมิไซโครเมตริกกระบวนการทำให้ร้อน
ที่มา : สิงหนาท พวงจันทน์แดง (2555)

4.2 การผสมของอากาศ (mixing of air) ในการผสมอากาศ 2 ชนิด เข้าด้วยกันสามารถใช้แผนภูมิไซโครเมตริกในการหาสมบัติของส่วนผสมได้ โดยขั้นตอนแรกให้พรอตสมบัติของอากาศทั้ง 2 ชนิด ลงบนแผนภูมิไซโครเมตริกดังภาพประกอบ 12 ที่จุด A และ B ลากเส้นตรงเชื่อมต่อจุดทั้งสอง ถ้าปริมาณอากาศทั้งสองชนิดที่ใช้ผสมเท่ากันให้แบ่งครึ่งบนเส้น AB ได้จุด C ที่จุด C จะบอกถึงสมบัติของอากาศผสมที่ได้ และในทางตรงกันข้ามการผสมของอากาศสองชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน จะแสดงในภาพประกอบ 13

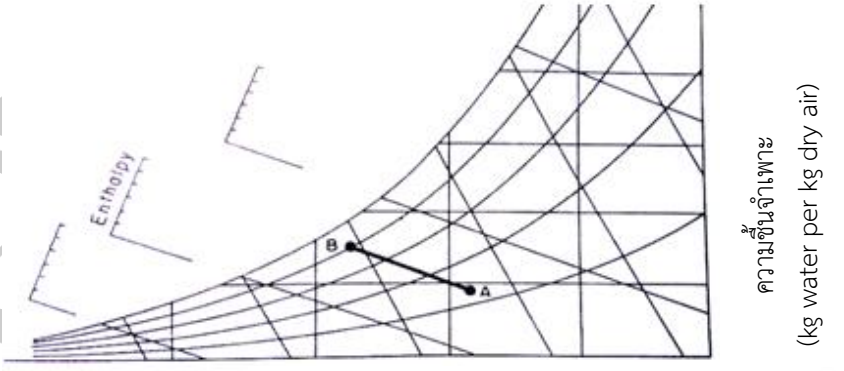


ภาพประกอบ 12 การผสมของอากาศสองชนิดในปริมาณเท่ากัน
ที่มา : สิงหนาท พวงจันทน์แดง (2555)

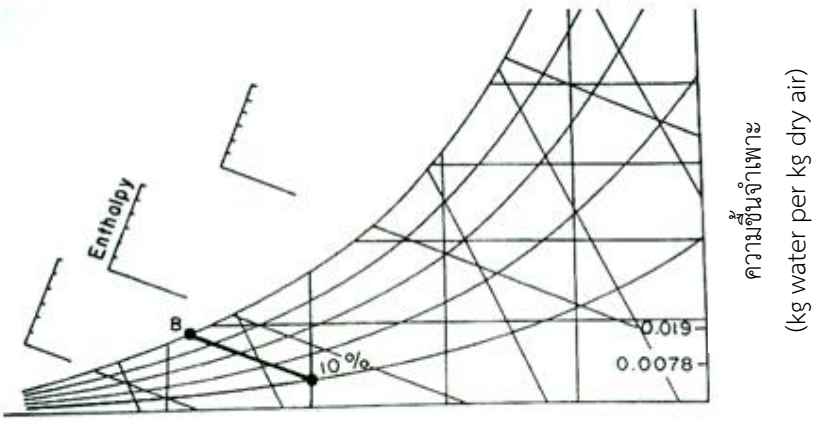


ภาพประกอบ 13 การผสมของอากาศสองชนิดในปริมาณที่แตกต่างกัน
ที่มา : สิงหนาท พวงจันทน์แดง (2555)

4.3 การทำแห้งเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านชั้นของอาหารที่มีความชื้นในการทำแห้งสามารถใช้แผนภูมิไซโครเมตริกได้โดยถือว่าเป็นประบวนการแอเดียแบติกอิ่มตัว (adiabatic saturation process) ดังภาพประกอบ 14 ซึ่งเป็นกระบวนการที่ค่าเอนทัลปีมีค่าคงที่ ความดันที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำออกจากอาหาร ได้จากอากาศร้อนถือว่าไม่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อน โดยการนำหรือการแผ่รังสีจากสภาพแวดล้อมในขณะที่อากาศไหลผ่านอาหาร ความร้อนสัมผัสในอากาศจะเปลี่ยนเป็นความร้อนแห้ง อากาศจะมีความร้อนเพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 15 จะแสดงกระบวนการแอเดียแบติกอิ่มตัว กล่าวคือในขณะที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกมีค่าคงที่ เมื่ออากาศได้รับความชื้นจากอาหารจำให้ความชื้นจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น (สิงหนาท พวงจันทน์แดง, 2555)



ภาพประกอบ 14 กระบวนการแอเดียแบติกอิ่มตัว จากจุด A ไป B
ที่มา : สิงหนาท พวงจันทน์แดง (2555)



อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

ภาพประกอบ 15 กระบวนการแอเดียแบติกอิ่มตัว
ที่มา : สิงหนาท พวงจันทน์แดง (2555)

ข้อเสียของการอบแห้งแบบอากาศร้อน คือ ความเสียหายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งที่เกิดจากการอบแห้งแบบลมร้อน คืออุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง การอบแห้งแบบลมร้อนใช้อุณหภูมิและระยะเวลาที่ยาวนานเป็นสาเหตุที่สำคัญที่ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงซึ่งได้แก่ สี กลิ่น คุณค่าทางอาหาร ความหนาแน่น และการคืนรูป (Lin et al., 1998) การแข็งตัวของเปลือกก็เป็นปัญหาพื้นฐานของการอบแห้งผักและผลไม้ซึ่งเกิดจากการอบแห้งอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดขึ้นเพราะในกระบวนการอบแห้งอัตราการระเหยของน้ำมีสูงกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์แห้ง (case hardening) (Yongsawatdigul and Gunasekaran 1996) ข้อเสียอื่น ๆ ของการอบแห้งแบบลมร้อนคือ ประสิทธิภาพในการใช้กำลังงานต่ำทำให้สิ้นเปลืองกำลังงาน ดังนั้นจึงมีการค้นคว้าหาวิธีการอบแห้งแบบอื่น ๆ เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งการอบแห้งแบบลมร้อนสามารถแก้ไขปัญหาของการอบแห้งแบบลมร้อนได้

หลักการพื้นฐานการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่คลื่นของไมโครเวฟ 0.3 - 300 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) หรือในช่วงความยาวคลื่น 30 เซนติเมตร ถึง 0.3 มิลลิเมตร มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนในทางอุตสาหกรรม การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจและไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนที่ผิวภายนอกของวัสดุ จึงกล่าวได้ว่าไมโครเวฟเป็นพลังงานทางเลือกใหม่สำหรับกระบวนการทางอุตสาหกรรมสมัยใหม่

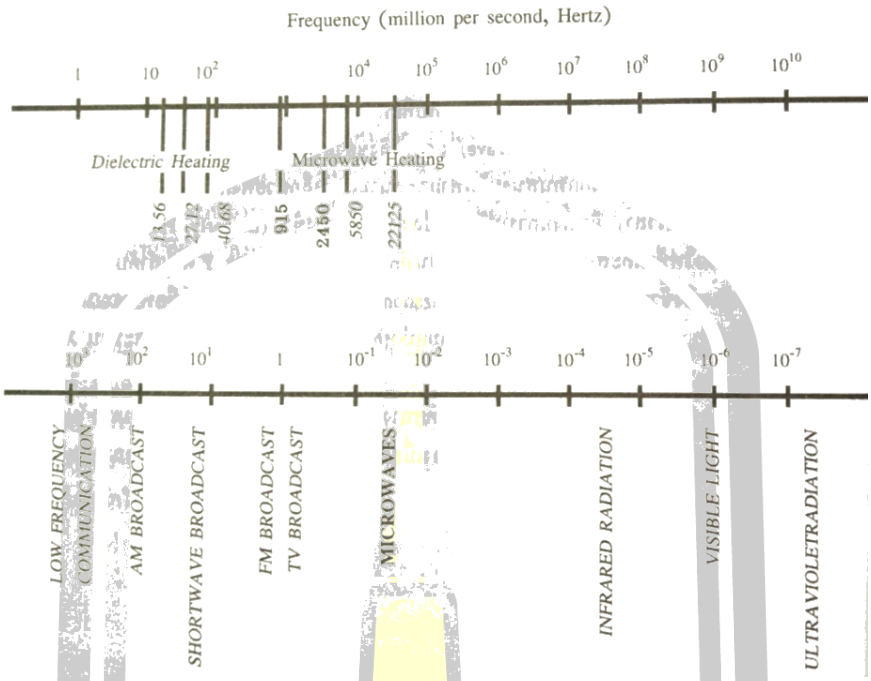
การทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยคุณสมบัติของการดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุหรือโหลด ซึ่งวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการทางวิศวกรรมที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า วัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric materials) วัสดุไดอิเล็กตริก หมายถึง วัสดุกึ่ง

ฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคที่มีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (dipoles) เช่นโมเลกุลของน้ำเป็นต้น ซึ่งอัตรกิริยา (interaction) ระหว่างขั้วที่มีขั้วทางไฟฟ้าและคลื่นไม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการสลับเฟสไปมาหลายครั้งในหนึ่งวินาที สงผลให้เกิดความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในขึ้น (internal heat generation) ในวัสดุ หรือยกตัวอย่างที่ชัดเจนทางปฏิบัติ เช่น กรณีการดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟโดยโดยโมเลกุลของน้ำที่มีอยู่ในอาหาร โมเลกุลเหล่านี้จะมีการสั่นและเคลื่อนไหวสลับไปมาหลายล้านครั้ง (ตามความถี่ไมโครเวฟที่ใช้) ทำให้เกิดการเสียดสีกันจนก่อให้เกิดความร้อนขึ้นมาในอาหาร

กระบวนการทำความร้อน (heating) และกระบวนการอบแห้ง (drying) มีความสำคัญมากในยุคอุตสาหกรรม การใช้พลังงานไมโครเวฟเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิตได้ โดยจะมีหลักการที่แตกต่างกันจากการให้ความร้อนโดยใช้วิธีธรรมดาทั่วไป (conventional method) ที่อาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนที่สำคัญ คือ การนำความร้อน และการพาความร้อน ซึ่งในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (microwave heating) หรือการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (microwave drying) ความร้อนที่ได้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic energy) เป็นพลังงานจลน์ของโมเลกุลภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดภายในวัสดุก่อนทำให้วัสดุแห้งมาจากภายในกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นกระบวนการที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว ปัจจุบันจึงมีความคิดที่จะประยุกต์ระบบไมโครเวฟเข้ากับกระบวนการอื่นๆ ในอุตสาหกรรม เพื่อทำให้กระบวนการผลิตดีขึ้น อย่างไรก็ตามที่ผ่านมากระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟยังไม่เป็นที่สนใจมากนัก เป็นเพราะเทคโนโลยีมีความซับซ้อนมีงานวิจัยที่รองรับยังไม่มากนักทั้งในการออกแบบและการควบคุมระบบที่มีลักษณะเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบการใช้ความร้อนแบบธรรมดาทั่วไป (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

1. การทำความร้อนด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้ความถี่ไดอิเล็กตริก คือ ตั้งแต่ 1 ถึง 100 เมกะเฮิรซ์ และช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟ คือ 300 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 300 กิกะเฮิรตซ์ สามารถแบ่งได้ดังนี้

1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) โดยปกตอมนุษย์สัมผัสกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดเวลา ซึ่งมีตัวอย่างของคลื่นดังกล่าวได้แก่ คลื่นแสง รังสีเอ็ก (X-Irradiation) คลื่นโทรทัศน์ คลื่นวิทยุทั้งคลื่น AM (amplitude modulation) และคลื่น FM (frequency modulation) รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีอินฟาเรด และคลื่นไมโครเวฟ โดยจากหลักการที่ว่า วัตถุใดในจักรวาลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (0 องศาเซลเซียส (K)) สามารถปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 16 ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะเฉพาะทั้งความยาวคลื่น (wavelength, λ) และความถี่ (frequency, f) ดังแสดงในภาพประกอบ 16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในหนึ่งรอบคลื่น จะมีการผสมผสานกันทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก



ภาพประกอบ 16 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551)

1.2 กลไกการเกิดความร้อน (heating mechanism) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในช่วงย่านความถี่ไมโครเวฟและช่วงไดอิเล็กตริกไม่ใช่พลังงานความร้อนแต่คลื่นเหล่านี้แปลงเป็นความร้อนได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับวัสดุ (lossy material) ซึ่งจะเห็นได้จากการเกิดความร้อนขึ้นภายในเนื้อวัสดุเอง โดยมีหลายกลไกในการแปลงพลังงาน แต่ในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟนั้น จะใช้ 2 กลไก ซึ่งเป็นกลไกหลักในการวิเคราะห์ ได้แก่

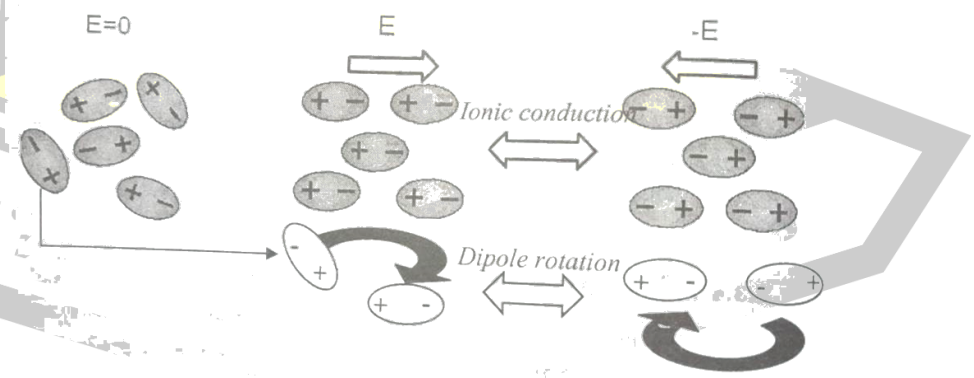
1) กลไกชนิดการเหนี่ยวนำเชิงไอออน (Ionic Conduction)

กลไกเริ่มขึ้นเมื่อประจุไอออนซึ่งเกิดการแตกตัวในสารละลายถูกเร่งด้วยแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำ ยกตัวอย่างเช่น สารละลายเกลือในน้ำซึ่งในสารละลายจะประกอบไปด้วยไอออนของโซเดียม (Na^+) คลอไรด์ (Cr) ไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+, H^+) ไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ซึ่งเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้าในทิศทางตรงกันข้ามกับประจุที่มีอยู่แต่ละไอออน ซึ่งจากการเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้ไอออนชนกับโมเลกุลของน้ำที่ยังไม่เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้พลังงานจลน์เพิ่มขึ้นและเป็นเหตุให้ไอออนเกิดความเร่งและส่งผลเป็นลูกโซ่ต่อการชนของโมเลกุลอื่นๆ คล้ายกับการชนกันของลูกบิลเลียด และเมื่อค่าประจุเปลี่ยนแปลงไอออนจึงยิ่งมีความเร่งเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม โดยเหตุการณ์ดังกล่าวจะเกิดด้วยอัตราความถี่สูงนับล้านครั้งต่อวินาที ทำให้เกิดการชนและถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นในระดับโมเลกุลอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงมีขั้นตอนในการเปลี่ยนแปลงพลังงานสองขั้นตอน คือ พลังงานของสนามไฟฟ้าถูกแปลงไปเป็นพลังงานจลน์โดยการเหนี่ยวนำแบบบังคับทิศทาง (ordered kinetic energy) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนกลับมาเป็นพลังงานจลน์โดย

การเหนี่ยวนำแบบไร้ทิศทาง (disordered kinetic energy) ณ จุดซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อน และพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยกลไกนี้ก็จะไม่ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิหรือความถี่

2) กลไกชนิดการการหมุนของทั้งสองขั้ว (dipolar rotation)

สำหรับโมเลกุลหลายๆ ชนิด เช่น โมเลกุลน้ำซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสองขั้ว โดยธรรมชาติหมายถึง โมเลกุลมีสมบัติของการกระจายประจุที่ไม่สมมาตรเมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลาง ส่วนโมเลกุลของสสารชนิดอื่นก็จะเกิดความไม่สมมาตรได้หากเกิดการเหนี่ยวนำโดยสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทั้งนี้เพราะสนามไฟฟ้าทำให้เกิดหน่วยแรงเค้นภายในโมเลกุล โดยขั้วทั้งสองจะได้รับอิทธิพลจากกลไกดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงขั้วอย่างรวดเร็วตามสนามไฟฟ้าที่มากระทำ ดังแสดงในภาพประกอบ 17 ยกตัวอย่างเช่น คลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ สามารถทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุถึง 4,900 ล้านครั้งต่อหนึ่งรอบคลื่น แม้ว่าในตอนเริ่มต้น ประจุในโมเลกุลจะมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบหรืออย่างสุ่มก็จะได้รับผลให้มีการจัดเรียงประจุตามทิศทางหรือขั้วของสนามไฟฟ้าที่มากระทำ อย่างไรก็ตามเมื่อสนามที่มากระทำมีค่าลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าดังกล่าวเปลี่ยนกลับมามีการกระจาย ตัวอย่างไม่เป็นระเบียบเช่นเดิมซึ่งก็คือ การคลายสนาม (relaxes) และเช่นกันเมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้นการสร้างหรือการจัดเรียง (alignment) และการคลายสนามที่ความถี่หนึ่งจะเกิดขึ้นนับล้านครั้งในหนึ่งวินาที ซึ่งเป็นการแปลงพลังงานสนามไฟฟ้าเป็นศักย์เก็บไว้ในวัสดุแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์หรือพลังงานความร้อนนั้นเอง นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลที่ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิในขณะที่มีการสร้างหรือการจัดเรียง และการคลายสนามไฟฟ้านั้นจะถูกนิยามเป็นความถี่ของการคลายสนาม (relaxation frequency) โดยโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำและโมโนเมอร์จะมีค่าความถี่ของการคลายสนามมากกว่าความถี่ของของคลื่นไมโครเวฟและมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จึงเป็นเหตุให้การเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นความร้อนได้ช้าลง ในทางตรงกันข้ามกับโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ มีข้อสนับสนุนถึงความจริงอย่างหนึ่งที่ว่าของเหลว เช่น น้ำและโมโนเมอร์จะเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าโพลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำไมโครเวฟไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้ง



(a) (b)

ภาพประกอบ 17 อัตรากิริยาระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกและสนามไฟฟ้า (a) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้วภายในวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อไม่มีสนามไฟฟ้า (b) การเรียงตัวของสภาพเชิงขั้ว

ที่มา : ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551)

สำหรับค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุนี้โดยทั่วไปแล้วจะถูกพิจารณาให้แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวในกรณีของกระบวนการการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (microwave heating process) และกระบวนการหลอมละลายด้วยไมโครเวฟ (microwave melting process) และแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิและความชื้นในกรณีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ส่วนการประมาณค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการอันตรกิริยาระหว่างคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริกได้ในที่นี้ให้ P_1 เป็นพลังงานที่ถูกใช้สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของโหลดหรือวัสดุไดอิเล็กตริก W (g) ที่วางอยู่ในคาวิตี้จากอุณหภูมิเริ่มต้น T_1 จนถึงอุณหภูมิ T_2 สามารถคำนวณค่าพลังงานนี้ได้จากสมการคาลอริฟิค (calorific) คือ

$$P_1 = \frac{4.18xWxCx(T_2 - T_1)}{t} \quad (2)$$

โดยที่

W คือ น้ำหนักของวัสดุไดเล็กตริก (g)
C คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุไดอิเล็กตริก (cal/g˚C)
ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (˚C)
t คือ เวลาที่ให้ความร้อน (sec)

2. การหาความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

2.1 ความชื้นฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{w-d}{w}\right) \text{x}100 \quad (3)$$

โดยที่

M_w คือ ความชื้นฐานเปียก (% wb)
w คือ มวลของวัสดุ kg
d คือ มวลวัสดุแห้ง kg

2.2 ความชื้นฐานแห้ง

$$M_w = \left(\frac{w-d}{d}\right) \text{x}100 \quad (4)$$

พหุน ปัณ ฑิโต ชีเว

โดยที่

M_w คือ ความชื้นฐานแห้ง (% db)

w คือ มวลของวัสดุ kg

d คือ มวลวัสดุแห้ง kg

3. การหาอัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้งสามารถอธิบายจากปริมาณของการระเหยของน้ำที่อยู่ในวัสดุทดลองภายใต้เวลา ดังนั้น อัตราการอบแห้งของกระชายดำจึงถูกคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (5)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (g $_{น้ำที่ถูกระเหย}$) / (min)

M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา t (kg $_{น้ำ}$ / kg, $_{มวลแห้ง}$)

M_{t+dt} คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา t+dt (kg $_{น้ำ}$ / kg, $_{มวลแห้ง}$)

dt คือ ช่วงของเวลาอบแห้ง (min)

t คือ เวลาการอบแห้ง (min)

4. การประเมินการใช้พลังงาน

การใช้พลังงานในที่นี้ สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ พลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง (E_{in}) และพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำของแมคคาเดเมีย (Q_{evap}) ในส่วนแรกพลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง (E_{in}) นั้น การคำนวณพลังงานดังกล่าวจะสามารถหาได้จากการประเมินพลังงานในแต่ละส่วนประกอบของระบบการอบแห้ง ได้แก่ จากแมกนีตรอน พัดลม และขดลวดความร้อน ดังนั้น พลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง (E_{in}) จะแสดงดังสมการ (6)

$$E_{in} = E_{mw} + E_{blow} + E_{heater} \quad (6)$$

โดยที่

E_{mw} คือ พลังงานที่ถูกใช้โดยไมโครเวฟ (kW-h)

E_{blow} คือ พลังงานที่ถูกใช้โดยพัดลม (kW-h)

E_{heater} คือ พลังงานที่ถูกใช้โดยขดลวดความร้อน (kW-h)

ส่วนที่สุดท้าย พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำของแมคคาเดเมีย (Q_{evap}) นั้นจะสามารถคำนวณหาค่าพลังงานดังกล่าวได้จากสมการ (7)

$$Q_{evap} = W_d[h_{fg}(M_{p1} - M_{p2}) + c_m(T_2 - T_1)] \quad (7)$$

โดยที่

W_d คือ น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

M_p คือ ปริมาณความชื้นของวัสดุ (% db.)

c_m คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ (kJ/kg˚C)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (˚C)

5. ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (η_e)

ประสิทธิภาพของการอบแห้ง นั้น ประกอบด้วย ค่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ หารด้วยพลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังสมการ (8)

$$\eta_e = \frac{Q_{evap}}{E_{in} \cdot 3600} \quad (8)$$

การตรวจจับอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส

การตรวจจับอุณหภูมิแบบไม่สัมผัสในการทดลองครั้งนี้ ได้มีการออกแบบให้ใช้ตัวตรวจจับอุณหภูมิแบบเทอร์มอไพล์รับรังสีความร้อนมาแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งต่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผล ออกมาในรูปของค่าของอุณหภูมิตัวตรวจจับที่ผิววัสดุที่เลือกใช้ประกอบด้วยเทอร์มอคัปเปิล 8 ตำแหน่งซึ่งทำหน้าที่ในการรับรังสีความร้อนที่มาตกลงบนรอยต่อของเทอร์มอคัปเปิลทั้ง 8 ตำแหน่ง ทำให้เกิดความที่แตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายร้อนและปลายเย็นทำให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าตามปริมาณรังสีความร้อนจริงและส่งต่อไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลแสดงค่าอุณหภูมิและควบคุมการทำงานของระบบต่อไป

1. เทอร์มอไพล์ (thermopile)

เทอร์มอไพล์เป็นอุปกรณ์วัดการแผ่รังสีความร้อนที่ประกอบด้วยเทอร์มอคัปเปิล 2 ชุดหรือมากกว่ามาเชื่อมปลายต่อปลายเข้าด้วยกันเมื่อมีรังสีความร้อนมาตกกระทบบนรอยต่อด้านหนึ่งทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ปลายร้อนและปลายเย็น จึงก่อเกิดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นโดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณรังสีความร้อนที่ถูกดูดไว้ได้ตามปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกว่าด้วยเรื่องการแปลงไฟฟ้าจากความร้อนและการตรวจจับอุณหภูมิบนผลิตภัณฑ์ในขณะทำการอบแห้งมีหลักการเลือกที่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากคลื่นไมโครเวฟมายังตัวตรวจจับอุณหภูมิและอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ ในระบบ ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้เลือกอุปกรณ์ตัวจับที่มีความสามารถตรวจจับแบบไม่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรงเพื่อติดตั้งภายนอกใช้หลักการรับรังสีความร้อนที่เกิดบนวัสดุ อุปกรณ์ตัวตรวจจับที่เลือกใช้ คือ Thermopile sensor รุ่น TPA81 ดังภาพประกอบ 18

ภาพประกอบ 18 เทอร์มอไพล์ (Thermopile sensor รุ่น TPA81)

เทอร์มอไพล์รุ่น TPA81 นี้เป็นอุปกรณ์ที่ตรวจจับรังสีความร้อนแบบอินฟาเรดในช่วงความยาวคลื่น 2 ถึง 22 ไมโครเมตร ตรวจจับอุณหภูมิได้ 8 จุดพร้อมกัน ช่วงอุณหภูมิใช้งาน -4 ถึง 100 องศาเซลเซียส และปรับตำแหน่งของโมดูล สำหรับตรวจจับรังสีความร้อนได้ และมีสามารถในการเชื่อมต่อเข้ากับข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลรังสีความร้อนออกมาและจะแสดงเป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

2. การคำนวณระยะติดตั้งเทอร์มอไพล์

หลักการเลือกเทอร์มอไพล์สำหรับวัดอุณหภูมินั้น ตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่ต้องจะต้องพิจารณาควบคู่กันไปด้วยเสมอ คือ ค่า FOV (field of view) หมายถึง ระยะทางที่เทอร์มอไพล์ได้รับพลังงานความร้อนจากวัตถุลดลงเหลือประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และอีกความหมายหนึ่ง คือ มุมกรวยตันที่เทอร์มอไพล์ใช้สำหรับพลังงานของรังสีอินฟราเรดที่ถูกปลดปล่อยออกจากวัสดุร้อน ดังนั้นการคำนวณหาระยะห่างของเทอร์มอไพล์ที่มีค่า FOV 83 องศา ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$83 \text{ degree} = 2 \times \arctan\left(\frac{\frac{m_l}{2} + \frac{a}{2}}{d(m_l \rightarrow a)}\right) \qquad (9)$$

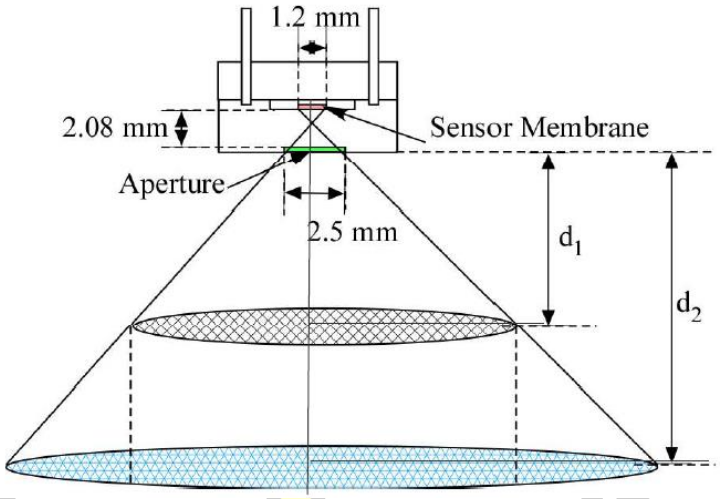
โดยที่

m_l คือ ความยาวของเซ็นเซอร์เมมเบรน (mm)

a คือ ความยาวของช่องเปิด (mm)

d คือ ระยะห่างจากเมมเบรนถึงช่องเปิด (mm)

เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น ของค่า FOV 83 องศา ที่เป็นมุมตันที่ครอบพื้นที่วัตถุที่ต้องการวัดเป็นวงกลมปิดรูปทรงกรวย จะแสดงดังภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบ 19 ตำแหน่งของเทอร์มอไพล์ค่า FOV 83 องศา และระยะห่างของ d ต่าง ๆ

จากภาพประกอบ 19 พบว่าตำแหน่งเดิมของเทอร์มอไพล์ถึงวัตถุ คือ d_1 จะวัดได้จากพื้นที่ด้านบนลงมาที่ระยะวัตถุที่ 1 และจะเปลี่ยนเป็นระยะที่ d_2 เมื่อ $d_2 > d_1$ แต่ค่า FOV 83 องศาของเทอร์มอไพล์ยังเท่าเดิม ทำให้รูปทรงกรวยต้องการพื้นที่มากขึ้นเป็นพื้นที่ด้านล่าง ส่วนพื้นที่ที่หายไปของเทอร์มอไพล์จึงรับอุณหภูมิของอากาศบริเวณรอบ ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิห้อง (ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์, 2549)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

การเกิดความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟนั้นมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอาหารที่ได้จากการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาอุณหภูมิที่เกิดจากไมโครเวฟก่อนการอบแห้ง เพื่อที่จะสามารถผลิตอาหารออกมาได้อย่างมีคุณภาพ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

1. ค่าความชื้น

ค่าความชื้นอิสระในสสารมีผลอย่างมากต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) เนื่องจากน้ำมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิห้องประมาณร้อยละ 78 เหตุนี้เมื่อมีปริมาณน้ำมากในสสารหรือวัสดุย่อมทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งโดยปกติจะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน และเมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกหลายชนิดมาผสมกันเกิดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนและยากต่อการอธิบายได้ แต่อย่างไรก็ตามได้มีกฎหลัก (rules of thumb) สำหรับอธิบายปรากฏการณ์นี้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความชื้นสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงขึ้น

1.2 โดยปกติค่าไดอิเล็กตริกลอส (dielectric loss) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่อยู่ในช่วงความชื้นประมาณร้อยละ 20 ถึง 30 แต่ก็เป็นไปได้ที่จะมีค่าลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นไปมากกว่านี้ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุ)

1.3 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุผสมจะอยู่ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับวัสดุหลายๆประเภทซึ่งประกอบด้วยแอลกอฮอล์และตัวทำละลายอินทรีย์จะมีสมบัติไดอิเล็กตริกที่เหมาะสำหรับการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายกับน้ำ ดังแสดงค่าสมบัติตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน ดังแสดงในตาราง 4

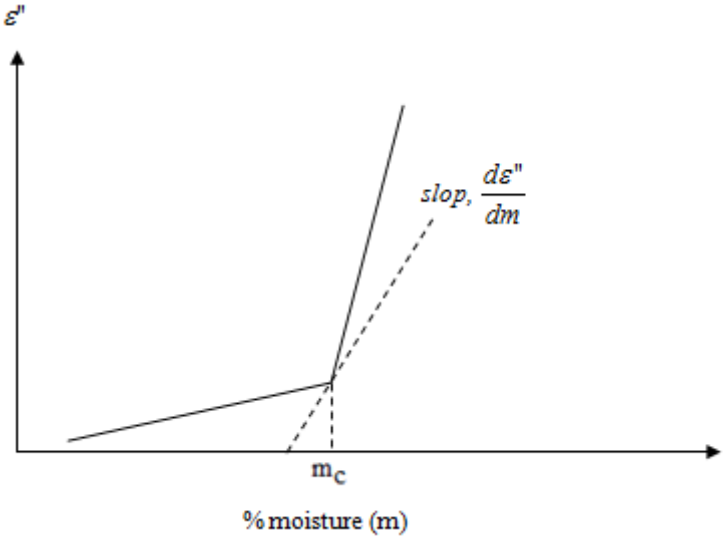
ตาราง 4 ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกตามประเภทวัสดุในการทำความร้อน

วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ดี	วัสดุที่สามารถทำความร้อนได้ต่ำ
น้ำ (Water)	ไฮโดรคาร์บอน
กรดแอนไฮไดร์ (Acid Anhydrides)	ฮาโลเจน ไฮโดรคาร์บอน (Halogenated Hydrocarbons)
แอลกอฮอล์ (Alcoholes)	อัลคาลิเฮไลด์ เช่น เกลือ (Alkali Halides, e.g., Salt)
แอนดิไฮด์ (Aldehydes)	ออกไซด์อนินทรีย์ เช่น อลูมิเนียม (Inorganic Oxides, e.g., Alumina)
คีโตน (Ketones)	ธาตุบางชนิด เช่น ซัลเฟอร์ (Some Elements, e.g., Sulfur)
เอไมด์ (Amides)	โบรอนไนไตรด์ (Boron Nitride)
เอมีน (Amines)	
ไซยาไนด์ (Cyanides)	
โปรตีน (Proteins)	
เฟอร์ไรต์ (Ferrites)	ไมก้า (Mica)
เฟอร์โรอิเล็กทริก (Ferroelectrics)	
สารละลายไอออนิค (Ionic Solutions)	

ที่มา : ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551)

ด้วยเหตุที่การอบแห้งเกี่ยวกับการไล่น้ำหรือสารละลายออกจากวัสดุ ถ้าน้ำหรือความชื้นถูกขับออกมาก็จะทำให้ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์มีค่าลดลง โดยในหลายๆ กรณีที่น้ำถูกไล่ออกทำให้การทำความร้อนของตัววัสดุเองมีขีดจำกัดและกลายเป็นวัสดุที่สามารถทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทะลุผ่านของตัววัสดุไปได้ที่ระดับความชื้นต่ำ โดยแสดงในภาพประกอบ 20 ได้แสดงการแปรเปลี่ยนของค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์กับค่าความชื้น ซึ่งน้ำที่อยู่ในวัสดุในหลายสภาวะ เช่น น้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างวัสดุ (bound water) และน้ำอิสระ (free water) ซึ่งอยู่ในรูพรุน (pore) นี้เราพิจารณาเฉพาะค่าความชัน ($d\varepsilon''/dm$) ของเส้นโค้ง โดยที่ค่าของความชื้นต่ำกว่าค่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content; m_c) จะพิจารณาน้ำดังกล่าวเป็นน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้าง (มีค่าความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 40) และจุดที่ค่าความชื้นสูงกว่าค่าความชื้นวิกฤติก็จะพิจารณาน้ำให้เป็นน้ำอิสระ (ข้อสังเกต คือ ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์ของน้ำที่ถูกตรึงกับโครงสร้างจะมีค่าต่ำเพราะน้ำประเภทนี้ไม่

สามารถเคลื่อนที่โดยอิสระเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของน้ำแข็ง สามารถวิเคราะห์ค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์ประมาณ 0.003 ในขณะที่น้ำธรรมดามีค่าประมาณ 12)



ภาพประกอบ 20 ค่าความเปลี่ยนแปลงของค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟคเตอร์กับค่าความชื้น
ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551)

2. ความหนาแน่น

โดยปกติค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในวัสดุจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาแน่นของวัสดุลดลง ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ลดลงตามไปด้วย

3. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในลักษณะที่ซับซ้อนโดยอาจมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิแต่อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะไม่สามารถชี้ชัดได้ถึงแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น ด้วยเหตุที่ทั้งค่าความชื้นและอุณหภูมิมีความสำคัญต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกและกระบวนการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเข้าใจถึงอัตรากิริยาของคลื่นและวัสดุไดอิเล็กตริกอย่างถ่องแท้ เช่น ไม้ที่มีค่าความชื้นระดับต่ำระดับหนึ่ง พบว่าค่าไดอิเล็กตริกลอสแฟกเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจึงมีผลให้เกิดปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอะเวย์ ซึ่งเป็นสาเหตุให้การไหม้ได้หากถูกอบแห้งอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน

4. ความถี่

ความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำมีผลต่อค่าสมบัติไดอิเล็กตริกด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลที่กระบวนการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมถูกจำกัดด้วยความถี่ที่คงที่อยู่แล้วตามมาตรฐาน ISM ทำให้วิศวกรถูกจำกัดการใช้งานในเรื่องของความถี่นี้

5. การนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า คือ ความสามารถของวัสดุในการนำกระไฟฟ้าโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออน โดยทั้งอิเล็กตรอนและไอออนสามารถที่จะเป็นผลกระทบหลักในการทำความ

ร้อนและการอบแห้ง เนื่องจากผลของน้ำที่ถูกเคลื่อนย้ายออกสู่ภายนอกทำให้ความเข้มข้นของไอออนภายในที่สูงขึ้น

6. ค่าการนำความร้อน

ค่าการนำความร้อนมีบทบาทที่ลดลงในกระบวนการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกเมื่อเทียบกับกระบวนการทำความร้อนด้วยวิธีแบบเก่า อันเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟส่งผลทำให้ความเร็วในการทำความร้อนมีค่าสูงกว่า จนค่าการนำความร้อนมีผลกระทบกับระบบไม่มากนัก อย่างไรก็ตาม มีบางกรณีที่ค่าการนำความร้อนมีบทบาทหลัก เช่น เมื่อความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับความลึกของวัสดุที่ต้องการทำความร้อนขึ้น ดังนั้น การนำความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ณ ตำแหน่งที่คลื่นทะลุเข้าไปไม่ถึง

7. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

โดยปกตินักวิจัยและวิศวกรหรือผู้ออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะตัดตัวแปรนี้ทิ้งไป และมุ่งพิจารณาที่ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกเป็นสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามโดยความเป็นจริง ค่าความจุความร้อนจำเพาะเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งเป็นสาเหตุให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มขึ้นได้มากขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการพิจารณาทั้งค่าไดอิเล็กตริกและค่าความจุความร้อนจำเพาะจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

8. ค่าความลึกในการทะลุทะลวง

ปกติตัวแปรนี้มีการเรียกกันในหลายชื่อ เช่น ความลึกในการทะลุทะลวง หรือความลึกเชิงกำลัง (power penetration depth) เป็นต้น แต่ไม่ว่าจะเรียกชื่อใดก็ตามก็จะมีความหมายทางกายภาพเดียวกัน แม้ว่าค่าความลึกในการทะลุทะลวงจะไม่ได้เป็นคุณสมบัติของวัสดุแต่ก็ส่งผลต่อคุณสมบัติหลายๆอย่างของวัสดุและค่านี้ยังมีความสำคัญมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกของกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ ด้วยเหตุที่การทำความร้อนด้วยคลื่นมาเหล็กไฟฟ้าเป็นการทำความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) ดังนั้นความลึกในการทะลุทะลวงของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งหากคลื่นไม่สามารถทะลุทะลวงผ่านวัสดุไปได้ การทำความร้อนจะถูกจำกัดอยู่เพียงแค่ที่ผิวของวัสดุเท่านั้น

ข้อได้เปรียบของระบบคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ระบบการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก

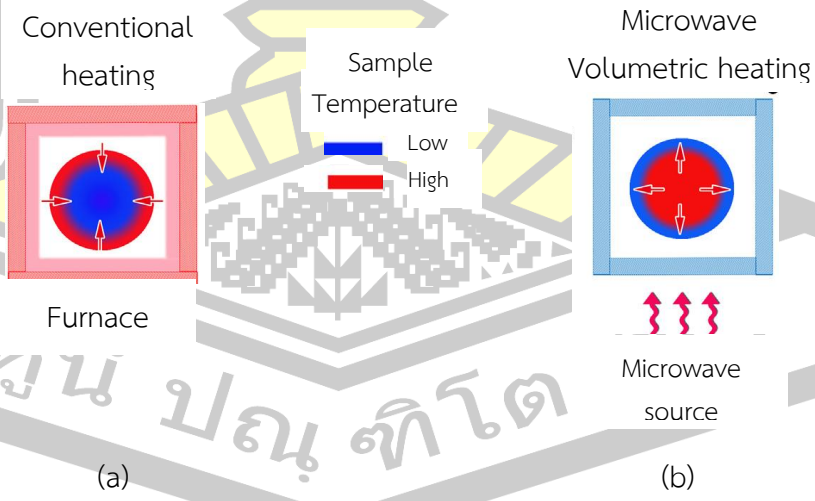
การทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากระบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ โดยระบบดั้งเดิมที่ใช้จะเกิดความล่าช้าในการเคลื่อนที่ของความร้อนจากผิวของวัสดุเข้าสู่ภายในซึ่งถูกกำหนดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกที่ร้อนกับภายในที่เย็นกว่า ในขณะที่ทำการทำความร้อนและการอบแห้งด้วยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกจะมีผลในเชิงการทำความร้อนทั่วถึงทั้งก้อน (bulk heating) ซึ่งเกิดขึ้นจากอัตราการิยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวัสดุตลอดเนื้อวัสดุ โดยในทางทฤษฎีการทำความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างทันที่ทันใดและรวดเร็วแม้ว่าในทางปฏิบัติอาจจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

เหมือนทางทฤษฎีก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของการทำความร้อนเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่งสำหรับการออกแบบเชิงอุตสาหกรรมซึ่งมีความเป็นไปได้ในการใช้เวลาเพียงช่วงวินาทีหรือนาทีในบางกระบวนการผลิต ในขณะที่วิธีการดั้งเดิมให้เวลาเป็นนาที ชั่วโมงหรือเป็นวัน เพื่อทำให้กระบวนการดำเนินอย่างเสร็จสมบูรณ์ เช่น ระบบการทำความร้อนในงานอุตสาหกรรมที่มีความเร็วสูงที่สุด ซึ่งเป็นที่ทราบกันอยู่ คือ การให้ความร้อนพลาสติกบางชนิดที่สามารถทำได้ในอัตรา 30,000 °C/s ในทางตรงกันข้าม หากต้องการทำความร้อนที่ระดับต่ำมาก สามารถทำได้ที่อัตรา 1 องศาเซลเซียส ต่อ 100

สำหรับตัวแปรที่กำหนดความเร็วของการทำความร้อน ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ สมบัติไดอิเล็กตริก ลักษณะรูปร่าง ประสิทธิภาพของการเกิดคัปปลิ้งของคลื่นภายในคาวิตี้ (coupling efficiency) พลังงานที่ถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุและกำลังไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกที่ป้อนเข้าไปรวมถึงตัวแปรอื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่ากันพบว่า ความเร็วในการทำความร้อนจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อกำลังที่ป้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า กล่าวโดยสรุปว่า ข้อได้เปรียบของการทำความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก มีรายละเอียดดังนี้

1.1 ใช้เวลาน้อย (hight speed) ประหยัดเนื้อที่และแรงงาน ลดจำนวนวัสดุที่เสียเนื่องจากอุปกรณ์ทำงานส่วนใหญ่ไม่เคลื่อนที่ (stationary part)

1.2 การทะลุทะลวงของพลังงาน ไมโครเวฟสามารถทะลุทะลวงเข้าไปกำเนิดพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้มีความร้อนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อนวัสดุ ดังภาพประกอบ 21 ในขณะที่การให้ความร้อนแบบอื่นจะให้ความร้อนที่ผิววัสดุซึ่งอาจก็ให้เกิดความเสียหายที่ผิวด้านนอกเพราะมีอุณหภูมิสูงเกินไปในขณะที่ภายในเนื้อวัสดุยังรับความร้อนไม่ทั่วถึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้คุณภาพตามที่ต้องการ นอกจากนั้นยังใช้เวลานานมาก เพราะมีข้อจำกัดทางด้านความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้น การทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงทำให้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า



ภาพประกอบ 21 การเกิดความร้อนภายในวัสดุด้วยพลังงานต่าง ๆ (a) พลังงานแบบดั้งเดิมที่ให้ความร้อนที่ผิว (b) พลังงานไมโครเวฟ

ที่มา: Budarin et al., (2014)

1.3 ความสามารถในการเลือกที่จะซับพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุ (selective energy absorption) วัสดุบางชนิดสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ทันทีแต่วัสดุบางชนิดไม่สามารถดูดซับพลังงานได้ คุณสมบัติเหล่านี้เป็นข้อได้เปรียบอีกประหนึ่งของกระบวนการไมโครเวฟ เช่น สามารถให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อได้โดยไม่ทำลายหีบห่อนั้น นอกจากนี้ การที่มีวัสดุอบแห้งมีความชื้นเริ่มต้นสูง ทำให้ค่ากำลังการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุพรุนมีสูง ส่งผลทำให้อุณหภูมิค่อยๆ สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อความชื้นในวัสดุอบแห้งค่อยๆ หายไป ค่ากำลังการดูดซับพลังงานคลื่นไมโครเวฟก็จะค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิค่อยๆ ลดลงตาม เนื่องจากมีค่ากำลังการดูดซับของคลื่นไมโครเวฟต่ำ และช่วงสุดท้ายของการอบแห้งอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในวัสดุอบแห้ง รวมทั้งการก่อตัวของคลื่นนิ่ง (คลื่นนิ่ง หมายถึง ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นต่ำ) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะตลอดช่วงเวลาของกระบวนการอบแห้งซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและมีพฤติกรรมที่ไม่มีรูปแบบชัดเจน ในระยะสุดท้ายของกระบวนการอบแห้ง ความชื้นภายในวัสดุออกไปมากระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน ในระหว่างกระบวนการอบแห้งโดยไมโครเวฟและการสูญเสียโดยกระบวนการพาที่บริเวณผิววัสดุ และสภาวะช่วงหลังนี้อุณหภูมิของวัสดุอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

1.4 การควบคุมระบบความสามารถกระทำได้ดีและรวดเร็วกว่า โดยธรรมชาติของการปิดเปิดสามารถเปลี่ยนแปลงระดับการทำความร้อนอย่างทันทีทันใด เพียงแค่ทำการควบคุมพลังงานในช่วงขาออกของแหล่งกำเนิดทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและมีความแน่นอนในการควบคุมในการทำความร้อน อุปกรณ์การให้ความร้อนแบบเก่า เช่น เตาอบลมร้อนหรือไฟฟ้า ต้องใช้เวลามากในการปรับอุณหภูมิ แต่เตาไมโครเวฟสามารถปรับอุณหภูมิด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้เวลาน้อยมากภายในเสี้ยววินาที

1.5 ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม เนื่องจากที่ระดับความร้อนที่สูงจะไม่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุ เหมือนที่เกิดขึ้นกับระบบการทำความร้อนแบบดั้งเดิม

1.6 สามารถทำให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและเคมีเท่าที่ต้องการได้ โดยปฏิกิริยาทางเคมีและทางกายภาพจะถูกเร่งให้เกิดขึ้นจากความร้อนที่สร้างด้วยวิธีนี้ ซึ่งได้แก่ ปฏิกิริยาการพองตัวการอบแห้ง การหลอมละลาย การทำให้โปรตีนเปลี่ยนสภาพไป (protein denaturation) การที่แป้งเกิดเจลาทิไนเซชั่น (starch genlatinization) หรือปฏิกิริยาอื่นๆ ที่คล้ายกัน

1.7 มีประสิทธิภาพสูง การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟใช้พลังงานน้อยกว่าการทำความร้อนแบบเก่ามาก เมื่อเทียบกับการเกิดปริมาณความร้อนภายในวัสดุที่เท่ากัน (การทำความร้อนแบบเก่ามีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณร้อยละ 10-30 ในขณะที่การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟมีประสิทธิภาพโดยรวมประมาณร้อยละ 60-70) โดยในการทำความร้อนด้วยวิธีนี้ พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกแปลงโดยตรงเพื่อทำให้วัสดุเกิดความร้อนขึ้น โดยไม่เกิดการสูญเสียไปกับอากาศ ผนังของเตา สายพานลำเลียงหรือส่วนอื่นๆ ของระบบ อันจะนำไปสู่การประหยัดพลังงาน

1.8 ไมโครเวฟเป็นกระบวนการสะอาด (clean processing) กระบวนการทางไมโครเวฟไม่สร้างมลภาวะ ต่างจากกระบวนการให้ความร้อนแบบอื่นที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ทำให้มีก๊าซไอเสียออกมาด้วย

2. ข้อได้เปรียบของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก

สำหรับกลไกของการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริกมีความแตกต่างไปจากวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม โดยวิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมจะเห็นว่า มวลความชื้นสามารถคลื่นที่ออกสู่ภายนอกในช่วงเวลาที่เริ่มต้นและน้ำที่คงเหลืออยู่จะค่อยแพร่กระจายไปยังผิว ถึงแม้ว่าศักยภาพของการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการทำความร้อนจะอยู่ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิซึ่งเป็นผลให้มีการถ่ายพลังงานไปยังภายในเนื้อวัสดุ ในขณะที่ศักยภาพของการเคลื่อนย้ายมวลความชื้นจะอยู่ที่ความแตกต่างของความเข้มข้นของมวลภายในที่อยู่ในสภาวะเปียกและภายนอกจะอยู่ในสภาวะแห้งกว่า เช่นนี้แล้วกระบวนการไล่ความชื้นก็จะช้าอันเนื่องจากข้อจำกัดของอัตราการแพร่จึงต้องการอุณหภูมิภายนอกที่สูงเพื่อเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ

ด้วยกลไกการเกิดความร้อนจากภายในของระบบที่ใช้คลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก พบว่าการถ่ายเทมวลความชื้นในช่วงต้นจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความดันรวมที่ก่อตัวขึ้น ทั้งนี้เพราะการเกิดไออย่างรวดเร็วภายในวัสดุ โดยส่วนมากความชื้นซึ่งถูกทำให้เป็นไอก่อนที่จะออกจากวัสดุ ซึ่งหากวัสดุมีความชื้นเริ่มต้นสูงจะมีผลให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันมีผลต่อเนื่องให้ของเหลวเคลื่อนที่ออกจากวัสดุภายใต้อิทธิพลของความแตกต่างของความดันรวม นอกจากนี้ กรณีที่วัสดุมีค่าความชื้นเริ่มต้นที่สูงทำให้ความแตกต่างของความดันสูงขึ้นซึ่งมีผลอย่างมากต่อมวลความชื้นที่เคลื่อนที่ออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปกติ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกชนิดของปรากฏการณ์นี้ว่าปรากฏการณ์ปั๊มของเหลว (pumping effect) หรือการที่มีแรงซึ่งโดยปกติจะเป็นแรงดันไอกระทำ ทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ขึ้นสู่ที่ผิวหน้าโดยตรงโดยปราศจากการเปลี่ยนแปลงสถานะและปรากฏการณ์ดังกล่าวจะนำไปสู่การแห้งอย่างรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มการให้ความร้อนเข้าไปอีก ซึ่งกรณีนี้อาจเป็นเหตุให้เกิดการแข็งตัวของผิวหรือผิวมีอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป และประเด็นความสนใจอีกอย่าง คือ ศักยภาพของระบบที่ทำให้เกิดการใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งอาจจะพิจารณาความเร็วของการอบแห้ง การคัปปลิ้งของพลังงานภายในในคาวิตี้ เป็นต้น โดยระบบอาจมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้เมื่อมีการผสมผสานร่วมกันระหว่างกระบวนการที่ใช้คลื่นไมโครเวฟกับระบบอื่นๆ (hybrid system) สำหรับข้อควรระวังซึ่งควรอธิบายให้ชัดเจน คือ ระบบเหล่านี้สามารถทำความร้อนและอบแห้งอย่างรวดเร็วแต่อัตราที่รวดเร็วดังกล่าวจะต้องไม่เป็นการทำลายคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งต้องระมัดระวังไม่ทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วจนวัสดุไหม้เกรียมหรือมีความเสียหายอื่นๆ อันเนื่องมาจากไอน้ำหรือไอไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาได้อย่างรวดเร็วเพียงพอจนทำให้เกิดแรงดันสะสมขึ้นภายในแล้วเกิดความแตกร้าวของชิ้นงานหรือการระเบิดขึ้นได้

โดยปกติการอบแห้งหรือทำความร้อนด้วยคลื่นไดอิเล็กตริกจะผสมผสานร่วมกับระบบอากาศร้อน โดยเฉพาะกับระบบที่ใช้ไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานด้วยเหตุผลทั้งในเชิงประสิทธิภาพและความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยอากาศร้อนมีประสิทธิภาพในการไล่น้ำอิสระ บริเวณผิวหรือใกล้กับผิวออกได้ดี ในขณะที่ปรากฏการณ์ปั๊มของเหลวเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้สามารถขับน้ำอิสระที่มีอยู่ภายในออกสู่ภายนอกได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับน้ำที่ถูกยึดตรึงกับโครงสร้าง และด้วยผลของการเสริมกันทั้งสองกลไกนี้จึงมีความเป็นได้ที่จะทำให้เกิดข้อได้เปรียบและลดต้นทุนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเมื่อเทียบกับการใช้คลื่นไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริก

เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีราคาแพงทั้งในส่วนของอุปกรณ์และการเดินระบบ ในปัจจุบันมี 3 วิธี ที่มีการผสมผสานกันระหว่างระบบที่ใช้ไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกกับระบบดั้งเดิม มีรายละเอียดดังนี้

2.1 การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟในกระบวนการช่วงต้น

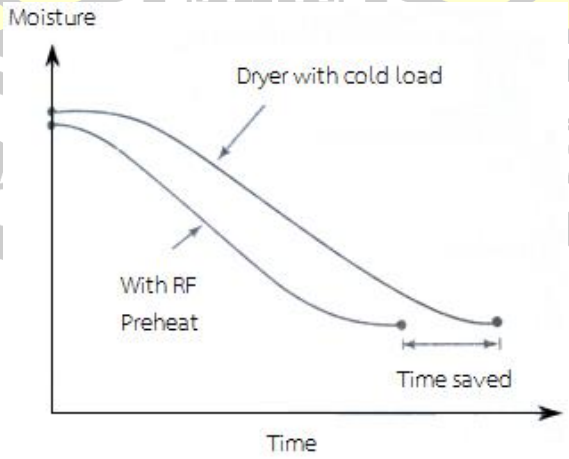
โดยการใส่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกในตอนต้นของกระบวนการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลทำให้ภายในวัสดุเกิดความร้อนจนถึงอุณหภูมิของการระเหย ด้วยเหตุผลนี้มวลความชื้นจึงเคลื่อนที่มายังบริเวณผิววัสดุอย่างทันทีทันใด และต่อเนื่องด้วยการเดินเครื่องระบบการอบแห้งแบบดั้งเดิมภายใต้สภาวะที่ควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 22 (a) ซึ่งเส้นโค้งของการอบแห้งด้วยคลื่นมีความชันมากกว่าการอบแห้งแบบดั้งเดิมและนอกจากนี้ยังใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง

2.2 การเร่งการอบแห้ง

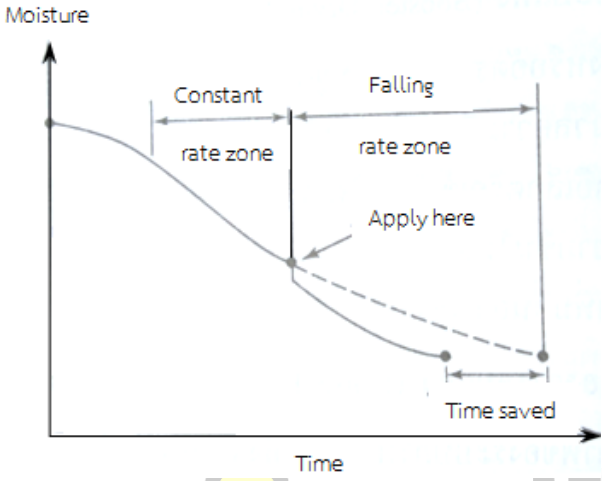
เมื่ออัตราการอบแห้งหรืออัตราของการสูญเสียความชื้นเริ่มลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 22 (b) ผลที่เกิดขึ้นคือ ผิวของวัสดุแห้งและมวลความชื้นเคลื่อนที่เข้ามารวมกันที่บริเวณกึ่งกลางวัสดุ ต่อจากนั้นจึงทำการใส่พลังงานไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกเข้าไป โดยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อนและแรงดันไอขึ้นภายใน ช่วยไล่ความชื้นให้เคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าของวัสดุได้สะดวกขึ้น ซึ่งเห็นได้จากความชันในกราฟการอบแห้งที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

2.3 จุดสิ้นสุดของการอบแห้ง

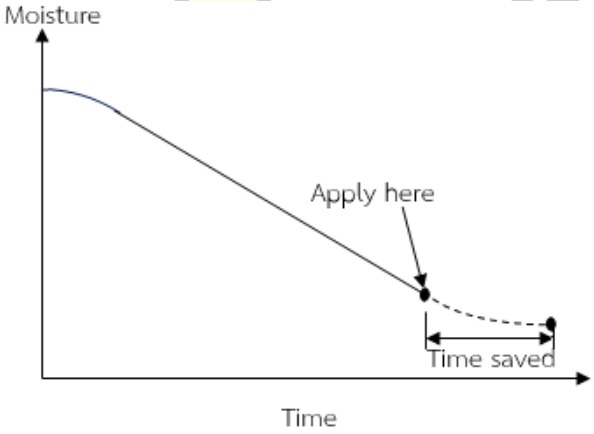
ด้วยเหตุผลที่ประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งแบบดั้งเดิมที่ลดลงมากเมื่อปริมาณความชื้นในวัสดุลดลงที่เวลาใกล้ช่วงสิ้นสุดของกระบวนการอบแห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 22 (c) ดังนั้นหากมีการใส่พลังงานไมโครเวฟหรือไดอิเล็กตริกที่ต่อเนื่องกับขั้นตอนการอบแห้งแบบดั้งเดิมทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการอบแห้งโดยรวมได้ และด้วยวิธีนี้จึงทำให้ปริมาณงานต่อเวลาที่ได้เพิ่มขึ้นและยิ่งมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อระบบมีการควบคุมความชื้นสุดท้าย เพื่อหลีกเลี่ยงการอบแห้งที่ใช้เวลานานมากจนเกินไป กล่าวโดยในภาพรวมด้วยวิธีการนี้ทำให้ช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งทั้งหมดและลดการใช้พลังงานเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิม



(a) การให้ความร้อนช่วงต้น



(b) การเร่งการอบแห้ง



(c) การเร่งการอบแห้ง

ภาพประกอบ 22 ความสัมพันธ์ของระบบการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟและไดอิเล็กตริก
ที่มา: ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551)

ปัจจัยที่มีอิทธิผลต่อคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย

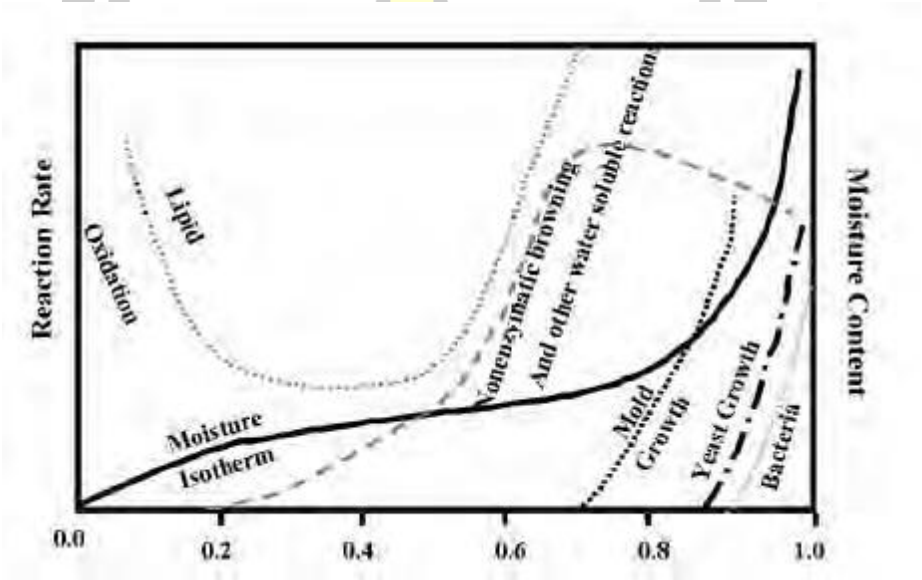
แมคคาเดเมียที่มีคุณภาพคือการรวมกันของรสชาติ เนื้อ กลิ่นและสีซึ่งทำให้ผู้บริโภคสนใจในผลิตภัณฑ์ Radspinner (1970) ในแง่ของการเจริญเติบโต แมคคาเดเมียที่มีคุณภาพขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์เนื้อใน น้ำหนักเมล็ดและผลผลิตที่สูง ปัจจัยที่กล่าวถึงส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต และการรับประทานเนื้อในที่มีคุณภาพ ส่วนนี้จะกล่าวถึงตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพเมล็ดแมคคาเดเมีย

1. ปริมาณความชื้น

Cavaletto et al. (1966) พบว่าเมื่อเมล็ดแมคคาเดเมียแห้งมีความชื้นประมาณร้อยละ 1.4 ฐานแห้ง จะสามารถเก็บรักษาได้นาน นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรสชาติและทางเคมีจะลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณความชื้นร้อยละ 2.3 และ 4.3 ฐานแห้ง การเปลี่ยนแปลงทางเคมีดังกล่าวรวมถึงการสะสมของกรดไขมันอิสระและน้ำตาลรีดิวซิ่งในเนื้อใน โดยที่ความชื้นสูงทำให้การเสื่อมสภาพของไขมันเกิดได้เร็ว นอกจากนี้ (Kowitz and Mason 2009) กล่าวว่า ความชื้นสูงจะเพิ่มสัดส่วนของสีน้ำตาลในเนื้อใน เนื่องจากน้ำมีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเสื่อมสภาพของเนื้อใน

2. ค่าน้ำอิสระ (a_W)

ปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์เป็นตัวชี้วัดของน้ำที่มีอยู่ได้อย่างอิสระและตอบสนองสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มันสามารถที่เกี่ยวข้องโดยตรงหรือโดยอ้อมกับความชื้น ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและค่าน้ำอิสระ
ที่มา: IFSQN (2008)

ค่าน้ำอิสระจะเป็นประโยชน์ในการทำนายการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีหลายอย่างที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเมทริกซ์อาหาร ดังแสดงในภาพประกอบ 23 นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า a_w มีผลต่อคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย โดยเก็บเมล็ดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า การเก็บเมล็ดที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.44 จะมีค่า เปอร์ออกไซด์ต่ำสุด การเก็บเมล็ดที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.63 จะมีค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุด (Dominguez et al., 2007)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง a_W กับอัตราการเน่าเสียของอาหาร พบว่า a_W เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณภาพและการเน่าเสียของอาหาร เพราะความชื้นในอาหารและค่า a_W จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีหรือปฏิกิริยาที่เร่งด้วยเอนไซม์อย่างช้าๆ

และมีการเจริญของจุลินทรีย์เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร ดังนั้นการลดปริมาณน้ำในอาหารให้น้อยลงเพื่อทำให้ค่า a_W ลดต่ำลง จึงเป็นการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี วิธีการลดปริมาณน้ำอาจใช้วิธีการอบแห้งแบบต่างๆ หรือการเติมตัวถูกละลายลงไป เช่น การเติมน้ำตาลลงไปในแยม หรือผลไม้แช่อิ่ม เป็นต้น

จุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญเมื่อ มีค่า a_W เท่ากับ 0.6 หรือต่ำกว่า เชื้อราจะหยุดการเจริญเมื่อ a_W มีค่าเท่ากับ 0.7 หรือต่ำกว่า และยีสต์จะเริ่มเจริญเติบโตได้ เมื่ออาหารมีค่า a_W อยู่ในช่วง 0.7 - 0.8 ส่วนแบคทีเรียจะเริ่มเจริญเมื่อค่า a_W มีค่ามากกว่า 0.8 มีรายละเอียดดังตาราง 5

ตาราง 5 ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น และค่า a_W ในอาหาร

อาหาร	**a_W**
น้ำแข็ง (0°C)	1.00*
เนื้อสด	0.985
ขนมปัง	0.96
น้ำแข็ง (-10°C)	0.91*
มาร์มาเลด	0.86
แป้งข้าวสาลี	0.72*
ลูกเกด	0.60
มะกะโรนี	0.45
ผงโกโก้	0.40
ลูกอม	0.30
บิสกิต	0.20
นมผง	0.11
มันฝรั่งทอด	0.08
ผลไม้สด ผักสด	0.97-1.00

*vapour pressure ของน้ำแข็ง/vapour pressure ของน้ำ

ที่มา : (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2553)

3. ลักษณะเนื้อสัมผัส

การเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสภายหลังการทำแห้งจะมีผลต่อคุณภาพของผักและผลไม้ การเคลื่อนย้ายของโมเลกุลน้ำในอาหารระหว่างการทำแห้งทำให้อาหารเหี่ยวและปริมาตรลดลง อุณหภูมิและอัตราการทำแห้งจะมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส ของอาหาร โดยการทำแห้งอย่างรวดเร็วและการใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสมากกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากในขณะทำแห้งจะมีการเคลื่อนที่ของน้ำและตัวละลาย ต่างๆ จากภายในอาหารออกสู่ผิวด้านนอก โดยกลไกและอัตราการเคลื่อนย้ายของตัวละลายแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและสภาวะที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อน้ำระเหยออกไปจะทำให้ตัวละลายมีความเข้มข้นที่ผิวมากขึ้น ถ้า

อากาศที่ใช้ในการทำแห้งมีอุณหภูมิสูงเกินไป จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพที่ซับซ้อนที่ผิวของอาหาร และผิวนอกของอาหารจะมีลักษณะแข็ง เรียกว่า การเกิดเปลือกแข็งที่ผิวนอก (case hardening) ซึ่งจะลดอัตราการทำแห้งของส่วนที่อยู่ในชิ้นอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่ได้มีผิวนอกแห้ง และภายในยังมีความชื้นอยู่สูง การทำลายเนื้อสัมผัสอย่างถาวร จะทำให้เกิดการหดตัว เมื่อแช่ในน้ำจะเกิดการดูดน้ำกลับคืนได้ไม่สมบูรณ์ เพราะท่อคาพิวลารีเสียสภาพและหดตัว ซึ่งมีผลกระทบจากการสูญเสียสภาพให้ซึมผ่านได้ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะมีคุณภาพใกล้เคียงกับผลไม้สด เนื่องจากท่อคาพิวลารี และโครงสร้างของผลไม้ถูกทำลายน้อย และสามารถเก็บรักษาสารอาหารสำคัญไว้ได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง

4. กลิ่นและรสชาติ

กลิ่นและรสชาติของผลไม้แห้งเป็นปัจจัยสำคัญในการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคในระหว่างกระบวนการแปรรูป ดังนั้นจึงต้องควบคุมให้มีการสูญเสียกลิ่นและรสชาติให้น้อยที่สุด ความผิดปกติของกลิ่นและรสชาติมักจะเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลที่ไม่อาศัยเอนไซม์ ในระหว่างการทำแห้งความร้อนจะทำให้สารให้กลิ่นระเหยออกไปด้วย ดังนั้นการสูญเสียสารให้กลิ่นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ และความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดในอาหาร ความดันไอของสารที่ระเหยได้ และความสามารถในการระลายน้ำ หากเป็นสารที่ระเหยง่ายมักจะสูญเสียตั้งแต่เริ่มการทำแห้ง ดังนั้นการควบคุมสภาวะที่ใช้ในการทำแห้งจะช่วยลดในการสูญเสียกลิ่น และรสชาติของอาหารได้

5. สี

เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของอาหารที่มีอิทธิพลต่อผู้บริโภค โดยสีธรรมชาติที่พบในผักและผลไม้ คือ แคโรทีนด์และคลอโรฟิลล์ การทำแห้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง ซึ่งมักจะเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารสี ได้แก่ เบต้า-แคโรทีน และคลอโรฟิลล์ โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากความร้อนและการเกิดออซิเดชันระหว่างการทำแห้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำแห้งที่ใช้เวลานาน และอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีได้ง่ายขึ้น และอาจมีปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเกิดขึ้นทั้งในระหว่างการทำแห้งหรือในระหว่างการเก็บรักษาหากยังมีกิจกรรมของเอนไซม์เหลืออยู่ปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเกิดขึ้น เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส ซึ่งจะเปลี่ยนโมเลกุลของสารประกอบ ฟินอลเป็นอนุพันธ์ควิโนน (quinone) ซึ่งเป็นโมเลกุลใหญ่และมีสีน้ำตาล ดังนั้นการรักษาสีธรรมชาติให้คงอยู่ระหว่างการทำแห้ง จึงมีความสำคัญยิ่งแคโรทีนอยด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยปฏิกิริยาออกซิเดชั่น เพราะโครงสร้างโมเลกุลของแคโรทีนอยด์มีพันธะคู่มาก ในสภาวะที่มีความชื้นต่ำคลอโรฟิลล์จะมีปริมาณค่อนข้างคงตัวระหว่างการทำแห้ง การเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์จึงขึ้นกับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด - เบส เวลา กิจกรรมของเอนไซม์ ออกซิเจน และแสง นอกจากนี้ยังพบว่า การเสื่อมสลายของคลอโรฟิลล์ที่ค่า a_w ต่ำกว่า 0.3 จะมีการเสื่อมสลายเกิดขึ้นอย่างช้าๆ

6. คุณค่าทางโภชนาการ

วิตามินแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายในน้ำได้แตกต่างกัน วิตามินซีไวต่อความร้อนและปฏิกิริยาออกซิเดชันมากที่สุด หากต้องการลดการสูญเสียสาระสำคัญในอาหารต้องใช้เวลาในการทำแห้งและเก็บรักษาที่สั้น ใช้อุณหภูมิต่ำ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (สิงหนาท พวงจันทร์แดง, 2555)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่จัดเป็นสาเหตุสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นเมื่ออาหารสัมผัสกับอากาศ เช่น ในระหว่างการลดขนาดหรือการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สำคัญได้แก่

6.1 เกิดการเปลี่ยนแปลงของไขมันไปเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และสารประกอบคาร์บอนิล และกรดไขมันสายสั้นๆ

6.2 ทำลายไขมันที่ไวต่อออกซิเจน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน เป็นขั้นตอนที่นำเมล็ดทั้งกะลาของแมคคาเดเมีย มาอบแห้งจนได้ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ โดยให้มีความชื้นร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อใน การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้ง ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

โสภา และ คำนึง (2546) ศึกษาการอบกล้วยน้ำว้าด้วยเตาอบไมโครเวฟดัดแปลง โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มและระยะเวลาให้พลังงานไมโครเวฟ อิทธิพลอัตราการหมุนเวียนอากาศกลับ อิทธิพลของระยะเวลาการอบ-พักเป็นช่วงๆ และยังศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคโดยการชิมผลิตภัณฑ์กล้วยอบที่ได้จากการอบ-พักเป็นช่วงๆ ซึ่งพบว่าเงื่อนไขการอบที่เหมาะสมคือ การอบด้วยอุณหภูมิลมร้อน 60 องศาเซลเซียส อัตราลมร้อนจำเพาะ 10 กิโลกรัม อากาศแห้งต่อชั่วโมงกิโลกรัมกล้วย ความเข้มไมโครเวฟ 0.11 วัตต์ต่อกรัม เปิดให้พลังงานไมโครเวฟ 15 วินาที และปิด 5 นาที สลับต่อเนื่องกันไป อัตราการหมุนเวียนอากาศกลับประมาณร้อยละ 60 และการอบนาน 9 ชั่วโมง-พัก 15 ชั่วโมง และการอบในเงื่อนไขนี้ สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 4.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม น้ำระเหย ใช้เวลาการอบนาน 28 ชั่วโมง (3 วัน ดำเนินการ) ส่วนลักษณะในการอบกล้วยน้ำว้าด้วยคลื่นไมโครเวฟ โดยให้กำลังความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟที่ระดับกำลังงาน 180 300 450 600 และ 800 วัตต์ หรือ 0.36 0.60 0.90 1.20 และ 1.60 วัตต์ต่อกรัม และระยะเวลาการให้ความร้อนที่ต่างกัน คือ 30 40 65 และ 135 วินาที พบว่า เวลาในการอบแห้งรวมจะลดลงตามระดับพลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์จะแตกปริและฉีกขาด เมื่อใช้ระดับพลังงานไมโครเวฟสูงและเกิดจุดไหม้สีน้ำตาลถึงดำกระจายทั่วไปในระดับพลังงานไมโครเวฟต่ำ

กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์ (2554) ศึกษาการอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 360 ฐานแห้ง ถึงความชื้นสุดท้ายร้อยละ 70 ฐานแห้ง อุณหภูมิอบแห้ง 65 องศาเซลเซียส ร่วมกับกำลังไมโครเวฟ 150 190 และ 240 วัตต์ และใช้ความเร็วลม พบว่า การใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนช่วยประหยัดพลังงานและลดเวลาการอบแห้ง เมื่อเทียบกับลมร้อน และพบว่าค่าความแข็งของเนื้อลำไยลดลง เนื่องจากผลของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้เนื้อลำไยมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น

Sumnu et al. (2005) ทำการอบแห้งแครอทแผ่นบางโดยใช้เครื่องไมโครเวฟไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนและการอบแห้งแบบอากาศร้อน ซึ่งการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนจะทำหลังจากการอบแห้งแครอทให้ได้ความชื้นที่ 0.47 กิโลกรัมน้ำต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง โดยเปรียบเทียบเวลาในการอบแห้ง การคืนรูปและสีของผลิตภัณฑ์ พบว่าการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่สภาวะกำลังงานไมโครเวฟสูงสุดร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งแบบอากาศร้อนร้อยละ 98 และผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดีกว่าการอบแห้งแบบอากาศร้อน ส่วนค่าสีของการอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับแสงจากหลอดฮาโลเจนจะมีค่า L* (Lightness) น้อยที่สุดค่า a* และ b* มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอื่นๆ และมีร้อยละการคืนรูปมากกว่าการอบแห้งแบบอากาศร้อน

Sharma and Prasad (2006) ศึกษาการอบแห้งกลีบกระเทียมโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่สภาวะต่างๆ คือใช้กำลังงานไมโครเวฟที่ 10 20 30 และ 40 วัตต์ ใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศร้อน 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที โดยศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ กลิ่น และวิตามินซี เปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอากาศร้อน จากการศึกษา พบว่าสภาวะการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่กำลังงานไมโครเวฟ 40 วัตต์ร่วมกับอากาศร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลมร้อน 1.0 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้กลีบกระเทียมอบแห้งมีคุณภาพดีที่สุดทั้งในด้านสี กลิ่น และปริมาณวิตามินซีที่เหลืออยู่ รวมทั้งมีการใช้กำลังงานไมโครเวฟน้อยที่สุด

Silva et al. (2006) ศึกษาการอบแห้งแมคคาดาเมียด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิอากาศร้อน 58-68 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟ (Brastemp model BMV 38-A) กำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ ใช้ 0.33 วัตต์ต่อกรัม ความเร็วอากาศร้อน 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าใช้เวลาในการอบแห้ง 4.5-5.5 ชั่วโมง ส่วนการอบแห้งด้วยอากาศร้อนใช้เวลา 144 ชั่วโมง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟสามารถอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนแบบเดิม โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยนี้ไม่ส่งผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ และปริมาณกรดไขมันอิสระของแมคคาดาเมีย และนอกจากนี้ได้ศึกษาคุณภาพหลังการเก็บรักษา 6 เดือน พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์ ค่ากรดไขมันอิสระ และการประเมินทางประสาทสัมผัส อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ (10 meq O_2/kg)

Alibus (2007) ศึกษาการอบแห้งแผ่นฟักทองด้วยวิธีไมโครเวฟร่วมอากาศร้อนและแบบการใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยใช้ไมโครเวฟ 160 และ 350 วัตต์ ใช้อุณหภูมิอากาศร้อนในการอบแห้ง 50 และ 75 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วอากาศ 1 เมตรต่อวินาที พบว่าอัตราการอบแห้งของการใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนสูงกว่าการใช้ไมโครเวฟหรืออากาศร้อนเพียงอย่างเดียว โดยที่สภาวะพลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับอากาศร้อน 75 องศาเซลเซียส ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือสภาวะพลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส และการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งต่ำสุดส่วนค่าสีที่ดีที่สุด (ค่า L* สูงที่สุด) คือ สภาวะพลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ร่วมกับอากาศร้อน 75 องศาเซลเซียส การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำที่สุดในแง่ของการใช้พลังงานที่สภาวะพลังงานไมโครเวฟ 350 วัตต์ ร่วมกับอากาศร้อน 75 องศาเซลเซียส ใช้

พลังงานต่ำที่สุด และการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานมากที่สุด

Bondaruk et al. (2007) ทำการอบแห้งมันฝรั่งด้วยเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอากาศร้อน ที่กำลังงานของไมโครเวฟที่ 480 วัตต์ และแปรผันความดันของสุญญากาศที่ 6 12 18 และ 24 กิโลปาสกาล พบว่าเวลาในการอบแห้งของเครื่องไมโครเวฟสุญญากาศเร็วกว่าการอบแห้งแบบอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ประมาณ 6 เท่า และจากการศึกษาคุณภาพของมันฝรั่งอบแห้งในด้านส่วนประกอบ ค่าสี สมบัติด้านกายภาพและโครงสร้าง พบว่าขึ้นอยู่กับความเป็นสุญญากาศของเครื่องไมโครเวฟที่สภาวะความดันสุญญากาศ 24 กิโลปาสกาล จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดและให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆดีที่สุด

Varith et al. (2007) ทำการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยทดลองใช้เนื้อลำไยพันธุ์ดอ 500 กรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 495 ฐานแห้ง อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 18 ปรับอุณหภูมิอากาศร้อน 3 ระดับคือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส กำลังงานไมโครเวฟ 4 ระดับคือ 100 180 300 และ 450 วัตต์ ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งแบบลำดับขั้นซึ่งใช้อากาศร้อนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ระดับกำลังงานไมโครเวฟ 450 วัตต์เป็นเวลา 1.7 ชั่วโมง ตามด้วยอากาศร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระดับกำลังงานไมโครเวฟ 300 วัตต์ เป็นเวลา 3.3 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุดโดยมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ 0.96 กิโลกรัม น้ำต่อชั่วโมง-กิโลกรัมของแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส การใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนแบบลำดับขั้นสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ร้อยละ 64.2 และลดอัตราการสิ้นเปลืองกำลังงานจำเพาะได้ร้อยละ 45.6 เนื้อลำไยอบแห้งที่ได้มีลักษณะเป็นสีเหลืองทองมีค่า L* = 53.89, a* = 4.70 และ b* =14.74

Wang et al. (2007) ศึกษาการอบแห้งแผ่นแอบเปิลโดยใช้อากาศร้อน (ใช้อากาศร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส) และใช้อากาศร้อนก่อนอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 150 300 450 และ 600 วัตต์ พบว่าการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนก่อนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งเร็วกว่าการอบแห้งโดยไม่ใช้อากาศร้อนก่อนการอบแห้งประมาณ 3 เท่า

Demirhan and Ozbek (2009) ศึกษาผลของจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของการอบแห้งใบโหระพาด้วยไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 180 360 540 720 และ 900 วัตต์ และน้ำหนักตัวอย่างทดสอบ 100 กรัม พบว่าค่า L* และ b* มีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นของแต่ละกำลังไมโครเวฟ และค่ากำลังไมโครเวฟ 900 วัตต์ มีค่า L* ต่ำสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงสีความสว่างลดลงของใบโหระพาอบแห้ง เกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ส่วนค่า a* จะมีความเป็นสีเขียวลดลงเข้าสู่เป็นสีแดงมากขึ้น เมื่อกำลังไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและค่า L* และ b* มีแนวโน้มลดลง เมื่อกำลังไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Li et al. (2010) ศึกษาสภาวะการควบคุมพลังงานที่เหมาะสมในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ วัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบอัตโนมัติต่อเนื่องและสามารถปรับพลังงานไมโครเวฟได้ ควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างและมวลตัวอย่าง การอบแห้งแอปเปิลใช้ 3 อุณหภูมิ คือ 55 65 และ 75 องศาเซลเซียส และพลังงานไมโครเวฟ 320 240 และ 400 วัตต์ พบว่าการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (real-time) ในการอบแห้งจะส่งผลต่อความผันผวนของอุณหภูมิ

ต่ำสุดเมื่อเทียบกับแบบต่อเนื่อง (linear power) และสามารถปรับพลังงานไมโครเวฟได้ (three-step power) ใช้เวลาสั้น และประหยัดพลังงาน

Sharifian, Motlagh and Nikbakht. (2012). ศึกษาการอบแห้งจลพลศาสตร์ของอัตราส่วนไมโครเวฟ (วัตต์ต่อกรัม) ของผลมะเดื่อ โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 1.5 2 2.5 3 3.5 และ 4 วัตต์ต่อกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 25 ฐานเปียก ใช้ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที คงที่ตลอดการทดลอง ผลการทดลองพบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งจะเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากช่วงนี้เป็นช่วงให้ความร้อน (warming-up period) และเป็นช่วงของการใช้พลังงานสำหรับเพิ่มความร้อนหรืออุณหภูมิของวัสดุอบแห้งเป็นหลัก ถัดไปช่วงที่สองปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เวลาการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น การอบแห้งช่วงนี้เป็นแบบอัตราคงที่ (constant-rate period) และพลังงานส่วนใหญ่จะในการระเหยความชื้นของวัสดุอบแห้งเป็นหลัก และยังพบว่าการอบแห้งในช่วงอัตราลดลง มีน้อยมากสำหรับการอบแห้งมะเดื่อ อาจจะเกิดจากพลังงานเกิดการแพร่อย่างรวดเร็วผ่านวัสดุอบแห้ง ซึ่งช่วยในการระเหยความชื้น นั้นเอง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยเทคนิคอื่นๆ

ตวงทรัพย์ จงใจภักดิ์ (2555) ได้ศึกษาการอบแห้งและคุณภาพของแมคคาเดเมียอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยใช้อุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วง 50 ถึง 150 กิโลโวลต์ต่อเมตร ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 26-30 ฐานแห้ง และสิ้นสุดที่ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3-4 ฐานแห้ง พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าความสว่างต่ำ การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ค่าเปอร์ออกไซด์มีค่าลดลงตามความเข้มสนามไฟฟ้า และอุณหภูมิและสนามไฟฟ้าไม่มีผลต่อค่าน้ำอิสระและค่าความแข็งของเนื้อใน แต่ขึ้นอยู่กับความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้สนามไฟฟ้า พบว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า จะทำให้เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนมีสมรรถนะเพิ่มขึ้นและสิ้นเปลืองพลังงานน้อยลง

ชยพัทธ์ ภูสำเภา (2557) ศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ที่ความความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 16 ฐานเปียก และอบแห้งจนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3 ฐานเปียก ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมล็ดแมคคาเดเมียจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

Prichavudhi and Yamamoto (1987) ศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมีย ที่ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 28 ฐานแห้ง โดยใช้ตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิและใช้ลมร้อนเป็นตัวทำให้มีการไหลเวียนอากาศ ที่อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 52 60 และ 71 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส จนถึงความชื้นสมดุลขั้นตอนนี้ใช้เวลา 3 วัน หลังจากนั้นวิเคราะห์คุณภาพของเมล็ด พบว่า การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียที่มีความชื้นสูงมากโดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นสูงจะส่งผลให้เกิดสีน้ำตาลภายในเมล็ดสูง

Kowitz (2004) ศึกษาการอบแห้งแมคคาดาเมียด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิห้อง 30 35 40 45 และ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศ 0.6 เมตร/วินาที ความหนาของชั้นอบแห้ง 1 เมตร

สามารถอบแมคคาดาเมียได้ประมาณ 60 กิโลกรัม ใช้เวลาในการอบแห้ง 9-13 วัน พบว่าการอบแห้งแมคคาดาเมียความชื้นสูง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมล็ดจะเกิดสีน้ำตาลหลังการคั่ว

Mason and Wills (2000) รายงานว่าการอบแห้งเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการแปรรูปของเมล็ดแมคคาเดเมีย การดำเนินการอบแห้งจะเริ่มหลังจากการเก็บเกี่ยวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลิ่น และการพัฒนาเครื่องอบแห้งในการทำให้เมล็ดมีความชื้นประมาณร้อยละ 1.5 ฐานแห้ง สามารถเก็บไว้ได้ถึงหนึ่งปี โดยไม่ต้องสูญเสียอย่างมีนัยสำคัญในด้านคุณภาพ

Sharma and Prasad (2006) ได้ศึกษาการอบแห้งกระเทียมกลีบด โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน พบว่าความเร็วลมในการอบแห้งมีผลต่อการพาความชื้นที่บริเวณผิวของกระเทียม ส่งผลให้มีเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าเมื่อเทียบกับไม่มีความเร็วลม

Dominguez et al. (2007) ศึกษาค่าของ a_w ต่อคุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย โดยเก็บรักษาแมคคาเดเมียที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า ค่า a_w ของแมคคาเดเมียมีค่าเท่ากับ 0.44 จะมีค่าเปอร์ออกไซด์ต่ำที่สุด และเมื่อเก็บเมล็ดแมคคาเดเมียที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.63 จะมีค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุด ส่วนค่าความแข็งของเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมียที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.22 จะมีความแข็งมากสุด และการเก็บรักษาที่ a_w เท่ากับ 0.63 จะมีความแข็งน้อยสุด นอกจากนี้พบว่า ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.36-0.44 จะเป็นช่วงที่เมล็ดแมคคาเดเมียมีอัตราเกิดการเสื่อมน้อยที่สุดและเหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา

Borompichaichartkul et al. (2009) ศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมีย โดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับอากาศร้อน มีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ใช้ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 20 ฐานแห้ง ขั้นตอนแรก อบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนความชื้นลดลงเท่ากับร้อยละ 8.7 และ 11ฐานแห้ง และหลังจากนั้นใช้อากาศร้อนอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 50 และ 70 องศาเซลเซียส จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 1.5-2.7 ฐานแห้ง พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์ อยู่ในช่วง 4 – 14 (meq O_2/kg oil) นอกจากนี้ พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของการอบแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นที่สูง จะส่งผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันให้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูง แต่ยังอยู่มาตรฐานของ (TISI, 2006) ส่วนค่า a_w จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.58-0.69

Vongpradubchai and Rattanadecho (2009) ได้ศึกษาการอบแห้งไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน พบว่าปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในไม้สูง ส่งผลให้อุณหภูมิไม้สูง เนื่องจากมีการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟสูง

Ozbek and Dadali (2007) ศึกษาการอบแห้งใบสะระแหน่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่ระดับ 180-900 วัตต์ ร่วมกับอุณหภูมิลมร้อน 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงอัตราการอบแห้ง 0.57-3.08 กรัมต่อนาที ส่งผลให้เกิดอัตราการอบแห้งแบบคงที่ เมื่อพิจารณาที่กราฟพบว่ามีความชันและใช้เวลาในการอบแห้งน้อย

Srichamnong (2010) ศึกษาผลกระทบของสภาพการเก็บรักษาเมล็ดแมคคาเดเมียสายพันธุ์ 246 ถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 10 และ 15 องศาเซลเซียส แต่ละตัวอย่างจะถูกเก็บไว้ในถุงสุญญากาศ เป็นระยะเวลา 2 เดือน และวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ค่าเปอร์ออกไซด์ลดลงเมื่อเทียบกับ 10 และ 15 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการ

เปลี่ยนแปลงไขมันมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส สารประกอบหลักที่พบในเมล็ดแมคคาเดเมียทั้งสดและคั่วคือ ไฮโดรคาร์บอนดีไฮด์ และคีโตนการเก็บรักษาวัสดุในถุงสุญญากาศ

Warangkana (2012) พบว่า ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเก็บรักษาของเมล็ดแมคคาเดเมีย พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุดจะพบที่ตัวอย่างอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเก็บรักษาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงย่อยสลายไขมันไม่อิ่มตัวและเกิดการหืนโดยออกซิเดชัน

Nimmanpipug and Therdthai (2013) ศึกษามะละกออบแห้งด้วยไมโครเวฟ พบว่า การอบแห้งมะละกอด้วยไมโครเวฟส่งผลให้มีโครงสร้างภายในมีความพรุนสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เป็นผลให้เกิดค่าความแข็งต่ำกว่า

Wang et al. (2013) ศึกษาการพัฒนาการอบแห้งด้วยคลื่นความถี่วิทยุร่วมกับอากาศร้อนสำหรับเมล็ดทั้งกะลาของแมคคาเดเมีย เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของแมคคาเดเมีย โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ 27.12 เมกะเฮิรซ์ ระยะ electrode gap เท่ากับ 15.5 เซนติเมตร อุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์และกรดไขมันอิสระขึ้นอยู่กับเวลาการอบแห้ง แต่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ตามมาตรฐาน

Walton and Wallace (2015) ศึกษาผลของความชื้นเมล็ดแมคคาเดเมียต่อคุณภาพสีความสว่างของเนื้อใน โดยทำการคั่ว (roasting) เมล็ดที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 12 และ 23 ฐานเปียก ตามลำดับ จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3 ฐานเปียก แล้วทำการเปรียบเทียบคุณภาพสีของเนื้อใน ผลการทดลองพบว่า คั่วที่ความชื้นร้อยละ 12 ฐานเปียก มีค่าสีของเนื้อในสูงกว่า

Pankaew et al. (2016) ศึกษาการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยอากาศร้อนร่วมกับความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้อุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 20 และ 30 ความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาที ผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งของเมล็ดแมคคาเดเมียจะสูง เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ และส่งผลให้เวลาในการอบแห้งสั้น

Li et al. (2018) ศึกษาการอบแห้งลิกไนต์ด้วยไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 450-600 วัตต์ พบว่า ที่กำลังไมโครเวฟสูงจะมีการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็ว และสัมประสิทธิการแพร่สูงกว่ากำลังไมโครเวฟที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดการอบแห้งใช้ระยะเวลาสั้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนส่วนใหญ่อบแห้งผลิตผลทางการเกษตร เช่น แมคคาดาเมีย แครอท กระเทียม ลูกพีช ฟักทอง มันฝรั่ง ลำไย แอบเปิล ถั่วลิสง มันสำประหลัง ใบสะระแหน่ และกล้วยน้ำว้า เป็นต้น จุดเด่นที่สำคัญของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนคือ สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีการอบแห้งเฉพาะวัสดุที่ทำการอบแห้งเท่านั้น ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบอากาศร้อนทั่วไป และไม่ต้องใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงมากนัก ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิในการอบแห้งสูงเกินไปอาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เสียไป

จากข้อมูลงานวิจัยดังกล่าว จึงนำไปสู่การวิจัยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยใช้เงื่อนไขการทดลองตามข้อมูลที่กล่าวมา เพื่อศึกษาจลพลศาสตร์การอบแห้ง ค่าสี ค่าความแข็ง ค่าน้ำอิสระ ค่าเปอร์ออกไซด์ ของเมล็ดแมคคาเดเมีย และการเปรียบเทียบการใช้พลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนด้วยวิธีการควบคุมอุณหภูมิของแมคคาเดเมีย มีหัวข้อดังต่อไปนี้

1. การออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ
2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. การออกแบบการทดลอง
4. การดำเนินการทดลอง
5. การวิเคราะห์ผล

การออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟ

แนวทางในการออกแบบระบบนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตู้อบไมโครเวฟให้สามารถอบแห้งโดยกำหนดอุณหภูมิในการอบแห้งให้คงที่ได้ จากแนวคิดนี้จะใช้อุปกรณ์สำหรับการพัฒนาตู้อบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์มาประยุกต์ใช้ในการอบแห้ง โดยกำหนดให้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

มีรายละเอียดดังนี้

1.1 ตู้อบแห้งไมโครเวฟ ยี่ห้อ Samsung รุ่น ME81Y ขนาดความจุ 23 ลิตร 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์

1.2 เครื่องชั่งน้ำหนัก (electronic balance) รุ่น WT30002FC Precision: 0.01g

1.3 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (temperature sensor) รุ่น TPA 81 Accuracy: ±2˚C

1.4 กล่องควบคุมระบบอัตโนมัติ 1 ชุด

1.5 ขดลวดทำความร้อน (heater)

1.6 เครื่องเป่าลม (blower)

1.7 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (data logger) รุ่น MX 100 มี 40 channel

1.8 เครื่องปรับความเร็วอากาศ อินเวอร์เตอร์ (inverter)

1.9 คอมพิวเตอร์ ใช้คำนวณผลบันทึกข้อมูลอุณหภูมิแบบต่อเนื่องอัตโนมัติด้วยโปรแกรมซอฟแวร์ MX-100 Standard Yoko kava

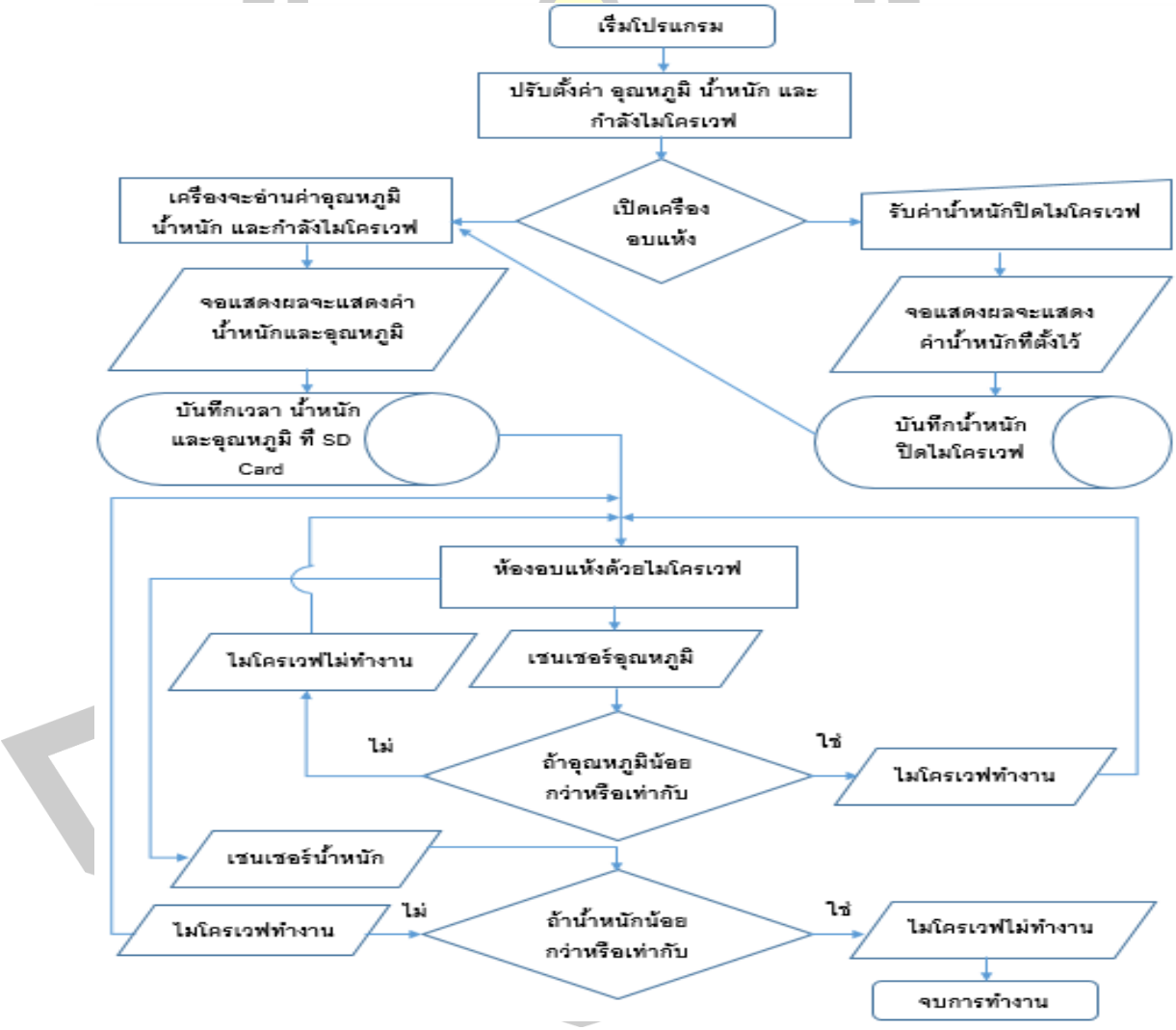
2. แนวทางการพัฒนาเครื่องไมโครเวฟสำหรับการอบแห้งร่วมกับอากาศร้อน

ไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อ Samsung รุ่น ME81Y ขนาดความจุ 23 ลิตร ซึ่งใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์ ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ กำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าสูงสุด 1,250 วัตต์ กำลังไฟฟ้าจ่ายออกสูงสุด 850 วัตต์ และขดลวดทำความร้อน ขนาด 1,000 วัตต์ มีการดัดแปลงระบบไมโครเวฟโดยการควบคุมการ เปิด/ปิด กำลัง

ไมโครเวฟ และมีการควบคุมอุณหภูมิที่ผิววัสดุในระหว่างการอบแห้ง วัดการใช้กระแสไฟฟ้าในการทดลองโดยใช้มิเตอร์ไฟฟ้า จากนั้นเจาะฝาไมโครเวฟทั้งด้านหน้าและด้านหลังเพื่อให้อากาศร้อนผ่านเข้าไปในเครื่องไมโครเวฟ

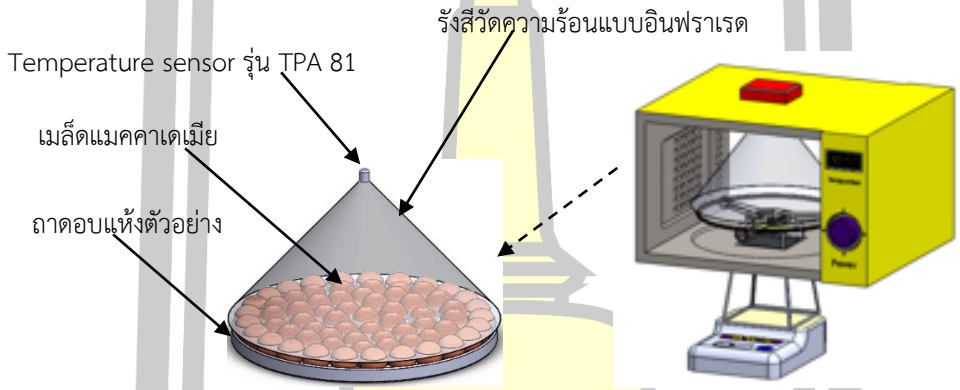
3. การควบคุมอุณหภูมิผิววัสดุในการอบแห้งของเตาอบไมโครเวฟ

มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของเตาอบไมโครเวฟเชิงพาณิชย์ทั่วไป ซึ่งไม่สามารถกำหนดค่าอุณหภูมิในการอบแห้งได้ตามต้องการ จึงออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย หลักการในการทำงานคือ การอบแห้งจะอาศัยการป้อนกลับค่าอุณหภูมิบนผิววัสดุในขณะที่ทำการอบแห้ง และนำอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียในขณะที่ทำการอบแห้งมาใช้ควบคุมกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟ ซึ่งมีแผนภาพการทำงานของระบบดังแสดงในภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 แผนภาพการทำงานการควบคุมอุณหภูมิผิวคงที่และน้ำหนักตัวอย่างในการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

จากภาพประกอบ 24 กระบวนการควบคุมอุณหภูมิเริ่มจากการเปิดสวิตช์หลัก (main switch on) เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ จากนั้นกำหนดค่าอุณหภูมิ (temp set) และปรับค่ากำลังของไมโครเวฟ (Microwave power set) ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตการทดลอง เมื่อกดสวิตช์เริ่มกระบวนการอบแห้ง (switch drying on) เครื่องไมโครเวฟจะเริ่มทำงานโดยมีเซนเซอร์วัดอุณหภูมิทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิบนผิววัสดุภายในห้องอบแห้งตลอดระยะเวลาของการอบแห้ง ซึ่งมีหลักการวัดอุณหภูมิผิวของวัสดุ คือ การตรวจวัดรังสีความร้อนจะเป็นแบบอินฟราเรด มีช่วงความยาวคลื่น 2 ถึง 22 ไมโครเมตร มีองศาวัดรังสีความร้อน 83 องศา นอกจากนี้ยังมีหัวตรวจวัดอุณหภูมิผิวภายในหัวเซนเซอร์ 8 จุด ที่ทำการวัดค่าอุณหภูมิผิวพร้อมกัน ซึ่งค่าอุณหภูมิผิวที่ได้จะเป็นค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ย จากนั้นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิจะส่งสัญญาณอุณหภูมิผิวไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลรังสีความร้อน และค่าอุณหภูมิผิวที่ได้มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส โดยช่วงอุณหภูมิสำหรับใช้งานมีค่าตั้งแต่ -4 ถึง 100 องศาเซลเซียส แสดงในดังภาพประกอบ 25



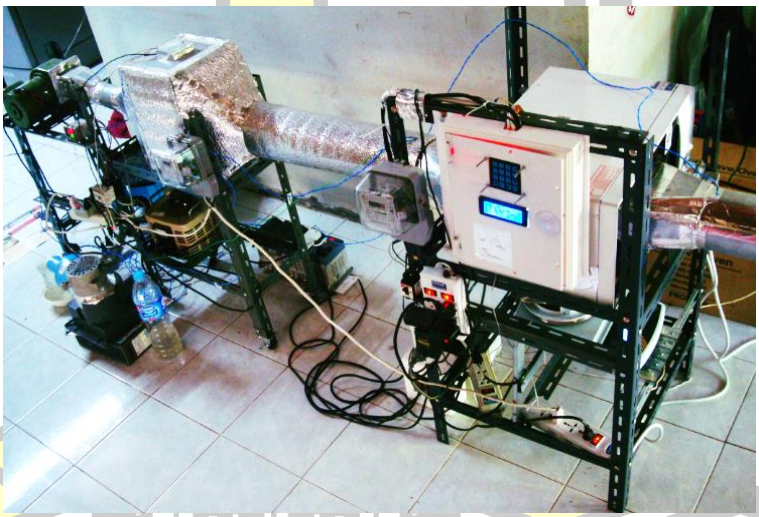
ภาพประกอบ 25 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิผิววัสดุภายในห้องอบแห้ง

ระหว่างทำการอบแห้งไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ควบคุม 2 ระบบ คือ ระบบการควบคุมอุณหภูมิผิวและการควบคุมน้ำหนักตัวอย่างในระหว่างการอบแห้ง หลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ประมวลผลเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดจากผิววัสดุกับค่าอุณหภูมิที่ใช้อบแห้งตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ถ้าอุณหภูมิผิวมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่กำหนด (temp sensing ≥temp set) ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งคำสั่งให้หยุดการทำงานของไมโครเวฟ (แต่ในสภาวะนี้ การตรวจวัดน้ำหนักตัวอย่างด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ รุ่น TPA 81 บริษัท ดิเวนเทค (Devantech) จำกัด ที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ยังทำงานปกติ) และไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจจับอุณหภูมิของผิววัสดุตลอดเวลา หากอุณหภูมิผิวต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งคำสั่งให้ไมโครเวฟทำการอบแห้งจนกว่าอุณหภูมิจะเท่ากับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และการควบคุมน้ำหนักตัวอย่างในระหว่างการอบแห้งจะมี RS232 ซึ่งเป็นสัญญาณอยู่ในเครื่องชั่งน้ำหนัก ทำหน้าที่ส่งสัญญาณน้ำหนักที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ไมโครเวฟหยุดทำงาน (แต่ในสภาวะนี้ การควบคุมอุณหภูมิผิวและการ

ตรวจวัดน้ำหนักตัวอย่าง จะหยุดทำงานพร้อมกัน) เมื่อน้ำหนักเมล็ดแมคคาเดเมียเท่ากับน้ำหนักสุดท้ายของการอบแห้งที่กำหนดไว้ในเงื่อนไขการทดลอง คือ ความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง

ในการทำงานของเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนได้ออกแบบให้การชั่งน้ำหนักเมล็ดแมคคาเดเมียให้เป็นแบบอัตโนมัติ ทำหน้าที่ชั่งน้ำหนักในระหว่างการอบแห้ง เครื่องชั่งติดตั้งไว้นอกห้องอบแห้ง เพื่อป้องกันคลื่นไมโครเวฟรบกวนการชั่งน้ำหนักของวัสดุที่อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่เครื่องชั่งและผลการวัด ในระหว่างทำการอบแห้งและมีการแสดงผลของน้ำหนักในรูปแบบของจอแสดงผลและบันทึกน้ำหนักอัตโนมัติซึ่งจะบันทึกได้ 90 นาที ในระหว่างการอบแห้งนั้นถาดรองเมล็ดของแมคคาเดเมียจะหมุนให้เมล็ดทั้งกะลาได้รับคลื่นไมโครเวฟอย่างทั่วถึง เพื่อให้เมล็ดได้รับอุณหภูมิเท่ากัน

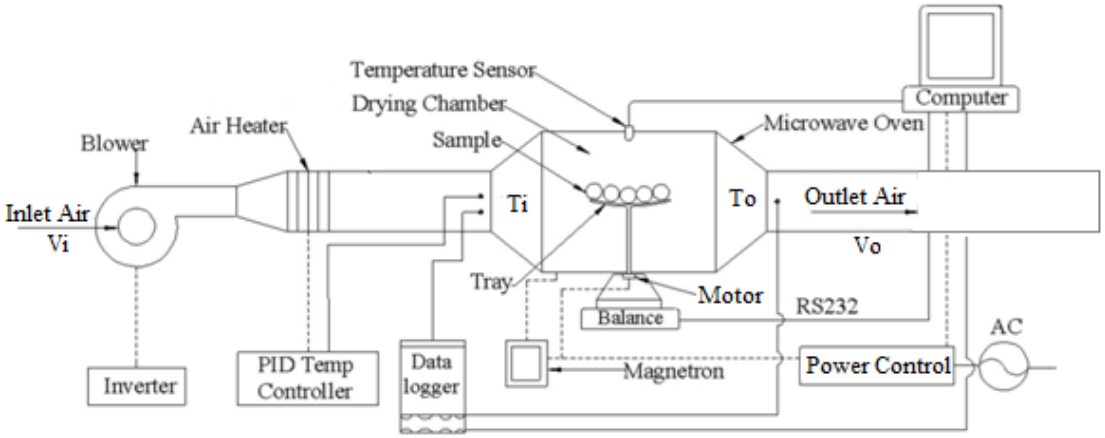
สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน คือ การรั่วไหลของคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งถือว่าเป็นอันตรายต่อมนุษย์ การออกแบบเครื่องอบแห้งจากไมโครเวฟในเชิงพาณิชย์ จึงออกแบบให้แกนมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ติดตั้งถาดรองรับเมล็ดแมคคาเดเมียอยู่ด้านล่างของเครื่อง โดยเจาะรูปสำหรับติดตั้งแกนมอเตอร์ และใช้ตาข่ายกรองคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสาเหตุที่เลือกด้านล่างในการติดตั้งเนื่องจากปลอดภัยกับผู้ใช้และสะดวกในการติดตั้งแกนมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ติดตั้งถาดรองรับเมล็ดแมคคาเดเมีย ดังภาพประกอบ 26



ภาพประกอบ 26 เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

5. วงจรการควบคุมของระบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

วงจรการควบคุมแสดงในภาพประกอบ 28 มีการควบคุมอุปกรณ์ต่าง เช่น พัดลม ขดลวดความร้อน อุณหภูมิผิวเมล็ด น้ำหนักแมคคาเดเมีย ควบคุมกำลังไฟฟ้า วัดอุณหภูมิเข้า (T_i) และออก (T_o) วัดความเร็วอากาศเข้า (V_i) และออก (V_o) และมีการบันทึกอุณหภูมิเข้าและออกของอากาศร้อนด้วย data logger ด้วยโปรแกรมซอฟแวร์ mx-100 standard yoko kava ที่ติดตั้งในคอมพิวเตอร์

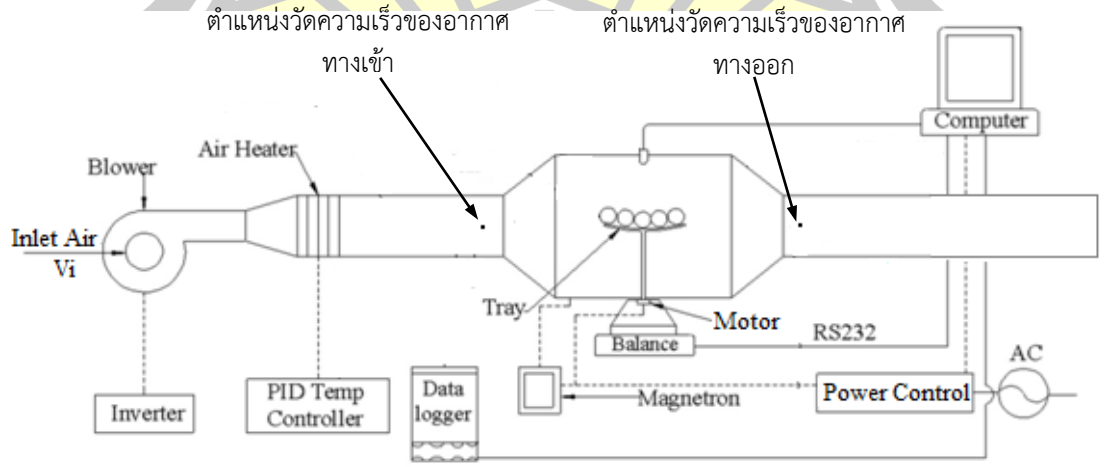


ภาพประกอบ 27 วงจรการคบคุมของระบบเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่งรุ่น WT30002FC Precision: 0.01g
2. เครื่องมือวัดความเร็วอากาศยี่ห้อ Testo รุ่น 445 ค่าความผิดพลาด ±0.2 %
3. เทอร์โมคัปเปิล แบบ K
4. มิเตอร์ไฟฟ้า รุ่น DD28 ค่าความผิดพลาด ±2 %
5. เครื่องวัดสี Color Flex (Hunter รุ่น 45/0, USA)
6. เครื่องวัด Water activity (Aqua Lab รุ่น Aqua Link 3.0, USA)
7. เครื่องวัดความแข็ง รุ่น TA.XT. plus
8. เครื่องมือวัดอุณหภูมิยี่ห้อ Testo รุ่น 826-T4

ตำแหน่งการวัดค่าความเร็วอากาศในการอบแห้ง



ภาพประกอบ 28 ตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศทางเข้า-ออก

รายละเอียดในการคำนวณหาตำแน่งการวัดความเร็วของอากาศที่ทางเข้าและออก ดังแสดงในภาคผนวก ฉ

การวิเคราะห์ความเร็วลมในห้องอบแห้ง

1. การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านท่อ (Q)

จากสมการ $$Q = V_1 A_1 \quad (10)$$

เมื่อ V_1 คือ ความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อ m/s

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ m^2

แทนค่าในสมการ จะได้

$$= 5 \text{ m/s x } (\frac{\pi}{4}(0.12)^2$$

$$Q = 0.056 \text{ } m^3/s$$

2. การคำนวณหาความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง (V_2)

จากสมการ $$V_2 = \frac{Q}{A_2}$$

เมื่อ A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง m^2

แทนค่าในสมการ จะได้

$$= \frac{0.056}{0.185x0.305}$$

$$V_2 = 0.99 \text{ m/s}$$

การออกแบบการทดลอง

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง

การทดลองที่ 1 การอบแห้งแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียเงื่อนไขในการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟกำลังสูงสุด 850 วัตต์ และควบคุมอุณหภูมิผิวที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน ที่อากาศแวดล้อม 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดย

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 6 และมีการเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบบางส่วน (Fractional Factorial Designs)

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบบางส่วน หมายถึง วิธีที่ผู้ทำการทดลองไม่ต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าทุกปัจจัย เนื่องจากจะมีจำนวนหน่วยทดลองที่ต้องทำการวิเคราะห์มากเกินไป จนทำให้ไม่สามารถควบคุมตัวแปรหรืออิทธิพลต่างๆ ได้ครบถ้วน แน่นอนว่าความแม่นยำของผลก็ไม่เท่ากับ full factorial ในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติถึงเราจะสามารถดำเนินการทดลองด้วยวิธี full factorial แต่อาจจะได้ผลที่แย่กว่าการออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial Designs ก็ได้ เนื่องจากยิ่งมากปัจจัย(Factor) ยิ่งมากจำนวนหน่วยตัวอย่างก็ยิ่งควบคุมการทดลองได้ยาก ความผิดพลาดก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่มีประโยชน์ที่จะยังยืนยันใช้การทดลอง full factorial เมื่อเรามีปัจจัยที่ต้องใช้หลายตัว นักสถิติได้ค้นพบว่าในความเป็นยิ่งเมื่อเราดำเนินการทดลองจะมีเพียงบาง Main effects และบาง interaction เท่านั้นที่มีความสำคัญ ยิ่งลำดับของ interaction สูงขึ้นโอกาสที่จะมีนัยสำคัญก็จะน้อยลง จึงได้นำเอาแนวคิดนี้ไปใช้เพื่อลดขนาดของการทดลองและทำให้ศึกษาเฉพาะ Main effects และบาง interaction ที่คาดว่าจะมีความสำคัญเท่านั้น

ในทางทฤษฎี ถ้าสัดส่วนของ Main effects ต่อ effects ทั้งหมดจะยิ่งลดลงเรื่อยๆ เมื่อการทดลองยิ่งมีจำนวน factor มาขึ้น สัดส่วนของผลที่มาจาก Main effects จะมีน้อยเมื่อเทียบกับ interaction ซึ่งยิ่งลำดับของ interaction สูงเท่าใดก็จะมีความสำคัญน้อยลงเท่านั้น ดังนั้น จึงจะศึกษาเฉพาะ Main effects และ interaction บางตัว

ตาราง 6 เงื่อนไขการอบแห้งแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Testing condition		Symbol
STC (˚C)	Hot air temperature (˚C)	
60	-	MW+STC60 ˚C$_{control}$
	Ambient (30)	MW+STC60 ˚C+T$_{ambient}$
	40	MW+STC60 ˚C+HA40 ˚C
	50	MW+STC60 ˚C+HA50 ˚C
	60	MW+STC60 ˚C+HA60 ˚C
	70	MW+STC60 ˚C+HA70 ˚C
70	50	MW+STC70 ˚C+HA50 ˚C
	60	MW+STC70 ˚C+HA60 ˚C
80	60	MW+STC80 ˚C+HA60 ˚C
HA60˚C	60	HA60˚C

หมายเหตุ; STC = Surface temperature control, MW = Microwave power, HA = Hot air

การทดลองที่ 2 การอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย

การทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial) 4 x 3 โดยปัจจัยที่ 1 คือ กำลังไมโครเวฟ มี 4 ระดับ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม** และปัจจัยที่ 2 คือ อุณหภูมิอากาศร้อน มี 3 ระดับ ได้แก่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ในแผนการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยมีการเขียนรายละเอียดของเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 7

** วิธีการคำนวณหากำลังวัตต์จำเพาะ (Specific power)

โดยทั่วไปไมโครเวฟมีการเปิดและปิด เพื่อควบคุมการใช้งานของกำลังไมโครเวฟ ซึ่งกำลังไมโครเวฟที่เกิดขึ้นจริง สามารถคำนวณหากำลังวัตต์ได้โดยใช้สมการของ calorimetric ซึ่งในการคำนวณหาค่ากำลังวัตต์ในที่นี้ จะใช้น้ำและภาชนะที่ใส่น้ำเป็นวัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ทำให้เกิดความร้อน แล้วหารด้วยเวลา ซึ่งจะได้กำลังไมโครเวฟ (*MP*) ดังรายละเอียดในสมการ

$$MP = \frac{4.18(m_w C_{p,w} \Delta T_w) + (m_g C_{p,g} \Delta T_g)}{t} \quad (11)$$

เมื่อ m_w คือ น้ำหนักน้ำ (g)

$C_{p,w}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg˚C)

ΔT_w คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ (˚C)

m_g คือ น้ำหนักภาชนะ (g)

m_m คือ น้ำหนักตัวอย่าง (g)

$C_{p,g}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของภาชนะ (kJ/kg˚C)

ΔT_g คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของภาชนะ (˚C)

t คือ เวลา (min)

** การหากำลังวัตต์จำเพาะ เมื่อได้กำลังไมโครเวฟจากสมการข้างต้นออกมาแล้วหารด้วยน้ำหนักเมล็ดแมคคาเดเมียที่ใช้ในการอบแห้ง ดังรายละเอียดในสมการ

$$\text{Specific power} = \frac{MP}{m_m} \quad (12)$$

พหุน ปณ ศิโต ชีเว

ตาราง 7 เงื่อนไขการอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Microwave power (W)	Operation cycle time (s)		Specific power (Wg^{-1})	Hot air temperature (˚C)	Symbol
	on	off			
300	9	21	1.57	40	MW 1.57 Wg^{-1}+HA40 ˚C
				50	MW 1.57 Wg^{-1}+HA50 ˚C
				60	MW 1.57 Wg^{-1}+HA60 ˚C
400	12	18	2.56	40	MW 2.56 Wg^{-1}+HA40 ˚C
				50	MW 2.56 Wg^{-1}+HA50 ˚C
				60	MW 2.56 Wg^{-1}+HA60 ˚C
500	15	15	3.55	40	MW 3.55 Wg^{-1}+HA40 ˚C
				50	MW 3.55 Wg^{-1}+HA50 ˚C
				60	MW 3.55 Wg^{-1}+HA60 ˚C
600	20	10	4.39	40	MW 4.39 Wg^{-1}+HA40 ˚C
				50	MW 4.39 Wg^{-1}+HA50 ˚C
				60	MW 4.39 Wg^{-1}+HA60 ˚C

การดำเนินการทดลอง

1. การเตรียมวัตถุดิบ

1.1 ใช้แมคคาดาเมีย พันธุ์ เชียงใหม่ 400 (HAES 660) ปลูกที่ตำบลปลาบ่า อำเภอภูเรือ จังหวัดเลย นำแมคคาดาเมียที่เก็บเกี่ยวมาแกะเปลือกเขียวหุ้มกะลาออกจากเมล็ด ที่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 25 ฐานแห้ง นำมาผึ่งลมที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในโรงเรือน ประมาณ 4 สัปดาห์ จนกระทั่งเหลือความชื้นประมาณร้อยละ 13 ฐานแห้ง จากนั้นคัดเมล็ดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 26.8–27.0 มิลลิเมตร บรรจุใส่กระสอบตาข่ายไนลอนขนส่งมาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามและมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

1.2 ทำความสะอาดเมล็ดทั้งกะลาและคัดเลือกเมล็ดทั้งกะลาที่เสียหรือมีเชื้อราออกแล้ว บรรจุลงถุงพลาสติก นำไปแช่ในตู้เย็นเพื่อรอการทดลอง

1.3 ก่อนการทดลองนำเมล็ดทั้งกะลา มาหาความชื้นเริ่มต้น โดยทำตามวิธีของ Wall and Gentry (2006) โดยนำถ้วยอลูมิเนียมไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแล้วนำเมล็ดทั้งกะลามาทุบ โดยส่วนของกะลาทุบให้เป็นชิ้นเล็กๆ และส่วนเนื้อในใช้มีดหั่นบางๆ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ในถ้วยอลูมิเนียม นำไปอบแห้งด้วยตู้อบ

สุญญากาศอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 21 กิโลปาสคาล เป็นเวลา 7 ชั่งโมง แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักเมล็ดแมคคาเมีย และจากนั้นคำนวณหาความชื้น

$$\text{ความชื้น (\% d.b)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบแห้ง} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบแห้ง}} \qquad (13)$$

2. วิธีการทดลอง

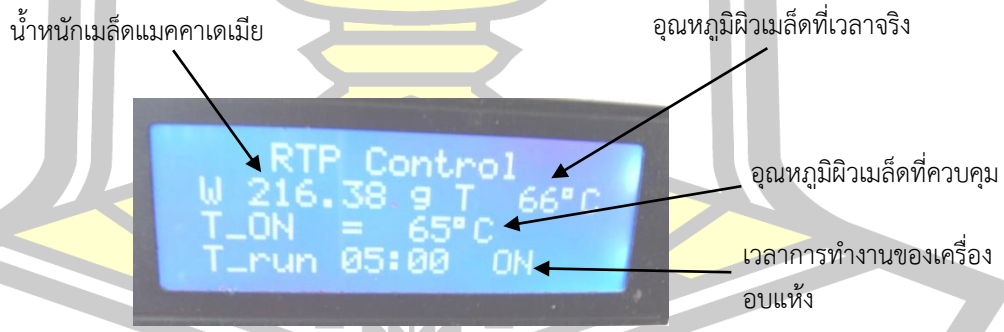
2.1 การทดลองที่ 1 การอบแห้งแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย

1) เตรียมความพร้อมของระบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

(1) เปิดเครื่องชั่งเพื่อให้ระบบตั้งค่าเป็นศูนย์และปรับลูกน้ำเครื่องชั่งให้อยู่กึ่งกลาง แล้วเปิดมาตรวัดหน่วยไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) เครื่องบันทึกข้อมูล คือ data logger หลังจากนั้นใช้สายเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก กระเปาะแห้ง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้ง และอุณหภูมิออกจากห้องอบแห้ง จากนั้นเปิดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิผิวแมคคาเดเมีย และปรับความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลม

(2) ก่อนอบแห้งนำเมล็ดแมคคาเดเมียมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจนกว่าอุณหภูมิเมล็ดมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่าง ประมาณ 200 กรัม ประมาณ 30 เมล็ด และนำมาเรียงบนถาด จากนั้นนำตัวอย่างเข้าห้องอบ

(3) ปรับตั้งค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 13 ฐานแห้ง กำหนดอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส เข้าไปในระบบ ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส แล้วตั้งค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง และกดปุ่มเพื่อบันทึกค่าลงเครื่องควบคุม ดังในภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 การปรับตั้งค่าและกำหนดอุณหภูมิผิวที่ต้องการควบคุม

2) เปิดเครื่องอบแห้งให้ไมโครเวฟทำงาน โดยกดปุ่มเริ่มทำงานที่เครื่องควบคุมและทำการบันทึก น้ำหนักตัวอย่าง และอุณหภูมิผิว จากนั้นบันทึกค่าการใช้ไฟฟ้าของพัดลม ขดลวดความร้อน และไมโครเวฟ โดยใช้มาตรวัดหน่วยไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้ง ของการอบแห้งทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทุก 15 นาที เป็นเวลา 30 นาที ถัดไปเก็บทุก 30 นาที เป็นเวลา 90 นาที และทุก 60 นาที จนกระทั่งถึงความชื้น

สุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง แล้วนำตัวอย่างไปไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อให้เย็นตัวลง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ ค่าสี L* a* b* ค่า a_w ค่าความแข็ง และค่าเปอร์ออกไซด์

3) พลอตกราฟความชื้นที่เวลาการอบแห้งต่างๆ อัตราการอบแห้ง และพลอตกราฟอุณหภูมิผิวที่เวลาการอบแห้งต่างๆ วิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้ง

4) การอบแห้งลมร้อนเพียงอย่างเดียว ทำการบันทึกเวลาและวิเคราะห์ผลการทดลองตามข้อ 2) และทำตามข้อ 3)

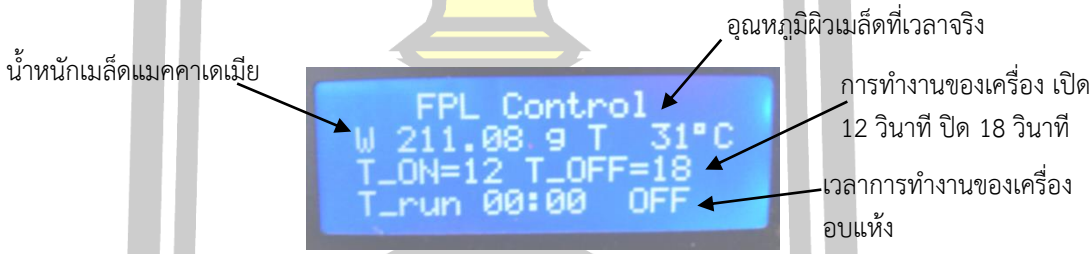
หมายเหตุ : ทำการเปลี่ยนค่าระดับการควบคุมอุณหภูมิผิวในการทดลองครั้งถัดไป เป็น 70 และ 80 องศาเซลเซียส ร่วมกับลมอุณหภูมิแวดล้อม 50 และ 70 องศาเซลเซียส จนครบทุกเงื่อนไขที่แสดงในตาราง 6 และมีหนึ่งเงื่อนไขที่ไม่มีการใช้ความเร็วลมในการอบแห้ง

2.2 การทดลองที่ 2 การอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย

1) เตรียมความพร้อมของระบบเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟ

(1) ทำตามข้อ (1) และ (2) จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

(2) ปรับตั้งค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 13 ฐานแห้ง กำหนดกำลังไมโครเวฟที่ 1.57 วัตต์ต่อกรัม โดยการปรับกำลังไมโครเวฟที่ 300 วัตต์ และปรับค่าอุณหภูมิอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส แล้วตั้งค่าความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง และกดบันทันทึกลงเครื่องควบคุม ดังรายละเอียดในภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 การปรับตั้งค่าและกำหนดเวลาการเปิดและปิด

2) เปิดเครื่องอบแห้งให้ไมโครเวฟทำงานโดยกดปุ่มเริ่มทำงานที่เครื่องควบคุมและทำการบันทึกค่า น้ำหนัก อุณหภูมิผิว จากนั้นบันทึกค่าการใช้ไฟฟ้าของพัดลม ขดลวดความร้อน และไมโครเวฟ โดยใช้มาตรวัดหน่วยไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้ง ของการอบแห้งทุก 1 นาที จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง แล้วนำตัวอย่างไปไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อให้เย็นตัวลง จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ ค่าสี L* a* b* ค่า a_w ค่าความแข็ง และค่าเปอร์ออกไซด์

3) ทำตามข้อ 3) จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

หมายเหตุ : เปลี่ยนจากกำลังไมโครเวฟ 300 วัตต์ เป็น 400 500 และ 600 วัตต์เพื่อให้ได้ค่าเป็น 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม และอุณหภูมิอากาศร้อนจาก 40 เป็น 50 และ 60 องศาเซลเซียส จนครบทุกเงื่อนไขดังแสดงตาราง 7

การวิเคราะห์คุณภาพ

เตรียมตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง มากะเทาะเปลือกกะลาของเมล็ดออก โดยใช้ค้อนหงอนเหล็ก ขนาด 25 มิลลิเมตร ซึ่งจะได้เนื้อในของตัวอย่าง และพร้อมที่จะทดสอบคุณภาพด้านต่างๆของแต่ละเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

1. การวัดค่าสี

นำเมล็ดมาผ่าครึ่ง แล้วนำใส่ใน Petri-dish ให้เต็มและให้เหลือช่องว่างน้อยที่สุด โดยใช้เครื่องวัดสี Color Flex (HunterLab 45/0, USA) Colorimeter โดยทำการวัดสี ให้รายงานเป็น CIE L* a* b* ซึ่งทำการวัดค่าสี 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง ดังแสดงในภาพประกอบ 31

ภาพประกอบ 31 การวัดค่าสี

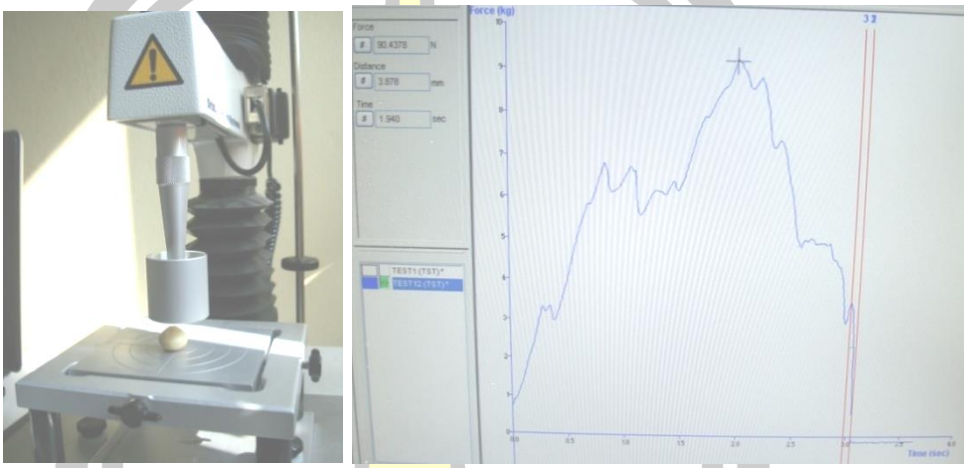
2. การวัดค่า a_w

นำเนื้อในเมล็ดมาหั่นให้ละเอียด แล้วนำตัวอย่างใส่ในถ้วยพลาสติกรูปทรงกระบอกเตี้ย โดยใช้เครื่องวัดค่า a_w รุ่น Aqua-Link 3.0, Pullman, WA, USA ซึ่งมีขั้นตอน คือ ทำการปรับค่า (calibrate) เครื่องเพื่อหาค่า a_w ด้วยน้ำเปล่าก่อนซึ่งจะได้ค่าประมาณ 1.00 ± 0.003 จากนั้นนำตัวอย่างที่หั่นเตรียมไว้มาใส่ถ้วยพลาสติกแล้วนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ สุดท้ายสังเกตหน้าจอเครื่องวิเคราะห์ จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า a_w แล้วเครื่องจะส่งเสียงเตือนดังขึ้น และทำการบันทึกค่า ดังแสดงภาพประกอบ 32

ภาพประกอบ 32 การวิเคราะห์ค่าน้ำอิสระ

3. การวัดค่าความแข็ง

ใช้เมล็ดเต็มที่ไม่มีการแตกหักมาวางในแนวตั้ง โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture Analyzer รุ่น TA, XT. Plus หัววัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ความเร็วหัววัดเคลื่อนที่ลง 1 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยให้หัวกดเคลื่อนที่ไปร้อยละ 70 ของความสูงของตัวอย่าง และสุดท้ายอ่านค่าสูงสุด (peak) ของกราฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 การวิเคราะห์ค่าความแข็ง

4. การวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์

วิธีการวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ โดยใช้วิธี official method Cd 8-53 มีรายละเอียดดังนี้

4.1 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

1) flask 250 มิลลิลิตร
2) ปิเปต 0.1 มิลลิลิตร
3) บิวเรต

4.2 สารเคมี

1) สารละลายผสม chloroform : acetic acid ในอัตราส่วน 3 : 2
2) สารละลาย potassium lodide อิ่มตัว
3) สารละลายน้ำแป้งร้อยละ 1
4) สารละลาย sodium thiosulfate ($Na_2S_2O_3$) 0.01 M
5) potassium dichromate
6) hydrochloric acid 1 M

4.3 วิธีการทดลอง

1) การเตรียมสารเคมี

(1) สารละลาย potassium lodide อิ่มตัว เติม potassium lodide ปริมาณมากเกินพอในน้ำเดือด และระหว่างการทดลองต้องมีผลึกของ potassium lodide อยู่ตลอดเวลา เก็บสารละลายในที่มืด

(2) สารละลายแป้งร้อยละ 1 ละลาย soluble starch 1 กรัม ในน้ำเย็นเล็กน้อย จากนั้นเติมลงในน้ำเดือด 100 มิลลิลิตร ต้มน้ำและคนตลอดเวลา ประมาณ 1 นาที

(3) สาละลายมาตรฐาน sodium thiosulfate ละลาย sodium thiosulfate 12.5 กรัม ในน้ำ 1 ลิตร ต้มให้เดือด 5 นาที และเทใส่ขวดทันที

2) การ standardize สารละลาย sodium thiosulfate

(1) ชั่ง potassium dichromate 0.1 – 0.12 กรัม เทลง glass – stoppered flask

(2) ละลาย potassium lodide 2 กรัม ในน้ำกลั่น 80 มิลลิลิตร เติม CHl 1 M 20 มิลลิลิตร เขย่าเก็บในที่มืดทันทีเป็นเวลา 10 นาที

(3) ไตเตรทด้วย สารละลาย sodium thiosulfate หลังจากนั้น ไตเตรทไประยะหนึ่งให้เติมสารละลายแป้งลงไปเล็กน้อย ไตเตรทต่อจนสารละลาย เปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีฟ้า

(4) คำนวณความเข้มของ sodium thiosulfate โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{Molarity (mol/L)} = \frac{\text{น้ำหนัก } K_2 Cr_3 O_7 \text{ (กรัม) x 100}}{\text{ปริมาตร } Na_2 S_2 O_3 \text{ (ml) x 49.032}} \qquad (14)$$

3) การสกัดน้ำมัน

(1) สกัดน้ำมันจากเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยชุดสกัดไขมัน soxhlet extractor 4 ชั่วโมง โดยใช้ petroleum ether เป็นตัวสกัด

(2) ระเหย petroleum ether ด้วยเครื่องระเหย (rotary vacuum evaporator EVELA N-N series, japan) กำหนดอุณหภูมิ 45 ˚C เป็นเวลา 45 นาที

4.4 การวิเคราะห์

1) นำน้ำมันที่สกัดได้ 5.00 ± 0.05 กรัม เติมลง flask

2) เติมสารละลายผสม chloroform : acetic acid 3 : 2 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร เขย่าให้น้ำละลาย

3) เติม potassium lodide อิ่มตัว 0.5 มิลลิลิตร โดยใช้ปิเปต เขย่าแล้วเก็บในที่มืดเป็นเวลา 1 นาที

4) เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร และสารละลายน้ำแป้งร้อยละ 1 เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตร

5) ไตเตรทช้าๆ ด้วย sodium thiosulfate เท่ากับ 0.01 N จนกระทั่งสีของไอโอดีนหายไป บันทึกปริมาตรที่ใช้ คำนวณค่าเปอร์ออกไซด์ตามสมการ

$$\text{ค่าเปอร์ออกไซด์} = \frac{(\text{ปริมาตร } Na_2S_2O_3 \text{ 0.01 N ที่ใช้ x ความเข้มข้น } Na_2S_2O_3 \text{ x } 1000)}{\text{น้ำหนักน้ำมัน (g)}} \quad (15)$$

การคำนวณอัตราการอบแห้ง

การคำนวณอัตราการแสดงในสมการที่ (5) จากนั้นนำค่าอัตราการอบแห้งของตัวอย่างมาพลอตกราฟเทียบกับเวลา

$$DR = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt}$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (g $_{\text{น้ำที่ถูกระเหย}}$) / (min)

M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา t (kg $_{\text{น้ำ}}$ / kg, $_{\text{มวลแห้ง}}$)

M_{t+dt} คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา $t+dt$ (kg $_{\text{น้ำ}}$ / kg, $_{\text{มวลแห้ง}}$)

dt คือ ช่วงของเวลาอบแห้ง (min)

t คือ เวลาการอบแห้ง (min)

การประเมินการใช้พลังงาน

การใช้พลังงานในที่นี้ สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ พลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง (E_{in}) และพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำของแมคคาเดเมีย (Q_{evap}) ในส่วนแรกพลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง (E_{in}) นั้น การคำนวณพลังงานดังกล่าวสามารถหาได้จากการประเมินพลังงานในแต่ละส่วนประกอบของระบบการอบแห้ง ได้แก่ จากไมโครเวฟ พัดลม และขดลวดความร้อน ดังนั้นพลังงานรวมที่ใช้ในการอบแห้ง (E_{in}) แสดงดังสมการที่ (6)

$$E_{in} = E_{mw} + E_{blow} + E_{heater}$$

พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำของแมคคาเดเมีย (Q_{evap}) นั้นจะสามารถคำนวณหาค่าพลังงานดังกล่าวได้จากสมการที่ (7)

$$Q_{evap} = W_d[h_{fg}(M_{p1} - M_{p2}) + c_m(T_2 - T_1)]$$

เมื่อ W_d คือ น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (kg)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (2,257 kJ/kg)

M_p คือ ปริมาณความชื้นของวัสดุ (% db.)

c_m คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ (1.17 kJ/kg˚C)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (˚C)

ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (η_e)

ประสิทธิภาพของการอบแห้งนั้น ประกอบด้วย ค่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ หารด้วยพลังงานรวมที่ถูกใช้ในการอบแห้ง รายละเอียดดังสมการ (8)

$$\eta_e = \frac{Q_{evap}}{E_{in} \cdot 3600}$$

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ค่าสี ค่าน้ำอิสระ ค่าความแข็ง และค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมีย ด้วยวิธีของ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ SPSS version 15.0

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปราย

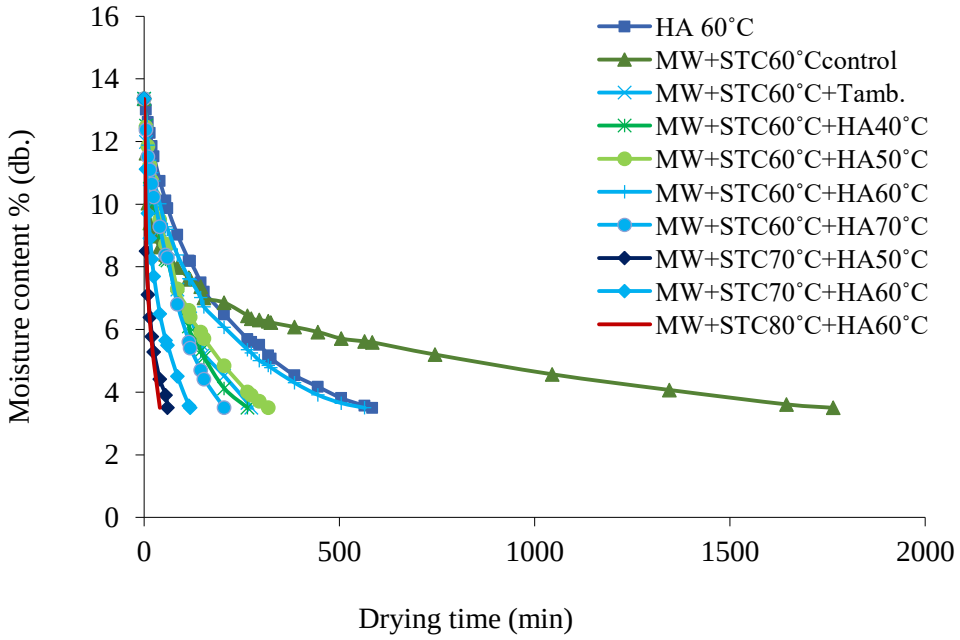
ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย ส่วนที่สอง การอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวใช้กำลังไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่แตกต่างกัน ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแมคคาเดเมีย คุณภาพ การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้ง และเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่ควบคุมอุณหภูมิผิวในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลตามลำดับดังนี้

ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย

การทดลองของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียที่ 60-80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องตรวจจับความร้อนแบบแผ่รังสี และใช้กำลังไมโครเวฟ 850 วัตต์ ร่วมกับลมร้อนอยู่ในช่วง 40-70 องศาเซลเซียส โดยไมโครเวฟจะทำงาน เมื่ออุณหภูมิผิวต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ส่วนที่สอง การอบแห้งแบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวใช้กำลังไมโครเวฟ 1.57-4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับลมร้อนอยู่ในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส และความเร็วลมในห้องอบแห้งคงที่ 1.0 เมตรต่อนาที ความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 13 ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของเมล็ดแมคคาเดเมียกับเวลาแสดงในภาพประกอบ 34

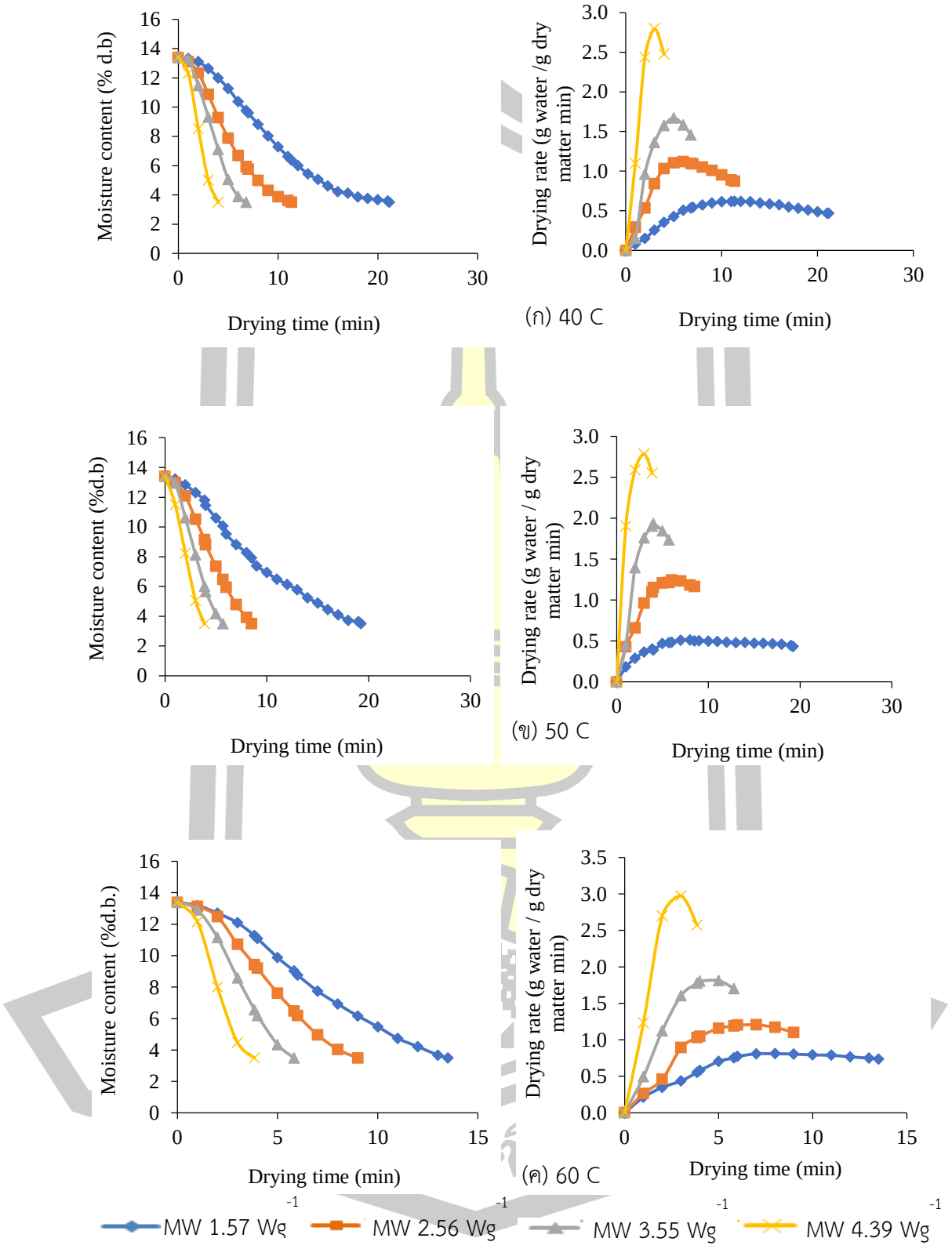
จากภาพประกอบ 34 เมื่อพิจารณาถึงปริมาณความชื้นในเมล็ดแมคคาเดเมีย การอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว พบว่าปริมาณความชื้นของเมล็ดแมคคาเดเมียลดลงใกล้เคียงกันในช่วง 20 นาทีแรก เนื่องจากมีปริมาณความชื้นสูงในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้ง หลังจากนั้นปริมาณความชื้นของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่า สังเกตได้ชัดเจนในกรณีของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวที่เงื่อนไขควบคุมอุณหภูมิผิว 60-80 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 40-70 องศาเซลเซียส เนื่องจากอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟมีมากกว่าอากาศร้อน แต่เมื่อพิจารณาที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส แบบไม่มีอากาศร้อน พบว่าปริมาณความชื้นที่เวลาในช่วง 145 นาทีแรก ปริมาณความชื้นจะลดลงสูงกว่าการอบแห้งแบบให้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟมีการทำงานอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกและประกอบกับมีปริมาณความชื้นที่สูงของเมล็ดแมคคาเดเมีย ส่งผลให้มีการระเหยความชื้นได้มากกว่า และหลังจากนั้นการลดลงของปริมาณความชื้นจะต่ำกว่า เนื่องจากกำลังไมโครเวฟมีการทำงานต่ำเพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวน้อย และความชื้นที่บริเวณผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียไม่ถูกพาออกไป ส่งผลทำให้ไอน้ำที่ระเหยรวมตัวกันกลายเป็นชั้นฟิล์มความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิวเมล็ดแมคคาเดเมีย ซึ่งเป็นการป้องกันไอน้ำที่ระเหยที่เกิดจากความร้อนของไมโครเวฟ เคลื่อนจากภายในออกสู่ภายนอกผิวทำให้ใช้เวลานานในการอบแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharma and

Prasad (2006) พบว่า ความเร็วลมในการอบแห้งมีผลต่อการพาความชื้นที่บริเวณผิวของกระเทียม ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าเมื่อเทียบกับไม่มีความเร็วลม



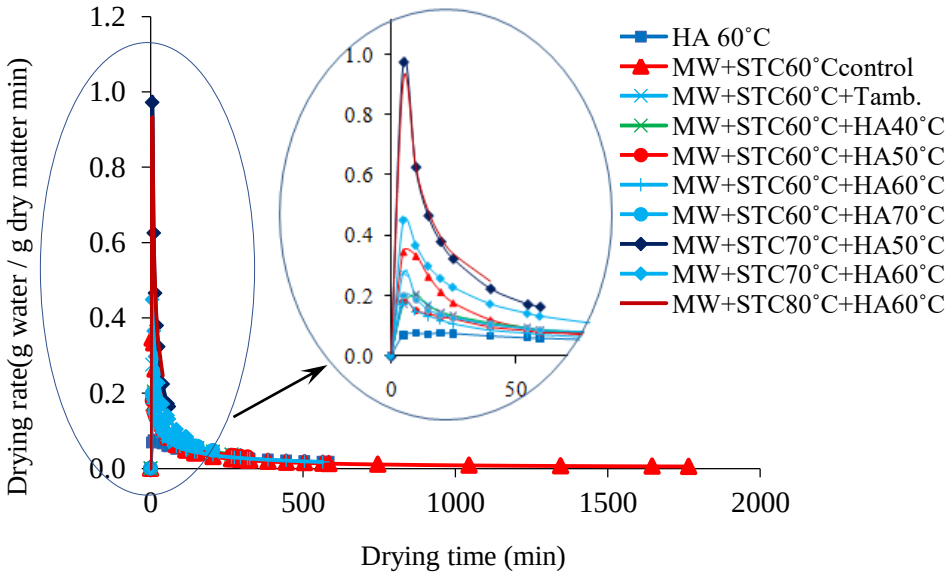
ภาพประกอบ 34 ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาการอบแห้งภายใต้การควบคุมอุณหภูมิผิวแมคคาเดเมีย

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นภายใต้การควบคุมอุณหภูมิผิวที่เวลาต่างๆ โดยพิจารณาที่ระดับกำลังไมโครเวฟต่างกัน คือ ระดับกำลังไมโครเวฟ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ผลที่ได้แสดงในภาพประกอบ 35 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อความชื้น พบว่า การอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูงความชื้นในเมล็ดแมคคาเดเมียจะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟต่ำ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง จนถึงความชื้นร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง พบว่า การอบแห้งที่ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด คือ 4 นาที และการอบแห้งที่ 1.57 วัตต์ต่อกรัม ใช้เวลาในการอบแห้งช้าที่สุด คือ 21 นาที เนื่องจากการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูง ทำให้มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิในการอบแห้งของเมล็ดแมคคาเดเมียมากกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟต่ำ ทำให้สามารถระเหยน้ำได้ดีกว่า ส่งผลให้การการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูงใช้ระยะเวลาน้อยกว่ากำลังไมโครเวฟต่ำ ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานของ Li et al. (2018) พบว่า ที่กำลังไมโครเวฟสูงจะมีการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็วและสัมประสิทธิการแพร่สูงกว่ากำลังไมโครเวฟที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดการอบแห้งใช้ระยะเวลาสั้น



ภาพประกอบ 35 ความชื้นและอัตราการอบแห้ง ในระหว่างการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิผิวต่างกัน

การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียกับเวลาภายใต้การควบคุมอุณหภูมิผิว แสดงในภาพประกอบ 36 เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไขควบคุมอุณหภูมิผิวอบแห้ง ได้แก่ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงแรกอัตราการอบแห้งของเมล็ดแมคคาเดเมียมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีแรก พบว่ามีอัตราการอบแห้งแตกต่างกัน โดยการอบแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส ทุกเงื่อนไข เนื่องจากที่การควบคุมอุณหภูมิผิว 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีกำลังไมโครเวฟทำงานอย่างต่อเนื่องมากกว่าที่ควบคุมอุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบที่การควบคุมอุณหภูมิผิว 70 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 เงื่อนไข พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า เนื่องจากอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียมีความแตกต่างกันมากกว่า การควบคุมอุณหภูมิผิว 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการทำงานของกำลังไมโครเวฟมากกว่า เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิผิวที่ 70 องศาเซลเซียส จึงส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขของการควบคุมอุณหภูมิผิว 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส กับการควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส พบว่า การควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าโดยภาพรวมและเวลาการอบแห้งน้อยกว่า เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากไมโครเวฟมากกว่าลมร้อน ในการเพิ่มอุณหภูมิควบคุมผิวที่ 80 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการอบแห้งจะมีค่าความชื้นสูง ทำให้เกิดความดันภายในและมีอุณหภูมิสูง และมีอัตราการระเหยน้ำจากตัวอย่างสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานของ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2551) พบว่าการอบแห้งวัสดุพรุนที่มีความชื้นสูงด้วยไมโครเวฟ ส่งผลทำให้เกิดการเกิดความร้อนและความดันสูงจากภายในสูง ทำให้มีการเคลื่อนที่ของความชื้นออกไปอย่างรวดเร็วกว่าปกติ นำไปสู่อัตราการอบแห้งอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาช่วงอัตราการอบแห้ง พบว่าเป็นอัตราการอบแห้งแบบลดลง เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเมล็ดแมคคาเดเมียมายังผิวต่ำโดยเฉลี่ย เพราะว่ามีอิทธิพลไมโครเวฟต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศร้อน

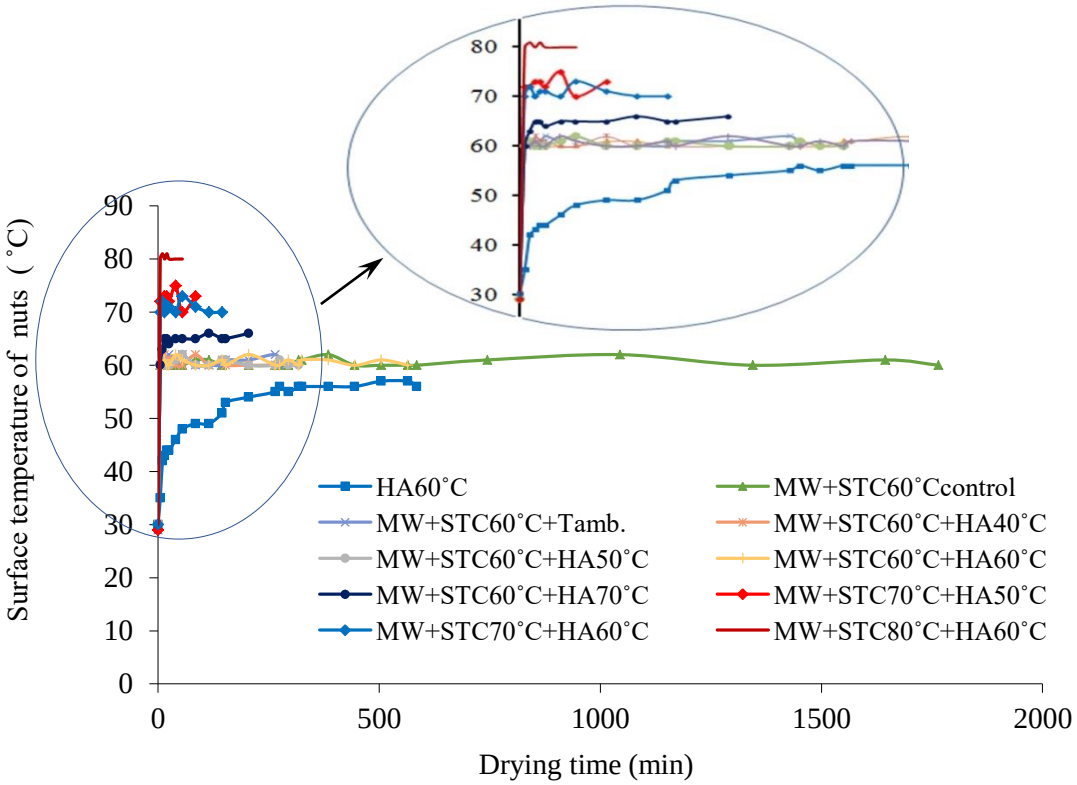


ภาพประกอบ 36 อัตราการอบแห้งของแมคคาเดเมีย ภายใต้เงื่อนการควบคุมอุณหภูมิผิว 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งภายใต้ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวที่เวลาต่างๆ โดยใช้กำลังไมโครเวฟที่แตกต่างกัน คือ ระดับกำลังไมโครเวฟ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ผลที่ได้แสดงในภาพประกอบ 35 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่มีอัตราการอบแห้งต่อเวลา พบว่า เมื่อกำลังไมโครเวฟสูงขึ้นอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นตาม ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นตามและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลงตามด้วย ซึ่งการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียที่กำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุดและใช้ระยะเวลาน้อยที่สุด เนื่องจากการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูงสุดที่ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ในเมล็ดแมคคาเดเมียจะได้รับพลังงานความร้อนมากที่สุด ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่อยู่ภายในและผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียมากขึ้น เป็นผลให้อัตราการระเหยน้ำจากเมล็ดแมคคาเดเมียสูงตามไปด้วยและการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูงใช้ระยะเวลาน้อยกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟต่ำ ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานของ ตวงทรัพย์ จงใจภักดิ์ (2555) พบว่า ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่สูงในการอบแห้ง ส่งผลให้เกิดการแพร่ความชื้นของน้ำจากภายในสู่ภายนอกได้สูงกว่าและทำให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับความเข้มของสนามไฟฟ้าต่ำ และเมื่อพิจารณาช่วงของอัตราการอบแห้ง พบว่ามีอัตราการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ เนื่องจากมีการอบแห้งเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งภายในโดยไมโครเวฟและบริเวณผิวโดยอากาศร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ozbek and Dadali (2007) ได้ศึกษาการอบแห้งใบสะระแน่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่ระดับ 180-900 วัตต์ ร่วมกับอุณหภูมิลมร้อน 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการอบแห้งเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

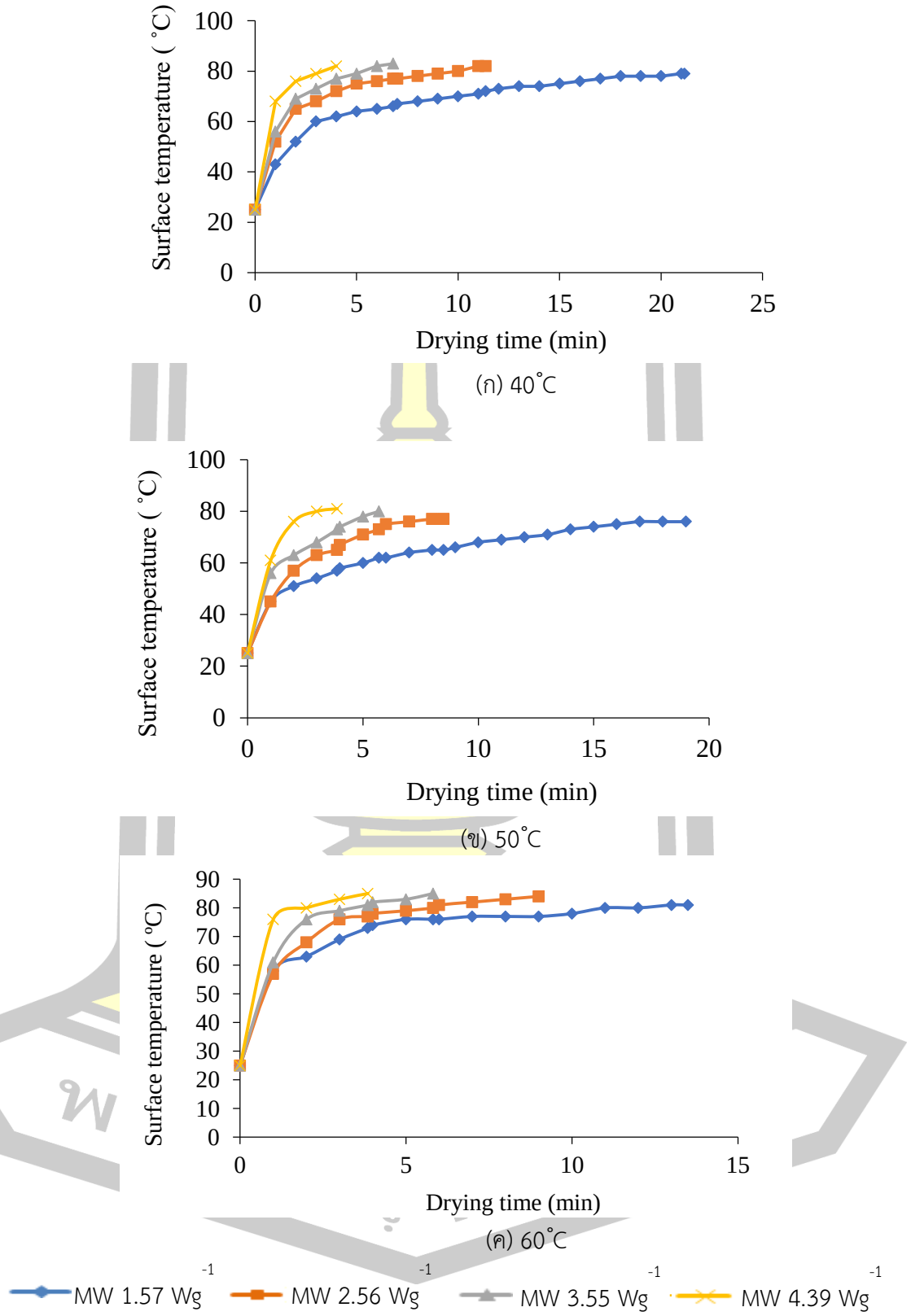
เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นที่ลดลงและอัตราการอบแห้งที่สูงของเมล็ดแมคคาเดเมีย พบว่าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวจะสูงกว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้งภายใต้ควบคุมอุณหภูมิผิว แสดงในภาพประกอบ 37 แสดงเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียที่เวลาต่างๆ ในกระบวนการอบแห้ง ที่อุณหภูมิผิว 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งแต่ละอุณหภูมิใช้เวลาในการอบแห้งไม่เท่ากัน โดยการอบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด 40 นาที เนื่องจากช่วงแรกของการอบแห้งนั้น ไมโครเวฟจะใช้เวลานานในการทำงาน เพราะว่าอุณหภูมิมีความแตกต่างกัน 20 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้มีอัตราการดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่สูง จึงทำให้อุณหภูมิสูงและมีอัตราการอบแห้งที่สูงตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส กับการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า เนื่องจากมีความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิผิวที่ควบคุม 60 องศาเซลเซียส กับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส ในเงื่อนไข ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ผิวให้กับสิ่งแวดล้อมได้เร็วขึ้น ทำให้อุณหภูมิผิวที่ควบคุม 60 องศาเซลเซียส ตามเงื่อนไขที่กำหนด ลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กำลังไมโครเวฟทำงานอย่างต่อเนื่องมากขึ้น เนื่องจากรักษาอุณหภูมิผิว



ภาพประกอบ 37 อุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้ง ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิผิว

ส่วนการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส กำลังไมโครเวฟทำงานเฉพาะช่วงแรกของการทำอุณหภูมิผิวให้ได้ 60 องศาเซลเซียส เท่านั้น หลังจากนั้นอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส จะทำงานอย่างเดียว จนกระทั่งถึงความชื้นสุดท้าย เนื่องจากอุณหภูมิผิวที่ควบคุม 60 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าอากาศร้อน 70 องศาเซลเซียส ทำให้อิทธิพลของอากาศร้อนมีมากกว่า เมื่อพิจารณาการควบคุมอุณหภูมิผิว 70 องศาเซลเซียส ทั้ง 2 เงื่อนไข พบว่าอุณหภูมิมีการสวิงมากกว่าอุณหภูมิผิวเงื่อนไขอื่นๆ เนื่องจากสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในวัสดุอบแห้ง รวมทั้งการก่อตัวของคลื่นนิ่งส่งผลให้เกิดการสวิงของอุณหภูมิดังกล่าว (ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)



ภาพประกอบ 38 อุณหภูมิผิวแมคคาเดเมียในระหว่างการอบแห้งโดยใช้ระดับกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 38 แสดงลักษณะอุณหภูมิผิวแมคคาเดเมียต่อระยะเวลาที่เปลี่ยนไปในแต่ละเงื่อนไขทดลอง เมื่อพิจารณากำลังไมโครเวฟต่างกัน พบว่าที่กำลังไมโครเวฟสูงจะทำให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละเงื่อนไขทดลองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอย่างต่อเนื่องมากกว่าในกรณีที่กำลังไมโครเวฟต่ำ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม พบว่าลักษณะอุณหภูมิผิวเพิ่มขึ้นแตกต่างกัน เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟแตกต่างกัน จากพฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้กำลังไมโครเวฟที่ 4.39 วัตต์ต่อกรัม มีอุณหภูมิสูงกว่ากำลังไมโครเวฟที่ต่ำกว่า ดังแสดงภาพประกอบ 38 (ก) 40 ˚C (ข) 50 ˚C (ค) 60 ˚C เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิผิว พบว่า มีอุณหภูมิสูงสุด 85 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิผิวต่ำสุดเท่ากับ 76 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 1.57 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิสูงสุด พบว่ามีค่ากำลังการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟของวัสดุอบแห้งสูง ส่งผลให้อุณหภูมิมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความชื้นในวัสดุอบแห้งค่อยๆ หายไป ค่ากำลังการดูดซับพลังงานไมโครเวฟก็จะค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Vongpradubchai and Rattanadecho (2009) พบว่า ปริมาณความชื้นที่อยู่ภายในไม้สูง ส่งผลให้อุณหภูมิไม้สูง เนื่องจากมีการดูดซับของพลังงานไมโครเวฟสูง และนอกจากนี้ในช่วงท้ายของการอบแห้งพบว่ามีอุณหภูมิวัสดุเริ่มสูงขึ้น เพราะว่าเกิดการรวมตัวของสมบัติไดอิเล็กตริก ค่าอุณหภูมิ และความชื้นภายในวัสดุอบแห้ง เป็นคลื่นนิ่งที่มีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นต่ำ ซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน (ผดุง ศักดิ์ รัตนเดโช, 2551)

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเมล็ดแมคคาเดเมีย พบว่าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวจะสูงกว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว

คุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย

1. ด้านค่าสี

ค่าสีที่ได้หลังจากผ่านการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนตามวิธีการอบแห้งแบบควบคุมอุณหภูมิผิว วิธีการวัดค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมีย โดยวิธีการนำเมล็ดที่สิ้นสุดการอบแห้งที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 3.50 ฐานแห้ง มากะเทาะเปลือกกะลาออกและจะได้เนื้อในแล้วนำไปวัดค่าสีผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 8

พหุน ปณฺ ฑิโต ชีเว

ตาราง 8 ค่าสีของเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิว

Treatment	Drying time (min)	Color parameters		
		L*	a*	b*
MW+STC60°C$_{control}$	1765	67.95±0.41^{de}	3.06±0.05^{b}	24.73±0.33^{bc}
MW+STC60°C+T$_{amb.}$	265	67.59±5.66^{de}	3.68±1.89^{b}	24.61±3.21^{bc}
MW+STC60°C+HA40°C	275	64.25±1.61^{cd}	3.67±0.25^{b}	25.27±0.84^{bc}
MW+STC60°C+HA50°C	318	64.92±4.72^{cd}	3.54±1.07^{b}	23.62±1.49^{b}
MW+STC60°C+HA60°C	515	70.90±3.53^{e}	1.39±0.39^{a}	20.39±0.63^{a}
MW+STC60°C+HA70°C	328	65.91±2.02^{cde}	2.64±0.95^{ab}	22.79±1.46^{ab}
MW+STC70°C+HA50°C	60	54.88±2.11^{b}	9.40±0.76^{c}	26.99±0.59^{c}
MW+STC70°C+HA60°C	118	68.61±0.23^{de}	4.14±0.07^{b}	23.33±0.08^{b}
MW+STC80°C+HA60°C	40	48.90±0.24^{a}	13.26±0.31^{d}	31.71±0.39^{d}
HA60°C	585	61.48±2.74^{c}	3.85±1.17^{b}	25.30±2.90^{bc}

$^{a, b, c, d, e}$ อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

จากตาราง 8 พบว่า ค่า L* ของการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิผิวของการอบแห้งเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 48.90 – 70.90 และที่เงื่อนไข MW+STC60°C+HA60°C พบว่า มีค่า L* สูงสุด 70.90 ดังภาพประกอบ 39 (จ) และ MW+STC80°C+HA60°C มีค่า L* ต่ำสุด ดังภาพประกอบ 41 เมื่อเปรียบเทียบค่า L* ของช่วงการควบคุมอุณหภูมิผิว 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ค่า a* ของการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวของการอบแห้งเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 1.39 - 13.26 และที่เงื่อนไข MW+STC80°C+HA60°C พบว่า มีค่า a* สูงสุด 13.26 ดังภาพประกอบ 41 เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูง ส่งผลทำให้มีอุณหภูมิสูงและเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มากขึ้น และทำให้เมล็ดแมคคาเดเมียมีค่า a* มากกว่าเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส แตกต่างกันทุกเงื่อนไขอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li และคณะ (2010) พบว่า ในการอบแห้งแอปเปิลที่อุณหภูมิ 55 65 และ 75 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นค่า a* สูงสุด และต่ำสุดที่ 55 องศาเซลเซียส

ค่า b* การอบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิผิวแบ่ง 3 กลุ่ม ได้แก่ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า b* ต่ำสุด 20.39 อยู่ที่เงื่อนไข MW+STC60°C+HA60°C และค่า b* สูงสุด 25.27 อยู่ที่เงื่อนไข MW+STC60°C+HA40°C ดังภาพประกอบ 39

ก) MW+STC60˚C$_{control}$

ข) MW+STC60˚C+T_{amb}

ค) MW+STC60˚C+HA40˚C

ง) MW+STC60˚C+HA50˚C

จ) MW+STC60˚C+HA60˚C

ฉ) MW+STC60˚C+HA70˚C

ภาพประกอบ 39 เมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟและอุณหภูมิอากาศร้อนแตกต่างกัน

พิจารณาที่ ค่า b* สูงสุด พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า b* ของเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมียมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่เงื่อนไข MW+STC60˚C+HA40˚C ดังภาพประกอบ 39 ค) มีค่า b* สูงสุด เนื่องจากอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟมากกว่าอุณหภูมิอากาศร้อนที่ 20 องศาเซลเซียส ทำให้เมล็ดแมคคาเดเมียมีค่า b* สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอากาศร้อนใกล้เคียงกัน ได้แก่ MW+STC60˚C+HA40˚C และ MW+STC60˚C+T_{amb} ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่พบว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 60 องศาเซลเซียส ที่เงื่อนไข MW+STC60˚C+HA60˚C ดังภาพประกอบ 39 (จ) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิผิว 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า การควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 70 องศาเซลเซียส ทุกเงื่อนไข มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับการควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส ($p<0.05$) ดังภาพประกอบ 40 และ 41

ก) MW+STC70˚C+HA50˚C

ข) MW+STC70˚C+HA60˚C

ภาพประกอบ 40 เมล็ดแมคคาเดเมียควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟและอากาศร้อนแตกต่างกัน

ภาพประกอบ 41 เมล็ดแมคคาเดเมียควบคุมอุณหภูมิผิวที่ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ไมโครเวฟและอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส

ภาพประกอบ 42 เมล็ดแมคคาเดเมียอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนที่ 60˚C

ตาราง 9 ค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Hot air temperature (°C)	Microwave power (Wg^{-1})	Drying time (min)	Color parameters		
			L*	a*	b*
40	1.57	21.15	52.75 ± 10.10^{abcd}	6.61 ± 1.33^{eb}	23.32 ± 3.21^{bcd}
	2.56	11.35	57.24 ± 1.77^{cd}	6.31 ± 0.80^{ab}	23.98 ± 1.10^{bcd}
	3.55	6.80	51.22 ± 1.72^{abc}	7.30 ± 2.32^{ab}	25.86 ± 4.22^{cde}
	4.39	4.00	46.78 ± 11.68^{ab}	5.99 ± 2.19^{ab}	18.93 ± 4.49^{a}
50	1.57	19.25	61.39 ± 2.21^{d}	4.57 ± 0.68^{a}	24.69 ± 1.12^{bcd}
	2.56	8.50	58.81 ± 1.00^{cd}	4.83 ± 0.18^{a}	24.02 ± 0.37^{bcd}
	3.55	5.70	54.55 ± 3.99^{abcd}	7.9 ± 1.19^{b}	28.93 ± 0.18^{e}
	4.39	3.88	54.85 ± 1.82^{abcd}	5.79 ± 0.99^{ab}	21.79 ± 1.41^{abc}
60	1.57	13.50	55.85 ± 1.33^{bcd}	6.67 ± 0.36^{ab}	26.37 ± 0.72^{de}
	2.56	9.00	49.08 ± 3.22^{abc}	6.18 ± 1.14^{ab}	22.58 ± 1.40^{abcd}
	3.55	5.82	51.16 ± 43.99^{abc}	7.14 ± 1.61^{ab}	25.49 ± 0.68^{cde}
	4.39	3.85	45.82 ± 1.75^{a}	6.57 ± 2.25^{ab}	20.99 ± 1.53^{ab}

$^{a, b, c, d, e}$ อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

จากตาราง 9 พบว่าค่า L* ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว มีแนวโน้มลดลง เมื่อกำลังไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าระดับกำลังไมโครเวฟ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ค่า L* อยู่ในช่วง 45.82 - 61.39 เมื่อพิจารณาที่กำลังไมโครเวฟ 1.57 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อนแตกต่าง พบว่า ค่า L* สูงสุด 61.39 ดังภาพประกอบ 43 (ข) และค่า L* ต่ำสุด 52.75 ดังภาพประกอบ 43 (ก)

(ก) 40 °C (ข) 50 °C (ค) 60 °C

ภาพประกอบ 43 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 1.57 Wg^{-1}

เมื่อพิจารณาที่กำลังไมโครเวฟ 2.56 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อนแตกต่าง พบว่า ค่า L* สูงสุด 58.81 ดังภาพประกอบ 44 (ข) และค่า L* ต่ำสุด 49.08 ดังภาพประกอบ 44 (ค)

(ก) 40 °C (ข) 50 °C (ค) 60 °C

ภาพประกอบ 44 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 2.56 Wg^{-1}

เมื่อพิจารณาที่กำลังไมโครเวฟ 3.55 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อนแตกต่าง พบว่า ค่า L* สูงสุด 54.55 ดังภาพประกอบ 45 (ข) และค่า L* ต่ำสุด 51.22 ดังภาพประกอบ 45 (ก)

(ก) 40 °C (ข) 50 °C (ค) 60 °C

ภาพประกอบ 45 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 3.55 Wg^{-1}

เมื่อพิจารณาที่กำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อนแตกต่าง พบว่า ค่า L* สูงสุด 54.85 ดังภาพประกอบ 46 (ข) และค่า L* ต่ำสุด 45.82 ดังภาพประกอบ 46 (ค)

(ก) 40 °C (ข) 50 °C (ค) 60 °C

ภาพประกอบ 46 การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟ 4.39 Wg^{-1}

ภาพประกอบ 43-46 พบว่า ค่า L* ต่ำสุด 46 ที่กำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงค่า L* ต่ำสุดของเมล็ดแมคคาเดเมีย อาจเกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ ดังภาพประกอบ 46 (ค) ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานของ Demirhan and Ozbek (2009) พบว่า ค่า L* มีแนวโน้มลดลง เมื่อกำลังไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงสีความสว่างลดลงของใบโหระพาอบแห้ง เกิดจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแตกต่างรายคู่ของค่า L* ที่กำลังไมโครเวฟแตกต่างและอุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า L* ของเมล็ดแมคคาเดเมียที่กำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส เทียบกับกำลังไมโครเวฟ 1.57 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยค่า L* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ค่า a* แสดงความเป็นสีแดงของเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมียมากขึ้น เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น เกิดขึ้นขึ้นอยู่ในช่วง 4.57 – 7.90 โดยกำลังไมโครเวฟ 3.56 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส ค่า a* สูงสุด 7.90 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแตกต่างรายคู่ของค่า a* พบว่า ค่า a* ของเมล็ดแมคคาเดเมียที่กำลังไมโครเวฟ 3.56 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพประกอบ 45 (ข) 50 °C เทียบกับกำลังไมโครเวฟ 2.56 และ 1.57 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยความสีแดงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ค่า b* จะแสดงความเป็นสีเหลืองของเนื้อในเมล็ดแมคคาเดเมีย พบว่าค่า b* ของเมล็ดแมคคาเดเมีย มีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแตกต่างรายคู่ของค่า b* ที่กำลังไมโครเวฟแตกต่างและอุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า สีของเมล็ดแมคคาเดเมียที่กำลังไมโครเวฟ 3.55 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส เทียบกับทุกเงื่อนไขการทดลอง พบว่ามีค่าเฉลี่ยความสีเหลืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อพิจารณาค่า b* ต่ำสุดของแต่ละช่วงอุณหภูมิ คือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า จะอยู่ในช่วงของกำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ทั้งหมด อาจเนื่องจากอิทธิพลของไมโครเวฟมากกว่าอากาศร้อน ส่งผลให้การอบแห้งใช้ระยะเวลาสั้น ทำให้ค่าสีเหลืองต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกำลังไมโครเวฟดังกล่าวข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว ของค่า L*a*b* ของเมล็ดแมคคาเดเมียแห้ง ที่แสดงในตาราง 8 และ 9 แสดงค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน พบว่า ค่า L* a* b* มีความแตกต่างกัน โดยที่การควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่า L* b* มีแนวโน้มสูงกว่า แต่ค่า a* มีแนวโน้มต่ำกว่า การอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว เมื่อมีการอบแห้งที่อุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส ทุกเงื่อนไข

2. ค่าน้ำอิสระ a_w

จากตารางที่ 10 พบว่าการใช้ไมโครเวฟร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน จะทำให้ค่า a_w แตกต่างกันที่ควบคุมอุณหภูมิผิว 80 องศาเซลเซียส กับควบคุมอุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส และค่า a_w อยู่ในช่วง 0.36-0.45 เมื่อเปรียบเทียบค่า a_w การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียของ Borompichaichartkul et al. (2009) มีค่าอยู่ในช่วง 0.58-0.69 พบว่าค่า a_w มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากขึ้นอยู่กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดแมคคาเดเมีย นอกจากนี้ ค่า a_w ของงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 0.36-0.45 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dominguez et al. (2007) พบว่า ค่า a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียอยู่ในช่วง 0.36-0.44 เป็นช่วงที่มีอัตราเกิดการเสื่อมน้อยที่สุด และเหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา

ตาราง 10 ค่าน้ำอิสระ a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิวควบคุมอุณหภูมิผิว

Surface temperature control (˚C)	Hot air temperature (˚C)	a_w
60	-	0.39 ± 0.01^{abc}
	Ambient (30)	0.42 ± 0.04^{bc}
	40	0.45 ± 0.05^{c}
	50	0.44 ± 0.05^{bc}
	60	0.40 ± 0.02^{abc}
	70	0.42 ± 0.07^{bc}
70	50	0.41 ± 0.05^{bc}
	60	0.39 ± 0.03^{abc}
80	60	0.36 ± 0.03^{a}
HA60 C	60	0.40 ± 0.02^{abc}

$^{a, b, c}$ อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

จากตาราง 11 ศึกษาค่า a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังจากอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งแตกต่างกัน พบว่า อุณหภูมิและระดับกำลังไมโครเวฟไม่มีผลต่อค่า a_w ซึ่งทำให้ค่า ค่า a_w ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาที่ ค่า a_w ทุกเงื่อนไขอยู่ในช่วง 0.37 – 0.47 โดยทำ

การเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน พบว่า อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ที่กำหนดไว้ไม่เกินค่า a_w 0.6

เมื่อเปรียบเทียบ การควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว ดังแสดงในตาราง 10 และ 11 แสดงค่า a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้ง โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน พบว่า ค่า a_w ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะว่า ค่า a_w นั้น ขึ้นอยู่กับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดแมคคาเดเมีย

ตาราง 11 ค่าน้ำอิสระ a_w ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Hot air temperature (°C)	Microwave power (Wg^{-1})	a_w
40	1.57	0.47 ± 0.05^{bc}
	2.56	0.37 ± 0.02^{a}
	3.55	0.45 ± 0.08^{bc}
	4.39	0.41 ± 0.04^{ab}
50	1.57	0.43 ± 0.03^{abc}
	2.56	0.47 ± 0.06^{bc}
	3.55	0.43 ± 0.04^{abc}
	4.39	0.42 ± 0.01^{abc}
60	1.57	0.47 ± 0.06^{c}
	2.56	0.43 ± 0.02^{abc}
	3.55	0.42 ± 0.01^{abc}
	4.39	0.44 ± 0.06^{bc}

$^{a, b, c}$ อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

3. ค่าความแข็ง

จากตารางที่ 12 พบว่า ค่าความแข็งของเนื้อในแมคคาเดเมียเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลานานในการอบแห้งอยู่ในช่วง 84-143 นิวตัน ค่าความแข็งสูงสุด 143 นิวตัน และต่ำสุด 84 นิวตัน เมื่อพิจารณาค่าความแข็งสูงสุด เนื่องจากมีการใช้เวลานานในการอบแห้ง คือ 1,765 นาที และเมล็ดแมคคาเดเมียมีการสัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานาน เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิว 70 และ 80 องศาเซลเซียส กับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว 60 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งของการควบคุมอุณหภูมิผิว 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งน้อยกว่า เนื่องจากอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟในการอบแห้ง ทำให้โครงสร้างภายในของเมล็ดแมคคาเดเมียมีความพรุนสูง ส่งผลให้มีค่าความแข็งต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nimmanpipug and Therdthai (2013) พบว่า

การอบแห้งมะละกอด้วยไมโครเวฟส่งผลให้มีโครงสร้างภายในมีความพรุนสูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เป็นผลให้เกิดค่าความแข็งต่ำกว่า

ตาราง 12 ค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิว

Surface temperature control (˚C)	Hot air temperature (˚C)	Hardness (N)
60	-	143 ± 4^{e}
	Ambient (30)	91 ± 8^{ab}
	40	111 ± 5^{c}
	50	84 ± 2^{a}
	60	95 ± 5^{b}
	70	123 ± 5^{d}
70	50	104 ± 3^{c}
	60	96 ± 4^{b}
80	60	95 ± 4^{b}
HA60˚C	60	108 ± 2^{c}

a, b, c, d, e อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

จากตารางที่ 13 พบว่า ค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียที่กำลังไมโครเวฟ 3.6 และ 4.4 วัตต์ต่อกรัม ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ ค่าความแข็งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่ระดับกำลังไมโครเวฟสูงสุด พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส จะมีอิทธิพลน้อยกว่ากำลังไมโครเวฟ เพราะว่าค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียจะต่ำกว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากในระหว่างการอบแห้งจะเกิดความดันภายในเมล็ดที่สูง ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างภายในกับผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย ส่งผลให้การขับความชื้นในปริมาณที่สูง ทำให้โครงสร้างภายในมีความพรุนสูง จึงส่งผลต่อความแข็งของเมล็ดในทิศทางที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์ (2554) พบว่าค่าความแข็งของเนื้อลำไยลดลง เนื่องจากผลของการอบแห้งด้วยกำลังไมโครเวฟที่สูง ทำให้เนื้อลำไยมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว ดังแสดงในตาราง 12 และ 13 แสดงค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้ง โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน พบว่า การควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่าความแข็งสูงกว่าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

ตาราง 13 ค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Hot air temperature (°C)	Microwave power (Wg^{-1})	Hardness (N)
40	1.57	87 ± 8^{cd}
	2.56	92 ± 6^{d}
	3.55	93 ± 6^{d}
	4.39	93 ± 2^{d}
50	1.57	63 ± 9^{a}
	2.56	80 ± 3^{bc}
	3.55	78 ± 7^{bc}
	4.39	96 ± 5^{de}
60	1.57	75 ± 5^{b}
	2.56	87 ± 5^{cd}
	3.55	106 ± 9^{ef}
	4.39	108 ± 4^{f}

a, b, c, d, e, f อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4. ค่าเปอร์ออกไซด์

จากตารางที่ 14 พบว่า อุณหภูมิและระดับกำลังไมโครเวฟมีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะมีผลทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อพิจาณาค่าเปอร์ออกไซด์ สูงสุดเท่ากับ 1.34 คือ MW+STC60°C+HA60°C และต่ำสุดเท่ากับ 3.5 คือ MW+STC80°C+HA60°C เมื่อพิจารณาค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออโตออกซิเดชั่น (autoxidation) ที่พันธะคู่ของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวกับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็น peroxide linkage ขึ้นระหว่างพันธะคู่ ออโตออกซิเดชั่นจะเกิดขึ้นเองแบบต่อเนื่องตลอดเวลา เมื่อไขมันไม่อิ่มตัวสัมผัสกับออกซิเจนโดยมีความร้อนเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้มีกลิ่นและรสชาติผิดปกติ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2553) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Warangkana (2012) พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของการอบแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นที่สูง จะส่งผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันให้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูง

ตาราง 14 ค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิว

Surface temperature control (˚C)	Hot air temperature (˚C)	Peroxide value (meq O_2/kg oil)
60	-	1.55±0.06^{cd}
	Ambient (30)	1.72±0.04^{e}
	40	1.30±0.02^{b}
	50	1.48±0.02^{c}
	60	1.34±0.03^{b}
	70	1.71±0.20^{e}
70	50	1.71±0.10^{e}
	60	1.76±0.06^{e}
80	60	3.49±0.04^{f}
HA60˚C	60	0.80±0.01^{a}

^{a,b,c,d,e,f} อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

Millequivalent =meq

จากตาราง 15 พบว่า การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียที่ใช้กำลังไมโครเวฟที่แตกต่างกัน มีค่าเปอร์ออกไซด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ ระดับกำลังไมโครเวฟมีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ คือ เมื่ออบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียที่ระดับกำลังไมโครเวฟสูงค่าเปอร์ออกไซด์จะมีแนวโน้มต่ำ เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงจะมีผลทำมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟสูงตาม ทำให้เกิดอุณหภูมิของเมล็ดแมคคาเดเมียสูง ส่งผลให้มีอัตราการอบแห้งที่สูงและใช้เวลาอบแห้งสั้น จากผลดังกล่าวทำให้มีช่วงเวลาในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นต่ำ จึงเป็นสาเหตุทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์ที่มีแนวโน้มต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Borompichaicharthul et al. (2009) พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของการอบแห้งที่อุณหภูมิและความชื้นที่สูง จะส่งผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันให้มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์สูง

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว จากตาราง 14 และ 15 แสดงค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้ง โดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่แตกต่างกัน พบว่าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่าเปอร์ออกไซด์มีแนวโน้มสูงกว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว อาจเนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งมีอุณหภูมิสูง และใช้ระยะเวลาสั้นในการอบแห้ง ทำให้ค่าเปอร์ออกไซด์ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวสูงกว่า

ตาราง 15 ค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Hot air temperature (°C)	Microwave power (Wg^{-1})	Peroxide value (meq O_2/kg oil)
40	1.57	8.87 ± 0.13^{k}
	2.56	5.29 ± 0.04^{g}
	3.55	4.63 ± 0.04^{f}
	4.39	2.26 ± 0.02^{c}
50	1.57	8.07 ± 0.09^{j}
	2.56	10.06 ± 0.10^{l}
	3.55	4.37 ± 0.02^{e}
	4.39	1.22 ± 0.04^{b}
60	1.57	5.56 ± 0.02^{h}
	2.56	7.58 ± 0.01^{i}
	3.55	3.85 ± 0.03^{d}
	4.39	1.00 ± 0.02^{a}

^{a,b,c,d,e,f,g,h,I,j,k,l} อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้ง

การประเมินการใช้พลังงานรวมแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับพัดลม พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับขดลวดความร้อน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กับไมโครเวฟ ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งด้วยแบบควบคุมอุณหภูมิผิว พบว่า การใช้พลังงานรวมมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการอบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิผิวสูงขึ้นอยู่ในช่วง 0.42 - 5.81 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิผิวในช่วง 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้พลังงานรวมต่ำสุด 0.46 กิโลวัตต์ – ชั่วโมง ที่ 80 องศาเซลเซียส รองลงมาใช้พลังงานรวมเฉลี่ย 0.71 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง ที่ 70 องศาเซลเซียส และใช้พลังงานรวมเฉลี่ยสูงสุด 1.92 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง ที่ 60 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานไมโครเวฟอย่างเดียว พบว่า ที่เงื่อนไข MW+STC60°C+HA70°C ใช้พลังงานต่ำสุด 0.07 กิโลวัตต์ - ชั่วโมง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศร้อนสูงกว่า 20 องศาเซลเซียส ทำให้อิทธิพลของอากาศร้อนมากกว่าไมโครเวฟ ส่งผลทำให้มีการใช้พลังงานต่ำ เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานรวมระหว่างการอบแห้งแบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิวทุกเงื่อนไขกับการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว พบว่าการอบแห้งด้วยการควบคุมอุณหภูมิผิวการใช้พลังงานต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรายงายการวิจัยของ Vongpradubchai and Rattanadecho (2009) พบว่า การอบแห้งไม้ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศ

ร้อน จะเห็นได้ชัดเจนว่ามีการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในตาราง 16

ตาราง 16 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและประสิทธิภาพของการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Treatment	Electricity use (kWh)				Efficiency η_e (%)
	Microwave	Blower	Heater	Total	
MW+STC60°C$_{control}$	1.200	-	-	1.200	1
MW+STC60°C+T$_{amb}$	0.590	0.140	-	0.730	2
MW+STC60°C+HA40°C	0.410	0.140	1.460	2.010	0.6
MW+STC60°C+HA50°C	0.310	0.160	3.270	3.740	0.4
MW+STC60°C+HA60°C	0.150	0.190	3.470	3.810	0.4
MW+STC60°C+HA70°C	0.070	0.130	5.610	5.810	0.2
MW+STC70°C+HA50°C	0.090	0.025	0.305	0.420	3
MW+STC70°C+HA60°C	0.190	0.045	0.770	1.005	1.3
MW+STC80°C+HA60°C	0.120	0.020	0.315	0.455	3
HA60°C	-	0.920	7.690	8.610	0.1

ส่วนประสิทธิภาพของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย พบว่า ประสิทธิภาพของการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการอบแห้งที่มีการใช้พลังงานต่ำลง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิผิวในช่วง 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า ประสิทธิภาพของการอบแห้งสูงสุดเท่ากับร้อยละ 3 ที่ 70 องศาเซลเซียส เงื่อนไข MW+STC70°C+HA50°C และ ที่ 80 องศาเซลเซียส เงื่อนไข MW+STC80°C+HA60°C เนื่องจากมีการใช้พลังงานรวม และพลังงานไมโครเวฟต่ำ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการอบแห้ง พบว่า ผลของการทดลองนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำ อยู่ในช่วงร้อยละ 0.20 – 3.00 เนื่องจากมีความชื้นต่ำในช่วงท้ายการอบแห้ง ส่งผลให้มีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงายการวิจัยของ (Motevali et al., 2016; Mousa and Farid 2002; Soysal et al., 2006) พบว่า ปริมาณความชื้นของวัสดุอบแห้งต่ำ ส่งผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟในวัสดุลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการอบแห้งต่ำ

ค่าการใช้พลังงาน เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานทั้ง 3 เงื่อนไข คือ ที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส แสดงในตาราง 17 พบว่าที่ระดับกำลังไมโครเวฟ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอุณหภูมิอากาศร้อน 60 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานสูงสุด เนื่องจากอิทธิพลของอากาศร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส มีผลต่อการใช้พลังงานมากว่าอุณหภูมิอากาศร้อน 40 และ 50 องศาเซลเซียส เมื่อ

เปรียบเทียบระดับกำลังไมโครเวฟ คือ 1.57 2.56 3.55 และ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ของแต่ละเงื่อนไข พบว่าระดับกำลังไมโครเวฟ 1.57 วัตต์ต่อกรัม มีการใช้พลังงานรวมมากสุด 0.147 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และที่กำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม มีการใช้พลังงานรวมต่ำสุด 0.058 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เนื่องจากกำลังไมโครเวฟอยู่ในระดับสูง ส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงตามและเวลาการอบแห้งสั้น ทำให้เกิดใช้พลังงานต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับรายงายการวิจัยของ Motevali et al. (2016) พบว่า การอบแห้งที่ระดับกำลังไมโครเวฟที่ต่ำจะมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูง

ตาราง 17 การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

Treatment	Electricity use (kWh)				Efficiency η_e (%)
	Microwave	Blower	Heater	Total	
MW1.57Wg^{-1}+HA40°C	0.055	0.015	0.038	0.108	6
MW2.56Wg^{-1}+HA40°C	0.047	0.007	0.020	0.074	8
MW3.55Wg^{-1}+HA40°C	0.048	0.006	0.015	0.069	9
MW4.39Wg^{-1}+HA40°C	0.045	0.003	0.010	0.058	11
MW1.57Wg^{-1}+HA50°C	0.053	0.008	0.062	0.123	5
MW2.56Wg^{-1}+HA50°C	0.045	0.002	0.038	0.085	8
MW3.55Wg^{-1}+HA50°C	0.048	0.003	0.034	0.085	8
MW4.39Wg^{-1}+HA50°C	0.045	0.002	0.025	0.072	9
MW1.57Wg^{-1}+HA60°C	0.052	0.010	0.085	0.147	4
MW2.56Wg^{-1}+HA60°C	0.045	0.004	0.062	0.111	6
MW3.55Wg^{-1}+HA60°C	0.047	0.004	0.047	0.098	6
MW4.39Wg^{-1}+HA60°C	0.037	0.006	0.035	0.078	8

จากตาราง 16 และ 17 เมื่อพิจารณาที่ประสิทธิภาพของการอบแห้งสำหรับเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว พบว่ามีประสิทธิภาพการอบแห้งต่ำทั้ง 2 เงื่อนไข เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการอบแห้งในช่วงท้ายของการอบแห้งกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า Jindarat et al. (2011) ศึกษาการอบแห้งวัสดุพรุนด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน พบว่า มีประสิทธิภาพการอบแห้งเรียงจากต่ำสุดไปสูงคือร้อยละ 1-9 Motevali et al. (2016) ศึกษาอบแห้งใบดอกคาโมไมล์ด้วยไมโครเวฟ พบว่า มีประสิทธิภาพการอบแห้งร้อยละ 8-13 Darvishi et al. (2013) ศึกษาการอบแห้งพริกไทยด้วยไมโครเวฟ พบว่ามีประสิทธิภาพการอบแห้งร้อยละ 4-25 Darvishi (2012) ศึกษาการอบแห้งมันฝรั่งสไลด์ด้วยไมโครเวฟ พบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งร้อยละ 8-25 และ Jindarat et al. (2013) ศึกษาการอบแห้งใบชาด้วยไมโครเวฟร่วมกับสุญญากาศ พบว่า

ประสิทธิภาพการอบแห้งร้อยละ 1-4 ซึ่งประสิทธิของการอบแห้งดังกล่าว มีค่าประสิทธิภาพต่ำซึ่งใกล้เคียงกันกับผลการทดลองในวิจัยครั้งนี้

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว จากตาราง 16 และ 17 แสดงการใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน พบว่า แบบไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีการใช้พลังงานต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพสูงกว่าการควบคุมอุณหภูมิผิว

พหูน ปณ ฑิโต ชีเว

บทที่ 5
สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิว และการไม่ควบคุมอุณหภูมิผิวต่อจนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย อัตราสิ้นเปลืองพลังงาน และประสิทธิภาพของการอบแห้ง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

จลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย

1. อัตราการอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวจะมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

2. การอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว พบว่ามีอัตราการอบแห้งเป็นแบบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

3. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว พบว่ามีอัตราการอบแห้งเป็นแบบช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

คุณภาพของเมล็ดแมคคาเดเมีย

1. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวจะมีค่าความสว่างมากกว่าการอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

2. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว ที่มีค่าความสว่างสูงสุด 70.90 ที่เงื่อนไขการใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิผิว 60 องศาเซลเซียส

3. การอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว ที่มีค่าความสว่างสูงสุด 61.39 ที่เงื่อนไขการใช้กำลังไมโครเวฟ 1.57 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 50 องศาเซลเซียส

4. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว พบว่าค่าน้ำอิสระไม่แตกต่างกัน และมีความเหมาะสมในการเก็บรักษา

5. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่าความแข็งมากกว่าการอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

6. การอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีค่าความหืนน้อยกว่าการอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

การใช้พลังงานและประสิทธิภาพการอบแห้ง

1. การอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีการใช้พลังงานรวมต่ำสุด 0.60 กิโลวัตต์ชั่วโมง ที่เงื่อนไขการใช้กำลังไมโครเวฟ 4.39 วัตต์ต่อกรัม ร่วมกับอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส

2. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีการใช้พลังงานรวมต่ำสุด 0.42 กิโลวัตต์ ชั่วโมงที่เงื่อนไขการใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิผิว 70 องศาเซลเซียส

3. การอบแห้งที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีประสิทธิภาพสูงกว่าการอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

4. การอบแห้งที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวมีประสิทธิภาพสูงกว่าการอบแห้งการอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว

จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาในด้านพลังงานและคุณภาพ การควบคุมอุณหภูมิผิวแมคคาเดเมียที่ 60 องศาเซลเซียส ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมสำหรับการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย เนื่องจากค่าสีความสว่างสูงสุด มีค่าความหืนน้อย และการใช้พลังงานต่ำกว่าการอบแห้งลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ข้อเสนอแนะ

1. การอบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน แบบมีการควบคุมอุณหภูมิผิว เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ควรจะมีการควบคุมกำลังวัตต์ต่อกรัมของไมโครเวฟแบบ Real time ในระหว่างการอบแห้ง จนกระทั้งกระทั้งสิ้นสุดการอบแห้ง

2. ควรมีการบันทึกช่วงเวลาในการทำงานของแมกนีตรอนเทียบกับเวลาในการอบแห้ง แบบควบคุมอุณหภูมิผิว เนื่องจากการทำงานของแมกนีตรอนไม่เท่ากัน เพื่อทราบการดูดซับพลังงานไมโครเวฟต่อปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้ง

3. ควรศึกษาการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับระบบทำความร้อนแบบอื่น โดยพิจารณาจากความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อบแห้ง คุณภาพ ประหยัดพลังงานและความคุ้มค่าเศรษกิจต่อไป

4. การเพิ่มขนาดของการศึกษาการอบแห้งจากการทดลองในห้องแล็ป (Lab) เป็นระดับเชิงอุตสาหกรรม สิ่งที่ต้องพิจารณาสิ่งแรกคือการออกแบบระบบการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟสำหรับใช้ในระดับอุตสาหกรรม และรูปแบบแผนผังของการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบอบแห้งในเชิงอุตสาหกรรม เช่น หน่วยของกำลัง (power unit) ใช้สำหรับผลิตคลื่นไมโครเวฟในแต่ละช่วงความถี่ตามที่ต้องการ ถัดมาคือคาวิตี้ (cavity) ใช้สำหรับรับคลื่นไมโครเวฟมาจากแมกนีตรอน และสุดท้ายคือ วงจรควบคุม ใช้สำหรับเชื่อมโยงระบบย่อยต่าง ๆ ให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในส่วนของการเตรียมวัตถุดิบและกระบวนการอบแห้งต่อคุณภาพ ปัจจัยที่ให้ความสำคัญ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ ความชื้นของวัสดุอบแห้ง การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ซึ่งมีผลต่อคุณภาพ

5. การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวไม่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2550). พืชเคี้ยวมัน มะคาดาเมีย[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http//www.doa.go.th/public/plibal/plibai_45/august%2045/macadamia.html [12 มิถุนายน 255].

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2543). แผ่นพับมะคาเดเมีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กลุ่มสื่อส่งเสริมการเกษตรสำนักพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี.

กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์. (2554). การอบแห้งลำไยด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

คำนึง วาทโยธา. (2546). การศึกษาการอบกล้วยน้ำว้าด้วยเตาอบไมโครเวฟดัดแปลงซึ่งจำลองรูปแบบการทำงานของเครื่องอบไมโครเวฟร่วมกับสายพานลำเลียง. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์เกษตร*, 34(4-6) (พิเศษ), 13-16.

ชยพัทธ์ ภูสำเภา. (2557). การอบแห้งแมคคาเดเมีย. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ตวงทรัพย์ จงใจภักดิ์. (2555). การเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งแมคคาเดเมียด้วยลมร้อนโดยใช้สนามไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2553). เคมีอาหาร. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.

นันทนา ปัทมพงษ์. (2514). การศึกษาเบื้องต้นของเอนไซม์อินเวอร์เทสในต้นข้าว.วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร.

บัณฑิต จันทร์งาม, มาร์ค ฟิลด์, ประสงค์ มั่นสลุง และเพ็ญจันทร์ สุทธานุกูล. (2536). แมคคาดาเมียนัท. วิทยาสารสถาบันวิจัยพืชสวน. 14, 99-110.

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. (2551). พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์. (2549). การพัฒนาเครื่องอบแห้งโดยใช้ไมดครเวฟสำหรับอบปลาแห้ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์.

สิงหนาท พวงจันทน์แดง. (2555). เทคโนโลยีการทำแห้งอาหาร. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เสริม จันทร์ฉาย. (2560). เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์. กรุงเทพมหานคร: เพชรเกษมพริ้นติ้ง.

โสภา แคนสี และ คำนึง วาทโยธา. (2546). การอบกล้วยน้ำว้าด้วยเตาอบไมโครเวฟดัดแปลง. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์เกษตร*, 34(4-6) (พิเศษ), 13-16.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Alibus I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkinslices. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 1445-1451.

AMS (2012). Australian Macadamia Society: Australian macadamia specification http://macadamias.org/pages/kernel-specifications. [2013, September 12].

AMS (2009). Australian Macadamia Society: History, Nutritional value of macadamia nut.

Anon (1982). Electronic colour sorting boosts nut production 66%. *Food Engineering*, 54, 150.

Augstburger F, Berger J, Censkowsky U, Heid P, Milz J and Streit C. (2000). Organic Farming in the Tropics and Subtropics: Macadamia. Naturlande.V. 1st edition. Germany.

Australian Macadamia Society. (2008). The Australian macadamia nut industry. [accessed 2016 Jan 20]. http://www.macadamias.org.

Bondaruk j, Markowski M and Blaszczak W. (2007). Effect of drying conditions on the quality of vacuum-microwave dried potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 81, 306-312.

Borompichaichartkul C, Luengsode K, Chinprahast N and Devahastin S. (2009). Improving quality of macadamia nut (Macadamia integrifolia) through the use of hybrid drying process. *Journal of Food Engineering*, 93, 348–353.

Brooker DB, Bakker-Arkema FW and Hall CW. (1992). Drying and storage of grains and oilseeds, Van Nostrand Reinhold Press, New York.

Budarin VL, Shuttleworth PS, bruyn MD, Farmer TJ, Gronnow MJ, Pfaltzgraff L, Macquarrie DJ and Clar JH. (2014). The potential of microwave technology for the recovery, synthesis and manufacturing of chemicals from bio-wastes. *Catalysis Today*.

Cavaletto CG. (1981a). Macadamia nut quality. Hawaii Macadamia Procedures Association 21th Annual Meeting Proceedings [Online].

Cavaletto CG. (1980). Macadamia nuts. Tropical and Subtropical Fruits. pp. 542-562.

Cavaletto CG, Dela CA, Ross E and Yamamoto HY. (1966). Factors affecting macadamia nut stability 1: Raw kernel. *Journal Food Technology,* 20, 1084-1087.

Chu AC, King GS and Sherman GD. (1953). Macadamia storage studies. Hawaii Agricultural Experiment Station Progress Notes. No.90.

Correa ER. (2014). Characteristics of the floral biology, fatty acid oil profiles and production of macadamia [PhD thesis]. Pelotas (Brazil): Federal University of Pelotas.

Cuccurullo G, Giordano L, Albanese D, Cinquanta L and Matte DM. (2012). Infrared thermography assisted control for apples microwave drying. *Journal of Food Eng*ineering, 112(4), 319-325.

Darvishi H. (2012). Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices. *Journal of Agricultural Engineering Int*ernational, 14, 1.

Darvishi H, Asl AR, Asghari A, Azadbakht M, Najafi G and Khodaei J. (2013). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13, 130–138.

Datta AK, Anantheswaran RC. (2001). Handbook of microwave technology for food applications. New York (NY): Marcel Dekker.

Demirhan E and Özbek B. (2009). Color Change Kinetics of Microwave-Dried Basil. *Drying Technology*, 27, 156-166.

Dominguez IL, Azuara E, Vernon-Carter EJ and Beristain CI. (2007). Thermodynamic analysis of effect of water activity on the stability of macadamia nut. *Journal of Food Engineering*, 81, 566-571.

Ennovation Ltd. New Zealand. (2006). Processing flow chart [Online]. Available from: http://www. emacadamia.co.nz [2013, July 30].

Fellows P. (1988). Food processing technology. Wood head Publishing Limited. Food info (2008) (http://www.food-info.net/uk/colour/maillard.htm)<<Accessed date 5 November 2009>>.

Fourie PC and Basson DS. (1989). Predicting rancidity in stored nuts by means of chemical analysis. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 22, 251-253.

Gold Crown Macadamia Association. (2004). Roasting macadamia nuts [Online]. A California Macadamia Growers co-op. Available from: http://www.macnuts.org/roast.htm [2013, August 14].

Grag ML, Rudra P, Blake R and Wills R. (2003). Macadamia nut consumption lowers plasma cholesterol levels in hypercholesterolemia men. *Journal of Nutrition*, 133, 1060-1063 [Online]. Available from: http // www.nuthealth.org/nutrition.php3 [2013, July 25].

Hamilton RA, Yee W and Ito PJ. (1980). Macadamia: Hawaii's desert nut. College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii Circular, 485, 1-10.

Hebbar HU, Nandini KE, Lakshmi MC and Subramanian R. (2003). Microwave and infrared heat processing of honey and its quality. *Food Science Technology Research*, 9(1), 49–53.

IFSQN (2008). International Food Safety and Quality Network: Chemical reaction rate and water activity (http://www.ifsqn.com/forum/index.php?showtopic=11775) <<Accessed on 17 March 2009>>

International Macadamias Limited. (2007). Wholesale and retail products [Online]. Available from: http://www.macadamia.au.com/wholesaleproducts.html [2013, July 28].

Ito PJ. (1987). Macadamia nut survey and recommendations for Thailand USAID in cooperation with Thailand. Highl and Agriculture Research Office. p37.

Jindarat W, Sungsoontorn S and Rattanadecho P. (2013). Analysis of energy consumption in drying process of biomaterials using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (CUMV) - case study: tea leaves. *Drying Technology*, 31, 1138–1147.

Jindarat W, Rattanadecho P, Vongpradubchal S and Pianroj Y. (2011). Analysis of energy consumption in drying process of non-hygroscopic porous packed bed using a combined multi-feed microwave-convective air and continuous belt system. *Drying Technology*, 29(8), 926–938.

Jongjaipak T, Wiriyaumpaiwong S and Laohavanich J. (2014). Electric field enhancement of macadamia drying. *Journal of Food Agriculture and Environ*ment, 12(2), 114–117.

Kaijser A, Dutta P and Savage G. (2000). Oxidative stability and lipid composition of macadamia nuts grown in New Zealand. *Food Chemistry*, 71, 67-70.

Kermond P. and Baumgardt B. (1996). The macadamia: from seed to the Supermarket. (Self-published).

Kiennemanna J, Chartier T, Pagnoux C, Baumard JF, Huger M and Lamerant JM. (2005). Drying mechanisms and stress development in aqueous alumina tape casting. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 1551-1564.

Kowitz TJ. (2004). Drying macadamia nut-in-shell on-farm. PhD's Thesis. School of Land and Food Sciences, The University of Queensland. Queensland: Australia.

Kowitz TK. and Mason R. (2009). Drying macadamia nuts. AMS Fact Sheet 2 July Edition.

Kowitz TJ, Mason RL and Yong G. (1998). Ambient air temperature and relative humidity can limit the on-farm drying of macadamia nut-in-shell. *Australian Macadamia Society News Bulletin*, 25, 67-72.

Leverington RE. (1971). The macadamia nut industry. Commonwealth Scientific and Industrial Research. Organisation Research Quaterly. 31, 57-65.

Li C, Liao JJ, Yin Y, Mo Q, Chang LP and Bao WR. (2018). Kinetic analysis on the microwave drying of different forms of water in lignite. *Fuel Processing Technology*, 176, 174-181.

Li Z, Raghavan GSV and Orsat V. (2010). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 99, 263–268.

Lin TM, Durance TD and Scaman CH. (1998). Characterization of vacuum microwave, airand freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31, 111-117.

Mao W, Watanabe M and Sakai N. (2003). Dielectric Properties of frozen surimi at 915 and 2450 MHz. *Food Science Technology Research*, 9(4), 361-363.

Mason RL and Will RBH. (2000) Macadamia nut quality research: The processing challenge. *Food Australia Journal*, 52(9), 416-419.

McGUIRE RG. (1992). Reporting of objective color measurements. *Hort - Science*, 27, 1254-1255.

Moltzau RH and Ripperton JC. (1939). Processing of macadamia. Hawaii Agricultural Experiment Station University of Hawaii. Bulletin no.83 June: pp.31.

Motevali A, Minaei S, Banakar A, Ghobadian B and Darvishi H. (2016). Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15, 179–187.

Mousa N, and Farid M. (2002). Microwave vacuum drying of banana slices. *Drying Technology*, 20 (10), 2055–2066.

Nambuccamacnutspty Ltd. (2007). Grow - process. Available form: http://www.macnuts.com.au/grow-process.htm [2013, August 15].

Nimmanpipug N and Therdthai N. (2013). Effect of osmotic dehydration time on hot air drying and microwave. *Journal of Food and Applied Bioscience*, 1(1), 1-10.

Ozbek B and Dadali G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83, 541–549.

Pankaew P, Janjai S, Nilnont W, Phusampao C and Bala BK. (2016). Moisture desorption isotherm, diffusivity and finite element simulation of drying of macadamia nut (Macadamia integrifolia). *Food Bioprod Process*, 100, 16–24.

Prabhanjan DG, Ramaswamy HS and Raghavan GSV. (1995). Microwave assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 25, 95-104.

Prichavudhi K and Yamamoto HY. (1987). Effect of drying temperature on chemical composition and quality of macadamia nuts. *Food Technology*, 19, 129-132.

Radspinner AL. (1970). A study of variability of Macadamia integrifolia. Ph.D. Thesis, University of Hawaii.

Roknul A, Zhang M, Mujumdar A and Wang Y. (2014). A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (Lactuca sativa L). *Drying Technology*, 32 (6), 657–666.

Salmolin LA and Grosvenor MB. (2000). Nutrition science & application 3rd ed. Virginia: Saunders College Publishing. p 128-163.

Sharma GP and Prasad S. (2006). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, 75, 441-446.

Silva FA, Marsaioli AJ, Maximo GJ, Silva MAAP and Goncalves LAG. (2006). Microwave assisted drying of macadamia nuts. *Journal of Food Engineering*, 77(3),550–558.

Soysal A, Oztekin S and Eren O. (2006). Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosyst Engineering.* 93 (4), 403-413.

Srichamnong W. (2010). Effects of Postharvest Treatments on Macadamia Nut Quality. Ph.D. Thesis, University of New South Wales.

Starr M. (2012). How a Microwave Oven Works. Available from: http://www.cnet.com.au/how-a-microwave-oven-works-339340651.htm. [2013, September 12].

Storey WB. (1969). Macadamia. In R.A. Jaynes (ed.), Handbook of North American nut Trees, pp.321-335. Knoxville: North nut growers association.

Sumnu G, Turabi E and Oztop M. (2005). Drying of carrots in microwave and halogen lampmicrawavecombination ovens. *LWT-Food Science and Technology*, 38, 549-553.

Sturm B, Nunez VAM and Hofacker W. (2014). Influence of process control on drying kinetics, Color and shrinkage of air dried apples. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 456–460.

TISI (2006). Thai Industrial Standards. Thai Industrial Standards Institute, Thailand, No. 1145/2549.

Tohi S, Hagura Y and Suzuki K. (2002). Measurement of change in moisture content during drying process using the dielectric property of foods. *Food Science Technology Research*, 8(3), 257–260.

Trochoulias T, Chalker FC and Loebel MR. (1984). Macadamia Culture. Department of Agriculture, New South Wales. p. 1-11.

Tsubokural Y, Fukuzaki S, Noma S, Igura N and Shimoda M. (2009). Glycation of ovalbumin in solidstate by conductive and microwave heating. *Food Science Technology Research,* 15(4), 377-380.

Varith J, Dijkanarukkul P, Achariyaviriya A and Achariyaviriya S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Eng*ineering, 81, 459-468.

Vongpradubchai S and Rattanadecho P. (2009). The microwave processing of wood using a continuous microwave belt drier. *Chemical Engineering and Processing*, 48, 997-1003.

Wall MM and Gentry TS. (2007). Carbohydrate composition and colour development during drying and roasting of macadamia nuts (Macadamia integrifolia). *LWT – Food Science and Technology*, 40, 587–593.

Walton DA and Wallace HM. (2015). The effect of mechanical dehuskers on the quality of macadamia kernels when dehusking macadamia fruit at differing harvest moisture contents. *Scientia Horticulturae*, 182, 119-123.

Wang Y, Zhang L, Johnson J, Gao M, Tang J, Powers JR and Wang S. (2013a). Developing hot air-assisted radio frequency drying for in-shell macadamia nuts. *Food Bioprocess Technology*, 7 (1), 278-288.

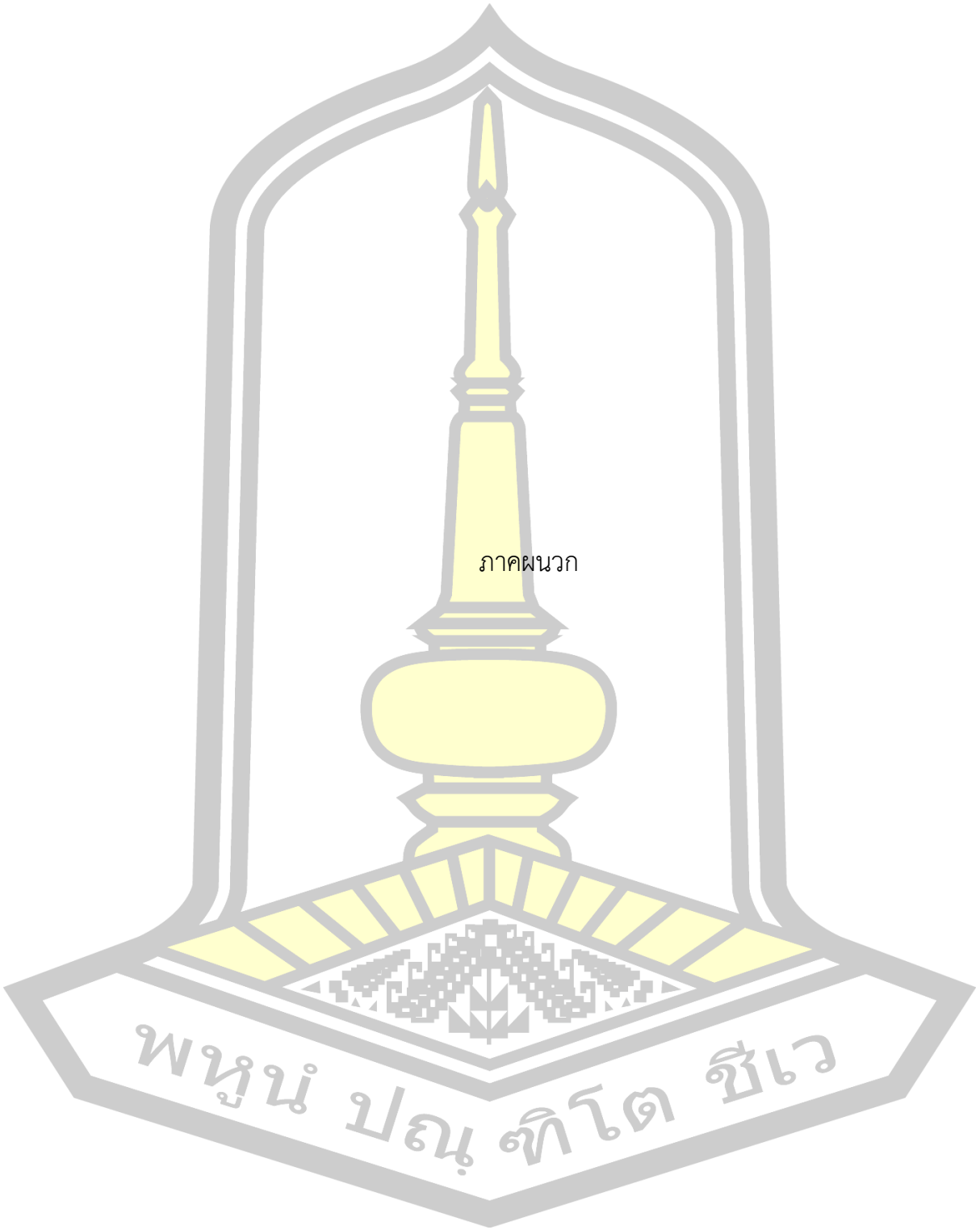
Wang Z, Sun J, Chen F, Liao X and Hu X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, 80, 536-544.

Warangkana S. (2012). Effects of Postharvest Treatments on Macadamia Nut Quality. *School of Chemical Engineering*, the University of New South Wales in fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy.

Weinert AGI. (1993). Macadamia nut processing [Online]. The Southern African Macadamia Growers Association Yearbook. Available from: http://www.samac.org.za/growershandbook/File cover.pdf [2013, June 12].

Yongsawatdigaul J and Gunasekaran S. (1996). Microwave vacuum drying of cranberries, part II: Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20, 145-156.

Zhang M, Tang J, Mujumdar AS and Wang S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends Food Science Technol*ogy, 17(10), 524–534.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก เวลา และความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ตาราง ก.1 ค่าความชื้นของแมคคาเดเมียที่อบแห้งในกำลังไมโครเวฟและอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆ

เวลา	40 ˚C				50 ˚C				60 ˚C			
(min)	1.57	2.55	3.55	4.39	1.57	2.55	3.55	4.39	1.57	2.55	3.55	4.39
0	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40	13.40
1	13.32	13.11	13.25	12.30	12.75	12.97	12.94	11.50	13.19	13.14	12.91	12.17
2	13.10	12.33	11.48	8.53	12.67	12.08	10.61	8.22	12.71	12.48	11.15	8.00
3	12.64	10.88	9.32	5.01	12.24	10.52	8.12	5.04	12.09	10.73	8.58	4.48
3.85	12.34	10.35	8.58	4.51	12.02	9.94	7.30	4.27	11.76	10.22	7.78	3.50
3.88	12.14	9.82	7.84	4.02	11.80	9.36	6.48	3.50	11.43	9.71	6.98	
4	11.99	9.28	7.10	3.50	11.59	8.79	5.66		11.09	9.20	6.19	
5	11.27	7.87	5.05		11.04	7.36	4.17		9.88	7.61	4.34	
5.70	10.97	7.47	4.67		10.77	6.89	3.50		9.51	7.14	3.92	
5.82	10.67	7.07	4.29		10.50	6.42			9.14	6.67	3.50	
6	10.38	6.69	3.90		10.24	5.94			8.77	6.20		
6.80	9.99	6.22	3.50		9.90	5.36			8.26	5.58		
7	9.60	5.76			9.53	4.78			7.75	4.96		
8	8.82	4.99			8.85	3.93			6.93	4.04		
8.50	8.42	4.65			8.56	3.50			6.55	3.77		
9	8.02	4.31			8.28				6.17	3.50		
10	7.28	3.88			7.65				5.48			
11	6.61	3.62			7.03				4.74			
11.35	6.31	3.50			6.71				4.48			
12	6.00				6.39				4.22			
13	5.43				5.78				3.68			
13.50	5.24				5.51				3.50			
14	5.06				5.24							
15	4.61				4.89							
16	4.22				4.44							
17	4.11				4.08							
18	3.85				3.73							
19	3.76				3.64							
19.25	3.71				3.50							
20	3.67											
21	3.58											
21.15	3.50											

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตาราง ก-2 เวลา และความชื้น ของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟควบคุมอุณหภูมิผิว

เวลา (min)	HA 60 ˚C	MW+ STC 60 ˚C control	MW+ STC 60˚C +T_{amb}	MW+ STC 60 ˚C +HA40 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA50˚ C	MW+ STC 60 ˚C +HA60˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA70˚ C	MW+ STC 70 ˚C +HA50˚ C	MW+ STC 70 ˚C +HA60˚C	MW+ STC 80 ˚C +HA60˚ C
0	13.36	13.36	13.36	13.36	13.36	13.36	13.36	13.36	13.36	13.36
5	13.02	11.63	11.98	12.51	12.46	12.5	12.37	8.50	11.12	8.79
10	12.62	10.03	11.37	11.32	11.85	11.88	11.51	7.11	9.71	7.11
15	12.27	9.40	10.80	10.88	11.25	11.40	11.10	6.38	8.91	6.18
20	11.85	9.12	10.51	10.44	10.75	11.00	10.65	5.77	8.24	5.48
25	11.52	8.98	10.07	10.03	10.26	10.74	10.23	5.28	7.69	4.91
40	10.74	8.63	9.18	8.99	9.50	10.01	9.28	4.41	6.50	3.50
55	10.11	8.40	8.45	8.24	8.73	9.28	8.38	3.90	5.65	
60	9.87	8.19	8.40	8.20	8.70	9.20	8.30	3.50	5.50	
85	9.02	7.98	7.27	7.01	7.29	8.38	6.80		4.50	
115	8.19	7.65	6.40	6.10	6.61	7.62	5.60		3.56	
118	7.84	7.51	5.97	5.70	6.26	7.32	5.15		3.50	
145	7.50	7.37	5.55	5.31	5.91	7.02	4.70			
205	6.48	6.86	4.52	4.12	4.84	6.07	3.50			
265	5.69	6.44	3.66	3.50	4.00	5.35				
275	5.48	6.37	3.50		3.75	5.16				
318	5.27	6.30			3.50	4.97				
325	5.07	6.22				4.78				
385	4.54	6.08				4.30				
445	4.17	5.92				3.91				
505	3.81	5.71				3.65				
565	3.56	5.62				3.50				
585	3.49	5.40								
745		5.20								
1045		4.57								
1345		4.07								
1645		3.61								
1765		3.50								

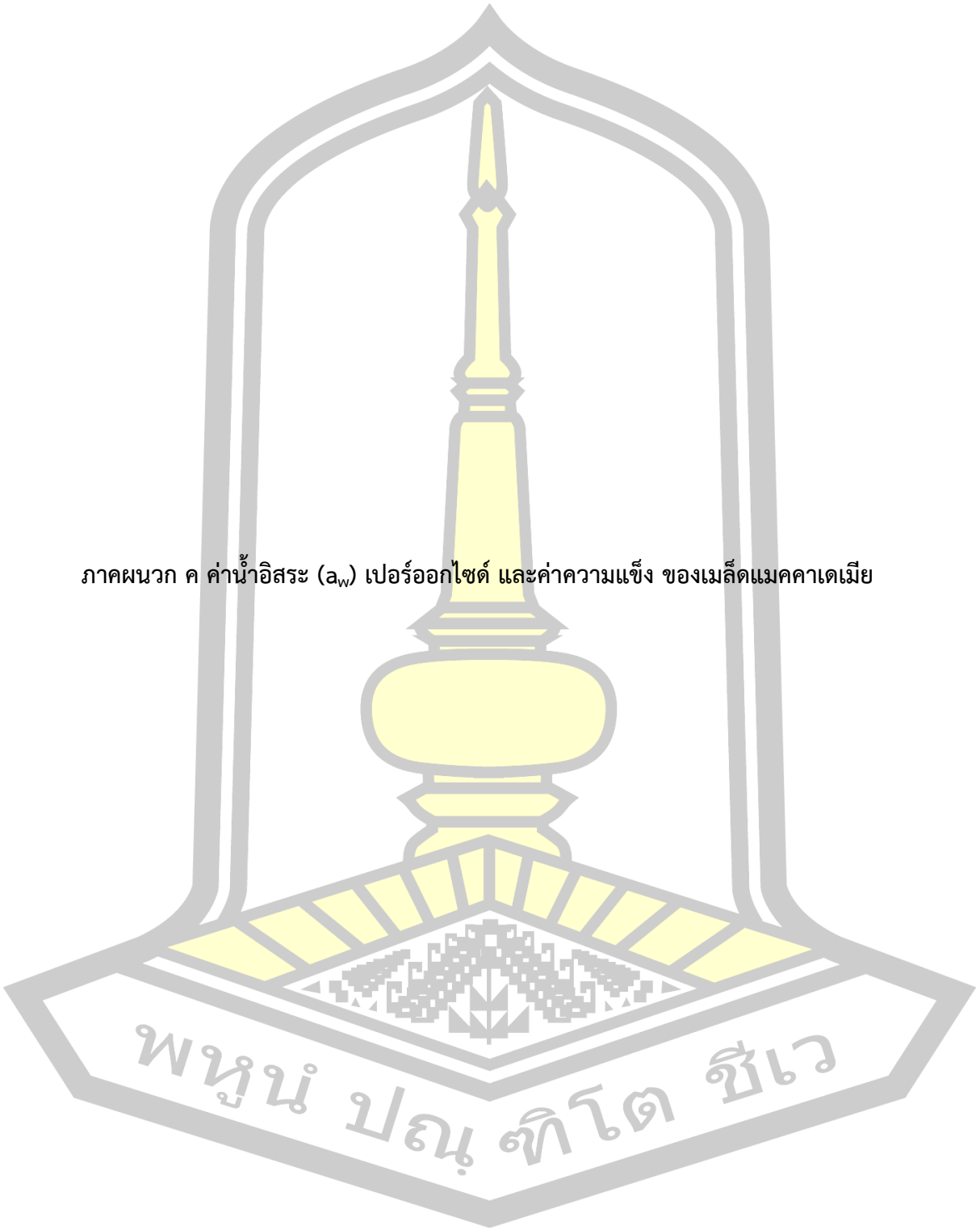
ภาคผนวก ข ค่าสีของเมล็ดแมคคาเดเมียหลังการอบแห้งโดยใช้เครื่องไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน

ตาราง ข.1 ค่าสีของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียโดยใช้เครื่องอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่แตกต่างกัน โดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิว

ครั้งที่	วัตต์ต่อกรัม	40˚C			50˚C			60˚C		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
1	1.57	41.09	7.66	19.73	58.90	5.27	23.40	57.35	6.29	26.13
2		57.42	6.35	24.32	62.12	3.91	25.37	55.38	6.73	25.81
3		59.74	5.81	25.92	63.14	4.54	25.31	54.81	7.00	27.19
1	2.56	59.28	5.39	22.71	59.85	5.01	24.29	50.81	5.87	23.85
2		56.28	6.74	24.64	57.85	4.65	23.60	51.07	4.96	21.08
3		56.15	6.80	24.59	58.72	4.82	24.17	45.37	7.72	22.81
1	3.55	49.33	9.94	30.09	51.90	8.74	28.80	47.74	7.61	25.43
2		52.70	5.57	21.65	52.60	8.40	28.85	50.19	8.46	24.84
3		51.62	6.40	25.84	59.14	6.55	29.13	55.54	5.34	26.20
1	4.39	33.41	8.46	13.95	55.39	6.17	23.02	44.09	8.19	21.24
2		51.93	5.26	22.68	56.34	6.53	22.10	45.80	4.00	19.36
3		54.99	4.26	20.15	52.83	4.66	20.25	47.58	7.51	22.38

ตาราง ข.2 ค่าสีของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียโดยใช้เครื่องอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนที่แตกต่างกัน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิผิว

ครั้งที่	ค่าสี	HA 60 ˚C	MW+ STC 60 ˚C control	MW+ STC 60˚C +T_{amb}	MW+ STC 60 ˚C +HA40 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA50 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA60 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA70 ˚C	MW+ STC 70 ˚C +HA50 ˚C	MW+ STC 70 ˚C +HA60 ˚C	MW+ STC 80 ˚C +HA60 ˚C
1	L*	58.94	68.31	65.15	63.17	61.45	73.53	63.59	53.39	68.36	48.65
	a*	4.59	3.06	4.92	3.40	3.99	0.97	3.76	9.55	4.07	13.28
	b*	27.56	24.70	25.89	24.90	23.65	19.91	24.41	26.47	23.37	31.40
2	L*	61.12	68.03	63.57	63.47	63.02	72.27	66.92	53.96	68.66	49.13
	a*	4.48	3.11	4.62	3.89	4.31	1.47	2.07	10.13	4.14	13.56
	b*	26.32	25.07	26.99	26.23	25.09	20.15	21.56	27.63	23.24	32.15
3	L*	64.38	67.51	74.06	66.10	70.30	66.89	67.23	57.29	68.81	48.93
	a*	2.50	3.01	1.50	3.71	2.31	1.74	2.17	8.63	4.21	12.94
	b*	22.04	24.41	20.96	24.67	22.11	21.11	22.42	26.89	23.38	31.58



ภาคผนวก ค ค่าน้ำอิสระ (a_w) เปอร์ออกไซด์ และค่าความแข็ง ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

ตาราง ค-1 ค่า a_w เปอร์ออกไซด์ และค่าความแข็ง ของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียโดยใช้เครื่องอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 40°C ร่วมกับไมโครเวฟ 1.57, 2.56, 3.55 และ 4.39 Wg^{-1}

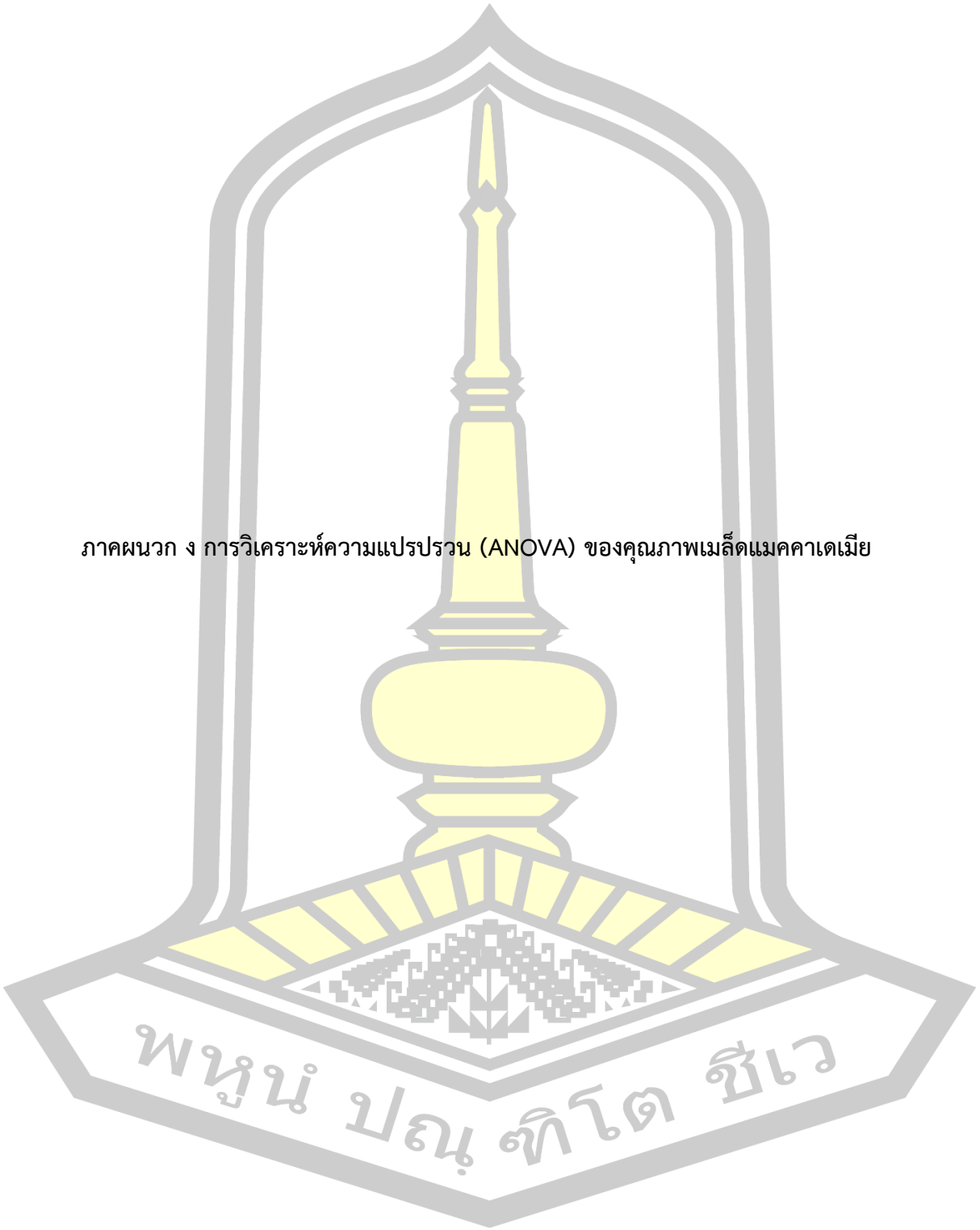
ครั้งที่	วัตต์ต่อกรัม	40˚C			50˚C			60˚C		
		a_w	PV	HN	a_w	PV	HN	a_w	PV	HN
1	1.57	0.53	9.00	85.39	0.43	7.98	72.40	0.39	5.58	74.03
2		0.49	8.76	96.32	0.45	8.18	61.54	0.47	5.56	80.14
3		0.46	8.85	81.74	0.41	8.07	54.57	0.44	5.55	70.79
1	2.56	0.36	5.34	89.23	0.45	9.97	79.22	0.45	7.56	91.00
2		0.35	5.24	99.40	0.49	10.16	83.34	0.41	7.59	88.99
3		0.41	5.30	88.32	0.45	10.05	77.35	0.40	7.59	80.88
1	3.55	0.58	4.59	99.23	0.40	4.36	85.43	0.41	3.87	95.62
2		0.43	4.67	91.00	0.44	4.41	73.81	0.43	3.83	110.65
3		0.36	4.62	87.78	0.43	4.36	74.43	0.41	3.86	110.38
1	4.39	0.43	2.26	91.30	0.41	1.24	100.77	0.43	1.03	107.25
2		0.43	2.26	95.23	0.43	1.21	97.52	0.39	0.99	104.28
3		0.45	2.27	91.79	0.41	1.20	90.65	0.43	1.02	111.74

HN = Hardness (N)

PV = Peroxide value (meq O_2/kg)

ตาราง ค-2 ค่า a_w เปอร์ออกไซด์ และค่าความแข็ง ของการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมียโดยใช้เครื่องอบแห้ง ด้วยไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อน โดยการควบคุมอุณหภูมิผิว

ครั้งที่	คุณภาพ	HA 60 ˚C	MW+ STC 60 ˚C control	MW+ STC 60˚C +T_{amb}	MW+ STC 60 ˚C +HA40 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA50 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA60 ˚C	MW+ STC 60 ˚C +HA70 ˚C	MW+ STC 70 ˚C +HA50 ˚C	MW+ STC 70 ˚C +HA60 ˚C	MW+ STC 80 ˚C +HA60 ˚C
1	a_w	0.37	0.40	0.36	0.47	0.53	0.37	0.38	0.34	0.38	0.39
	PV	0.81	1.52	1.67	1.29	1.47	1.32	1.69	1.56	1.75	3.45
	HN	108.94	143.04	95.91	109.86	85.09	91.6	124.39	106.95	92.03	97.63
2	a_w	0.41	0.37	0.35	0.38	0.42	0.40	0.38	0.45	0.41	0.37
	PV	0.82	1.50	1.73	1.30	1.48	1.36	1.57	1.65	1.71	3.53
	HN	104.87	147.17	95.52	115.64	84.40	91.77	117.69	101.42	98.25	95.84
3	a_w	0.41	0.39	0.42	0.46	0.40	0.39	0.43	0.47	0.35	0.32
	PV	0.79	1.62	1.75	1.32	1.50	1.33	1.87	1.76	1.83	3.48
	HN	108.94	140.05	81.23	106.55	81.82	100.16	127.53	103.4	98.59	90.03



ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของคุณภาพเมล็ดแมคคาเดเมีย

1. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ในกรณีที่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย

ตาราง ง.1 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อความสว่างของเมล็ดแมคคาเดเมีย (L*)

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิผิว	831.877	3	277.292	32.393	0.000*
อุณหภูมิอากาศร้อน	268.644	5	53.729	6.277	0.001*
อุณหภูมิผิว *อุณหภูมิอากาศร้อน	102.551	1	102.551	11.980	0.002*
Error	171.203	20	8.560		
Total	1422.863	29			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.2 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อค่าความสีแดงของเมล็ดแมคคาเดเมีย (a*)

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิผิว	252.651	3	84.217	106.521	0.000*
อุณหภูมิอากาศร้อน	29.473	5	5.895	7.456	0.000*
อุณหภูมิผิว *อุณหภูมิอากาศร้อน	24.282	1	24.282	30.713	0.000*
Error	15.812	20	0.791		
Total	368.831	29			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.3 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อค่าความสีเหลืองของเมล็ดแมคคาเดเมีย (b*)

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิผิว	127.609	3	42.536	17.162	0.000*
อุณหภูมิอากาศร้อน	44.728	5	8.946	3.609	0.017*
อุณหภูมิผิว *อุณหภูมิอากาศร้อน	23.492	1	23.492	9.478	0.006*
Error	49.569	20	2.478		
Total	289.731	29			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.3 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อค่าน้ำอิสระของเมล็ดแมคคาเดเมีย (a_w)

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิผิว	0.020	3	0.007	3.719	0.028*
อุณหภูมิอากาศร้อน	0.014	5	0.003	1.551	0.219
อุณหภูมิผิว *อุณหภูมิอากาศร้อน	0.001	1	0.001	0.473	0.499
Error	0.035	20	0.002		
Total	0.057	29			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.4 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิผิว	3754.602	3	1251.534	0.979	0.406
อุณหภูมิอากาศร้อน	14193.183	5	2838.637	2.221	0.059*
อุณหภูมิผิว *อุณหภูมิอากาศร้อน	2342.583	1	2342.583	1.833	0.179
Error	115048.007	90	1278.311		
Total	137657.545	99			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.5 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิผิว	12.112	3	4.037	893.188	0.000*
อุณหภูมิอากาศร้อน	0.441	5	0.088	19.506	0.000*
อุณหภูมิผิว *อุณหภูมิอากาศร้อน	0.048	1	0.048	10.649	0.004*
Error	0.090	20	0.005		
Total	13.148	29			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

2. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง ในกรณีที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิผิวของเมล็ดแมคคาเดเมีย

ตาราง ง.6 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อความสว่าง (L*) ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิ	317.587	2	158.794	6.310	0.006*
กำลังไมโครเวฟ	292.788	3	97.596	3.878	0.022*
อุณหภูมิ *กำลังไมโครเวฟ	131.038	6	21.840	0.868	0.532
Error	603.976	24	25.166		
Total	1345.389	35			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.7 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าสีแดง (a*)ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิ	4.957	2	2.479	1.178	0.325
กำลังไมโครเวฟ	16.902	3	5.634	2.679	0.070*
อุณหภูมิ *กำลังไมโครเวฟ	8.179	6	1.363	0.648	0.691
Error	50.480	24	2.103		
Total	80.518	35			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตาราง ง.8 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิ	20.255	2	10.127	2.088	0.146
กำลังไมโครเวฟ	181.861	3	60.620	12.499	0.000*
อุณหภูมิ *กำลังไมโครเวฟ	32.270	6	5.378	1.109	0.386
Error	116.405	24	4.850		
Total	350.791	35			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.9 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าน้ำอิสระ (a_w) ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิ	0.003	2	0.002	0.772	0.468
กำลังไมโครเวฟ	0.013	3	0.004	2.207	0.099*
อุณหภูมิ *กำลังไมโครเวฟ	0.031	6	0.005	2.612	0.028*
Error	0.096	48	0.002		
Total	0.144	59			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.10 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าความแข็งของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิ	5578.616	2	2789.308	2.459	0.096
กำลังไมโครเวฟ	2505.487	3	835.162	0.736	0.535
อุณหภูมิ *กำลังไมโครเวฟ	6627.642	6	1104.607	0.974	0.453
Error	54439.156	48	1134.149		
Total	69150.901	59			

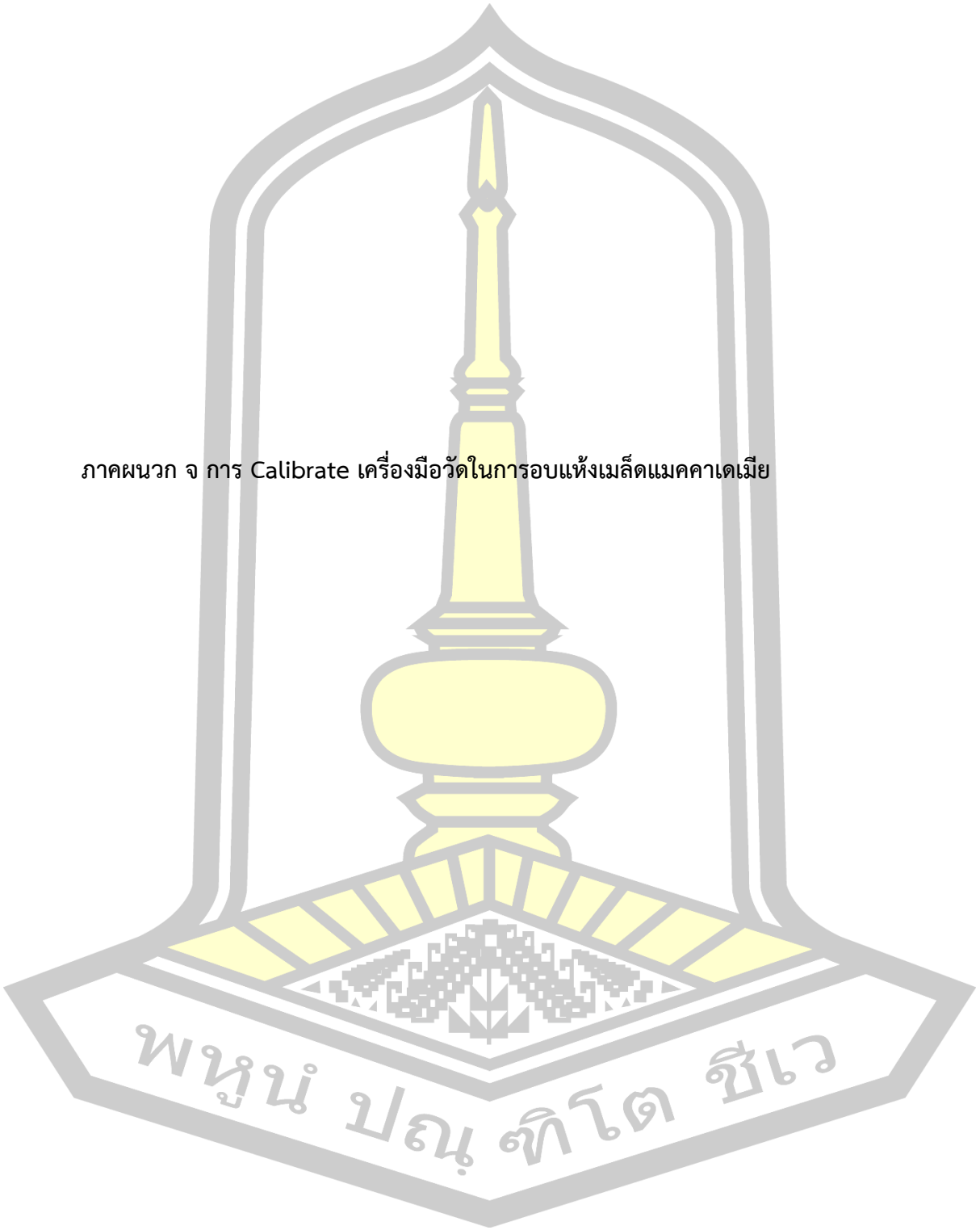
* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

ตาราง ง.11 ผลการเปรียบอิทธิพลของอุณหภูมิและกำลังไมโครเวฟที่มีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของเมล็ดแมคคาเดเมีย

Source	Type III SS	df	MS	F	P
อุณหภูมิ	178.692	2	89.346	25814.206	0.000*
กำลังไมโครเวฟ	98.678	3	32.893	9503.491	0.000*
อุณหภูมิ *กำลังไมโครเวฟ	10.603	6	1.767	510.593	0.000*
Error	0.083	24	0.003		
Total	288.056	35			

* มีนัยสำคัญที่ระดับ .05

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว



ภาคผนวก จ การ Calibrate เครื่องมือวัดในการอบแห้งเมล็ดแมคคาเดเมีย

1. ความเที่ยงตรงในการตรวจจับอุณหภูมิ

ความเที่ยงตรงในการตรวจจับอุณหภูมิเป็นหัวใจสำคัญในการในการอบแห้ง ซึ่งเครื่องตรวจจับอุณหภูมิที่ใช้ คือ เทอร์โมไฟล์ TPA81 ก่อนทำการอบแห้งได้มีการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน 2 ประเภท ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์แบบเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ยี่ห้อ testo รุ่น 826-T4 ผลความเที่ยงตรงในการตรวจจับอุณหภูมิดังตาราง จ.1

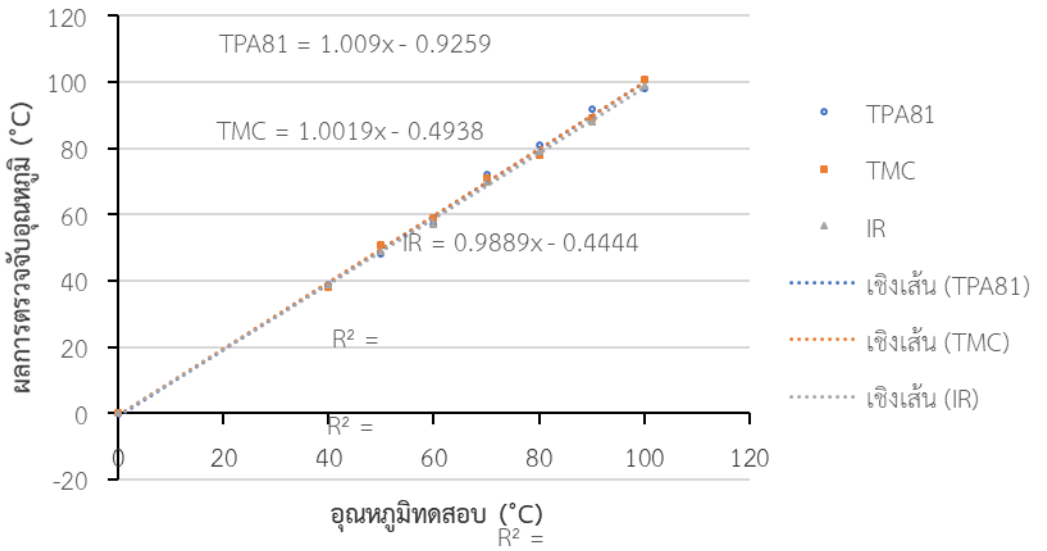
ตาราง จ.1 ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิของการตรวจจับอุณหภูมิของเทอร์โมไฟล์เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานต่าง ๆ

ครั้งที่	อุณหภูมิน้ำทดสอบ (˚C)	ผลการตรวจจับอุณหภูมิ		
		เทอร์โมไฟล์ TPA81 (˚C)	เทอร์โมคัปเปิล (TMC) (˚C)	อินฟราเรด (IR) (˚C)
1	0	0	0	0
	40	39	38	39
	50	48	51	49
	60	57	59	57
	70	72	71	70
	80	81	78	79
	90	92	89	88
	100	98	101	99
2	0	0	0	0
	40	38	39	38
	50	49	50	51
	60	59	58	59
	70	71	70	69
	80	80	79	81
	90	91	89	90
	100	99	100	101

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ตาราง จ.1 (ต่อ) ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิของการตรวจจับอุณหภูมิของเทอร์โมไฟล์เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐานต่าง ๆ

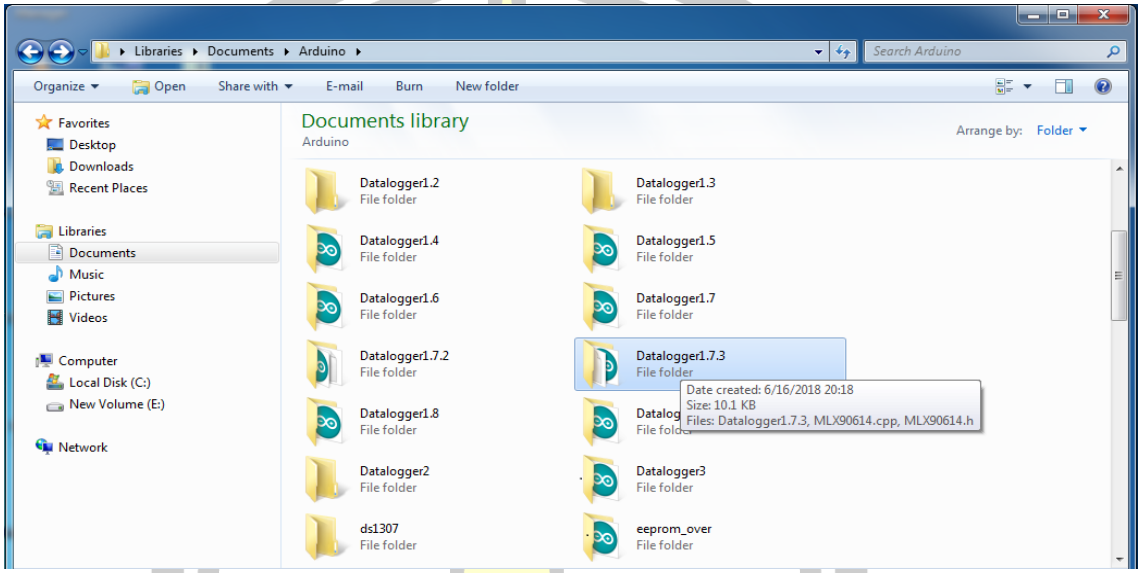
ครั้งที่	อุณหภูมิน้ำทดสอบ (˚C)	ผลการตรวจจับอุณหภูมิ		
		เทอร์โมไฟล์ TPA81 (˚C)	เทอร์โมคัปเปิล (TMC) (˚C)	อินฟราเรด (IR) (˚C)
3	0	0	0	0
	40	38	37	40
	50	51	49	48
	60	58	58	61
	70	73	72	71
	80	83	79	82
	90	91	86	90
	100	100	102	98



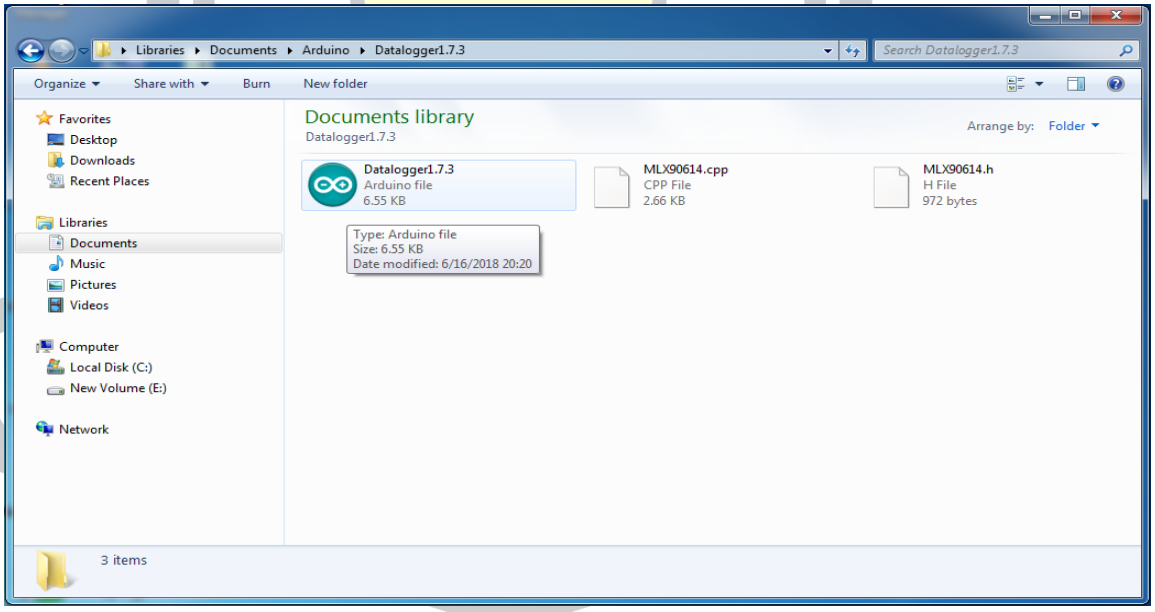
ภาพ จ.1 ผลการตรวจจับอุณหภูมิระหว่างเทอร์โมไฟล์ TPA81 กับเครื่องมือวัดอุณหภูมิตามมาตรฐานต่าง ๆ

2. วิธีการสอบเทียบเทอร์โมไฟล์ TPA81 สำหรับวัดอุณหภูมิ

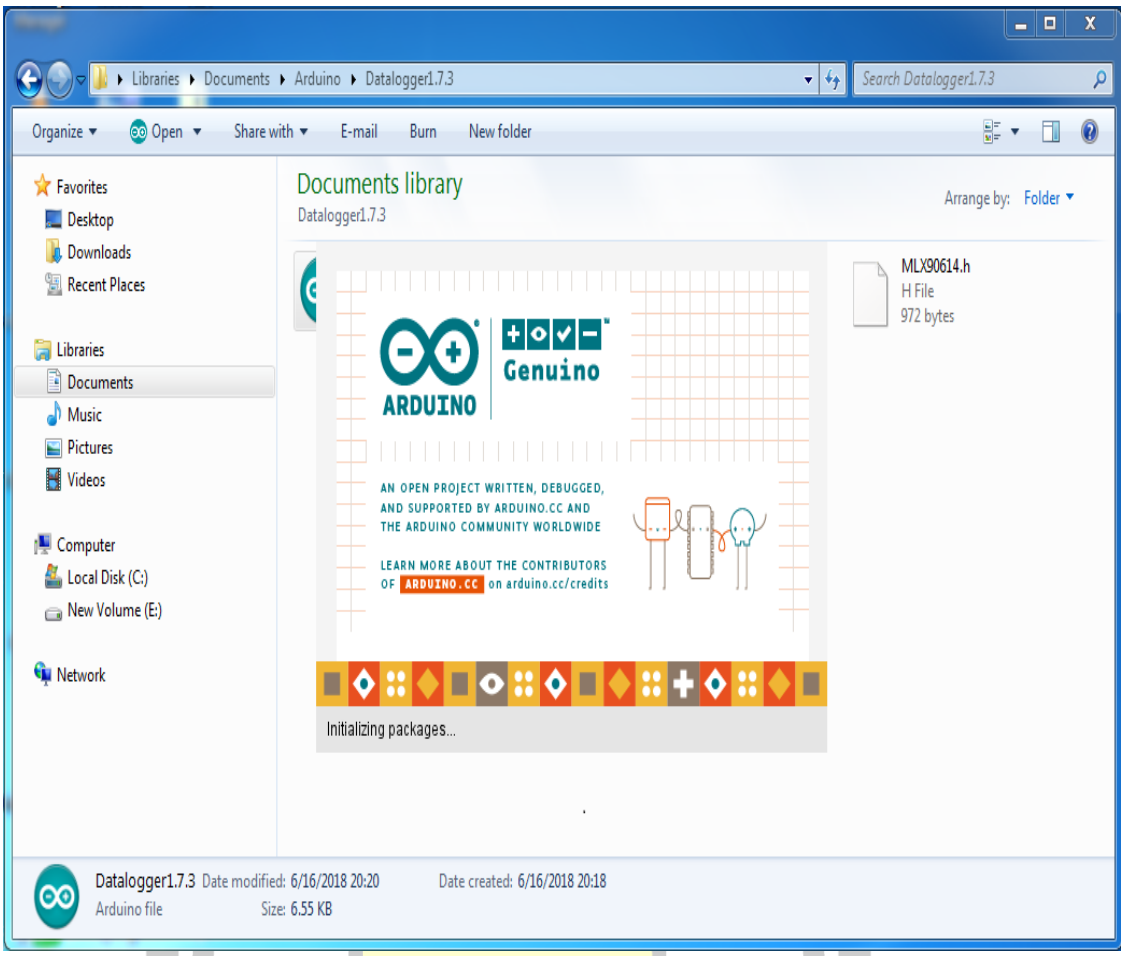
1. วิธีการสอบเทียบเทอร์โมไฟล์ ค้นหาแฟ้มที่เก็บไฟล์ของโปรแกรมที่ต้องการทำการสอบเทียบแล้วเปิดแฟ้มข้ามแล้วเปิดไฟล์ตาม ภาพ จ.2



ภาพ จ.2 แฟ้มโปรแกรมที่ต้องการสอบเทียบ



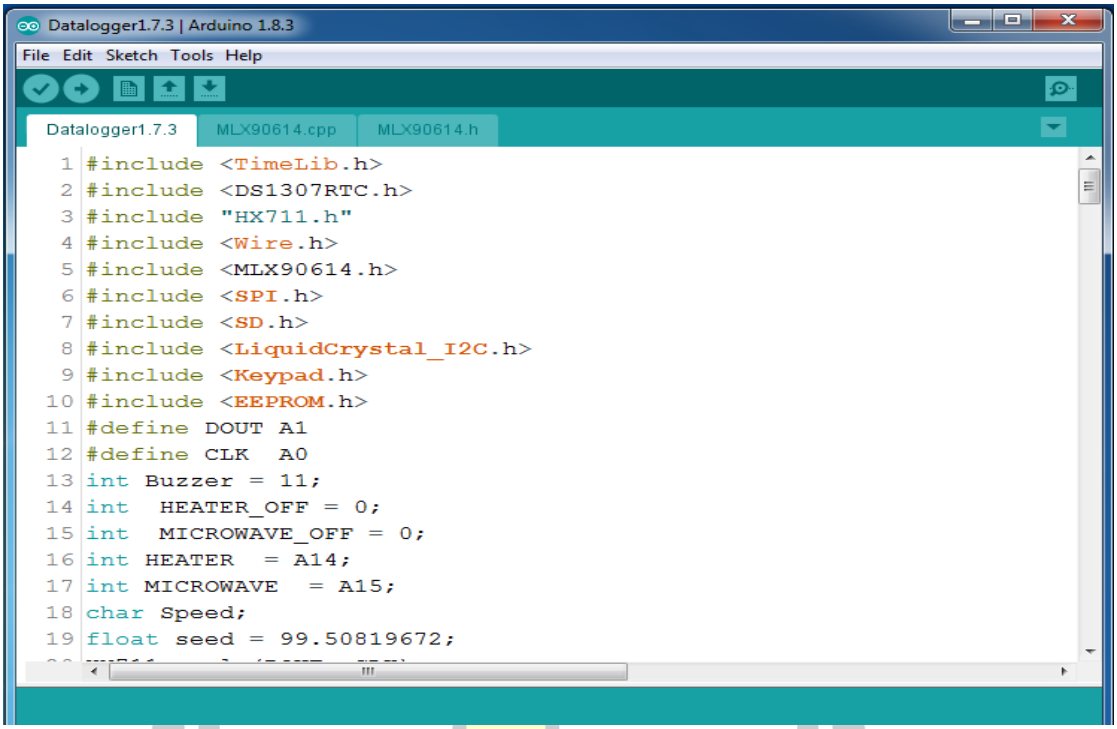
ภาพ จ.3 ไฟล์โปรแกรมที่ต้องการสอบเทียบ



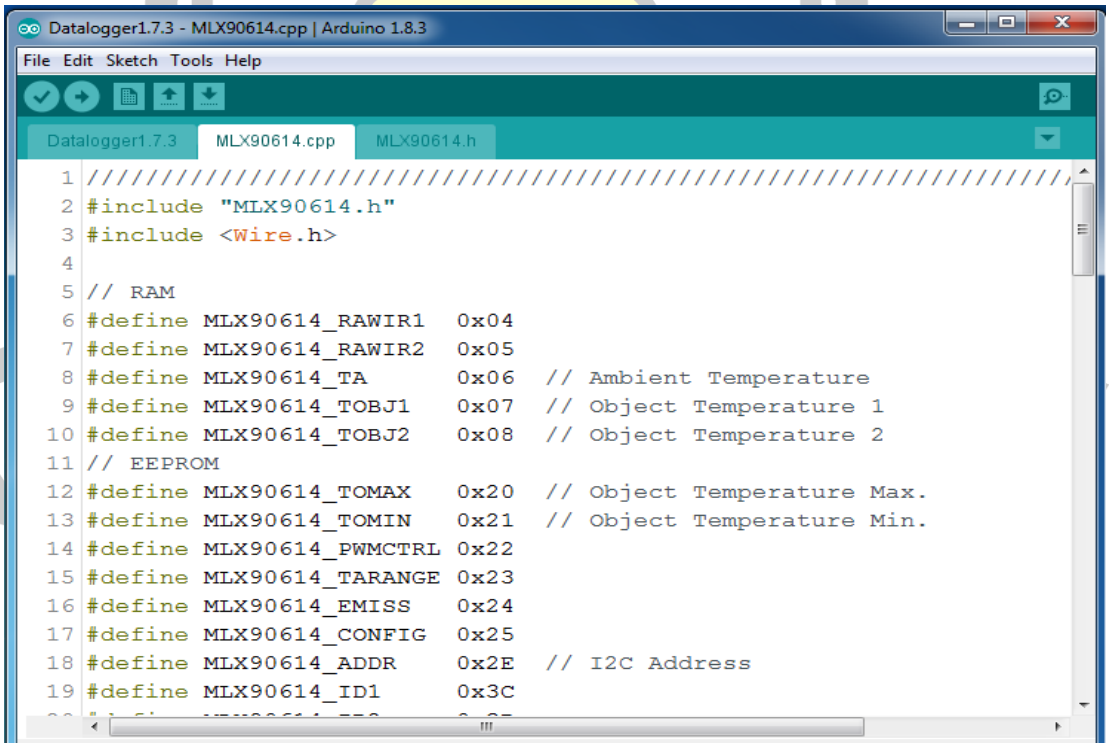
ภาพ จ.4 ไฟล์โปรแกรมกำลังเปิด

2. เมื่อโปรแกรมเปิดขึ้นมาจะอยู่ตรงส่วนโปรแกรมหลัก แล้วเลือกไปที่ไบรารี่ของโปรแกรม คือที่ MLK90614.cpp จากนั้นเข้าไปดูที่บรรทัดที่ 78-79 คือโค้ดการอ่านอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมรอบๆ ภายในห้องอบแห้ง และบรรทัดที่ 83-84 คือโค้ดการอ่านอุณหภูมิผิวของวัตถุที่ต้องการวัด และค่า offset ที่จะปรับเปลี่ยนตามการสอบเทียบ คือบรรทัดที่ 84 แถวที่ 21 คือเลขเทียบหน่วยขององศาเซลเซียล กับหน่วยของเควินสามารถปรับเปลี่ยนเป็นค่า offset ได้เพื่อความเที่ยงตรงในการวัดค่าอุณหภูมิ สามารถเรียงขั้นตอนดังแสดงในภาพ จ.5 -12

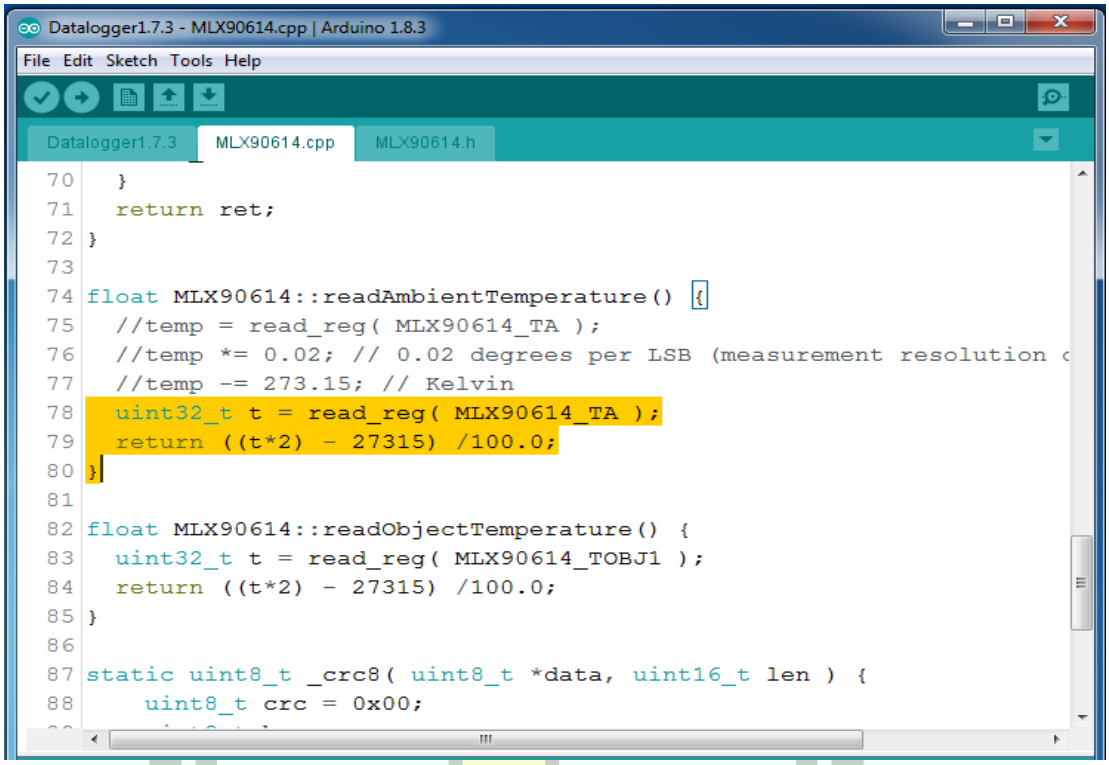
3. เมื่อปรับเปลี่ยนค่าแล้วบันทึกการแก้ไขแล้วโหลดโปรแกรมลงบอร์ดควบคุมแล้วทำการสอบเทียบอ่านค่าที่วัดได้กับค่าอุณหภูมิของเครื่องมืออุปกรณ์ที่นำมาสอบเทียบ และหากค่าที่วัดได้ยังคลาดเคลื่อนอยู่ให้ทำการปรับเปลี่ยนค่าใหม่ซ้ำไปเรื่อยๆ ตามลำดับจนกว่าค่าจะตามต้องการ



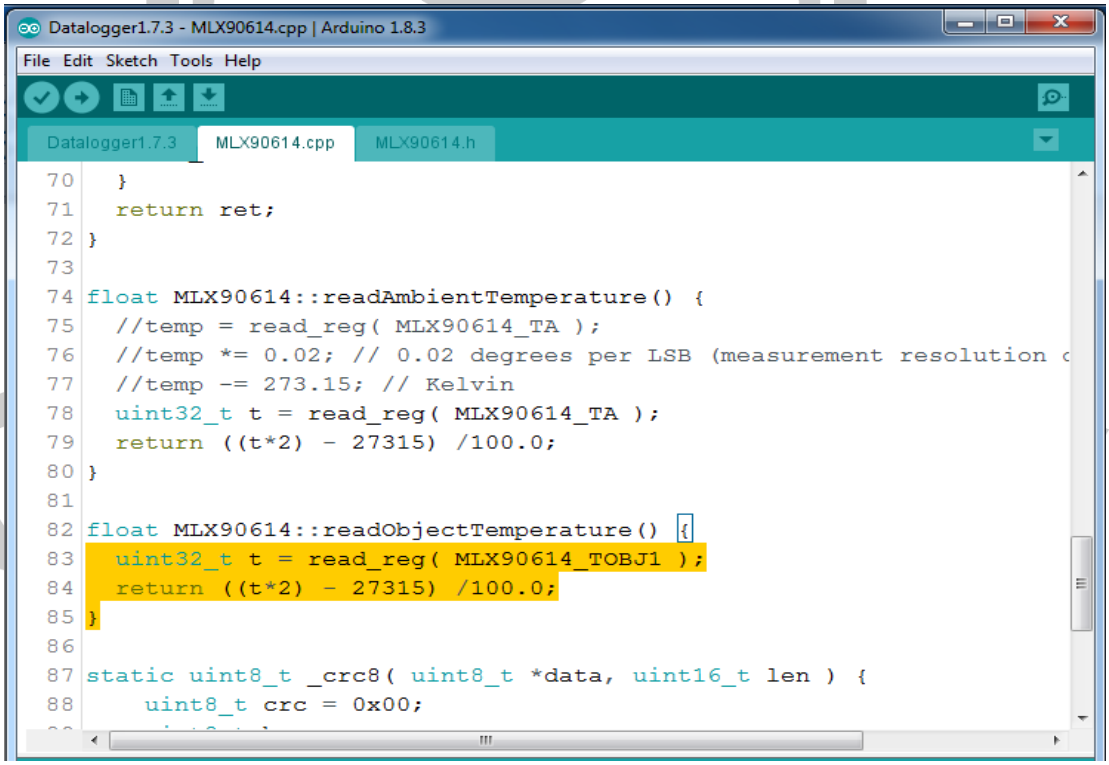
ภาพ จ.5 โปรแกรมหลัก



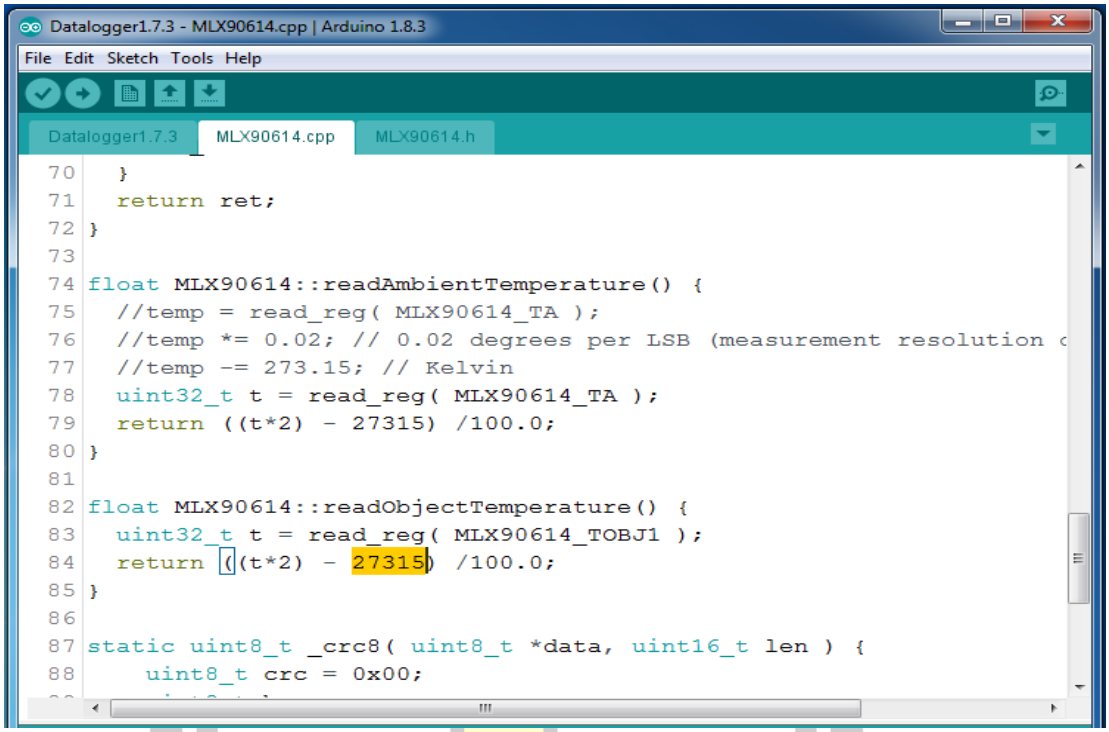
ภาพ จ.6 ไบรารี่ MLK90614.cpp



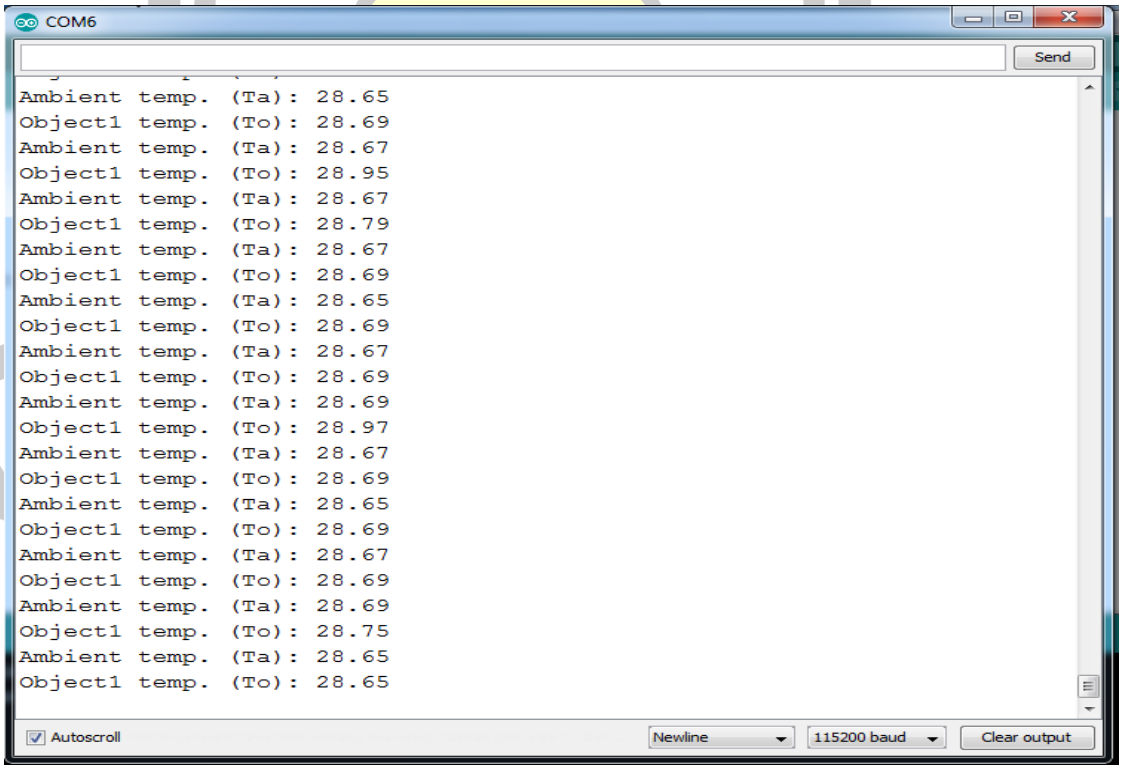
ภาพ จ.7 บรรทัดที่ 78-79 คือโค้ดการอ่านอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมข้างๆ (Ambient temp. (Ta))



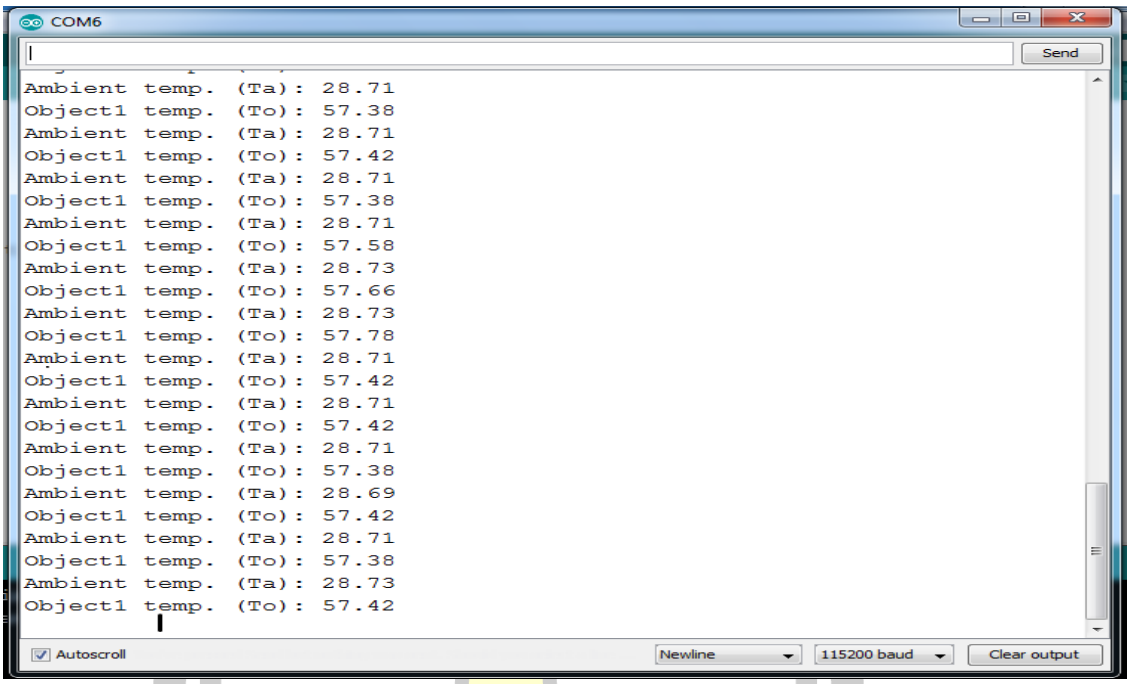
ภาพ จ.8 บรรทัดที่ 83-84 คือโค้ดการอ่านอุณหภูมิของวัตถุ (Object temp. (To))



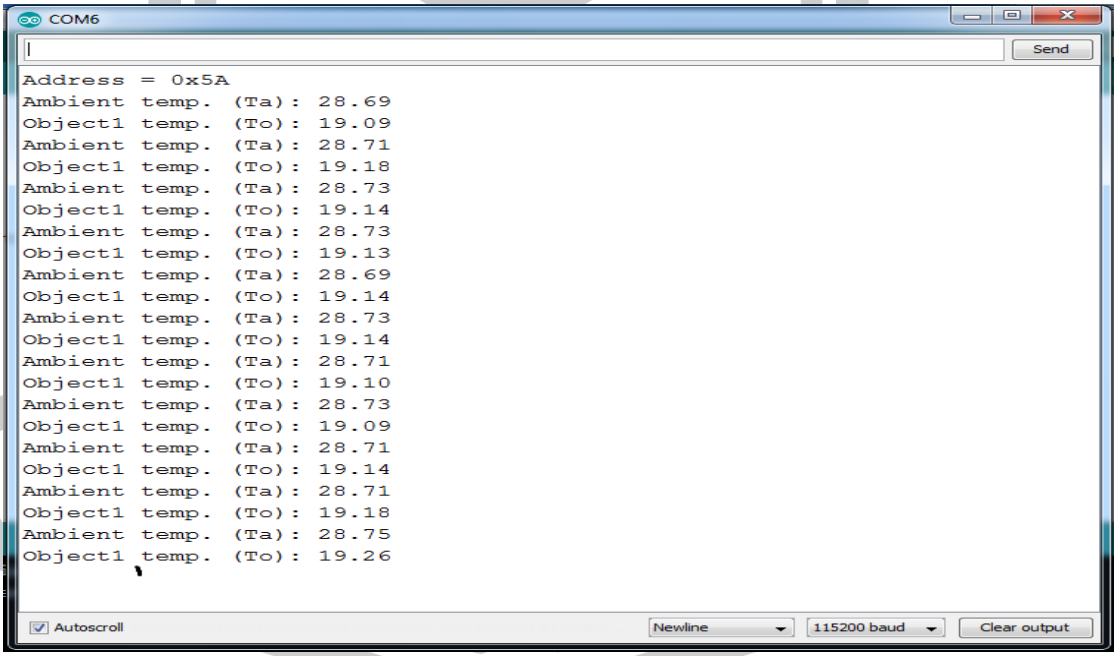
ภาพ จ.9 บรรทัดที่ 84 แถวที่ 21 คือ เลขเทียบหน่วยขององศาเซลเซียสกับหน่วยของเควิน



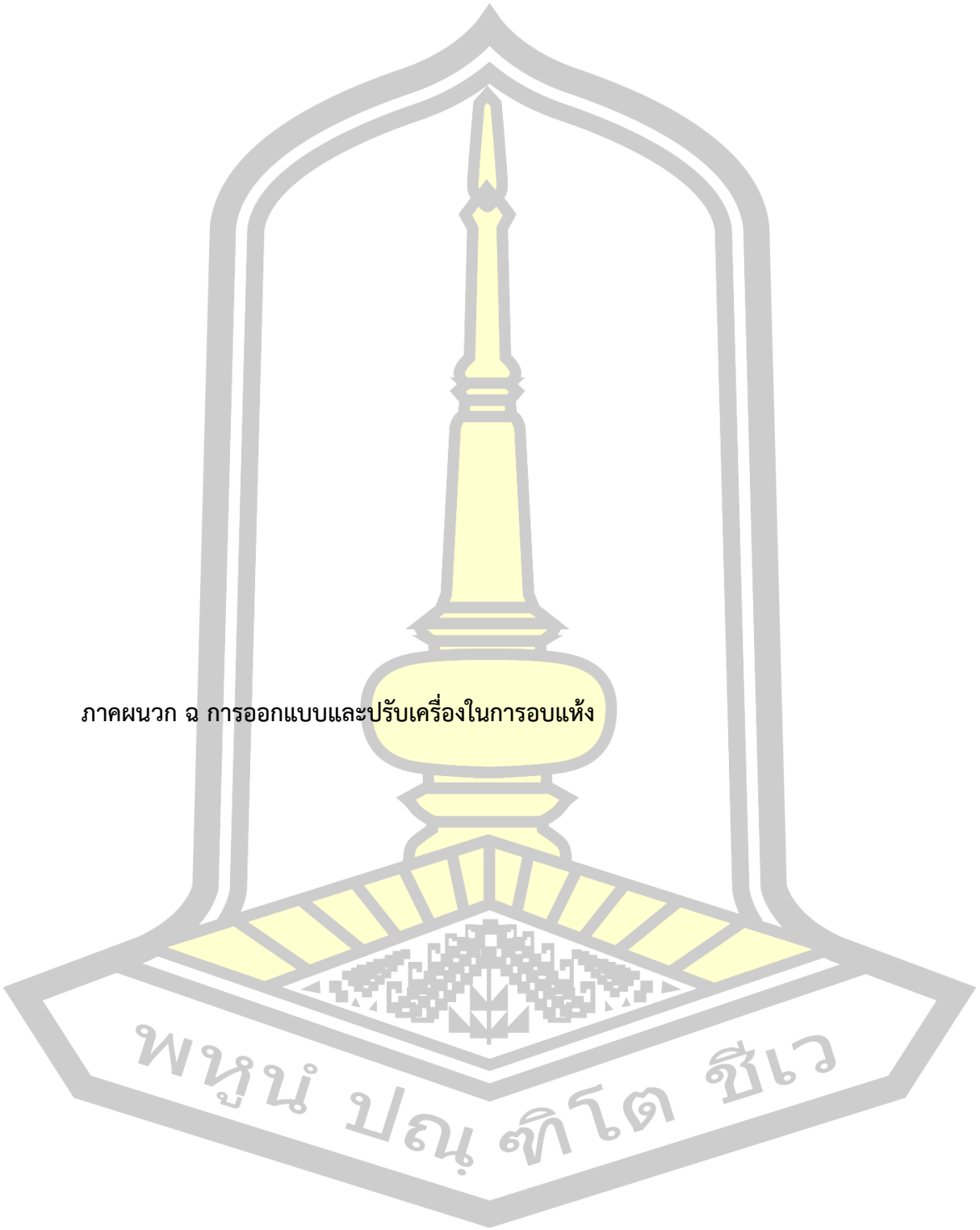
ภาพ จ.10 การอ่านค่าอุณหภูมิผ่านพอร์ตซีเรียล



ภาพ จ.11 การอ่านค่าอุณหภูมิผ่านพอร์ตซีเรียลค่า Error



ภาพ จ.12 การอ่านค่าอุณหภูมิผ่านพอร์ตซีเรียลค่า Error



ภาคผนวก ฉ การออกแบบและปรับเครื่องในการอบแห้ง

การวิเคราะห์ความเร็วลมในห้องอบแห้ง มีรายละเอียดดังนี้

1. การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านท่อ (Q)

จากสมการ $$Q = V_1 A_1$$

เมื่อ V_1 คือ ความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อ m/s

A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ m^2

แทนค่าในสมการ จะได้

$$= 5 \text{ m/s} \times (\frac{\pi}{4}(0.12)^2$$

$$Q = 0.056 \text{ } m^3/s$$

2. การคำนวณหาความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง (V_2)

จากสมการ $$V_2 = \frac{Q}{A_2}$$

เมื่อ A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง m^2

แทนค่าในสมการ จะได้

$$= \frac{0.056}{0.185x0.305}$$

$$V_2 = 0.99 \text{ m/s}$$

การหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า (Hydraulic Diameter, D_h)

จากสมการ $$D_h = \frac{4A_c}{p}$$

เมื่อ A_c คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดท่อทางออกอากาศ

p คือ ความยาวของเส้นรอบรูปท่อทางออกอากาศ

แทนค่าในสมการ จะได้

$$= \frac{4x0.011}{0.37}$$

D_h = 12 เซนติเมตร

พหุน ปฏิ โต ชีเว

การหาความยาวท่อที่ปรากฏ (Effective duct length, L_{eff})

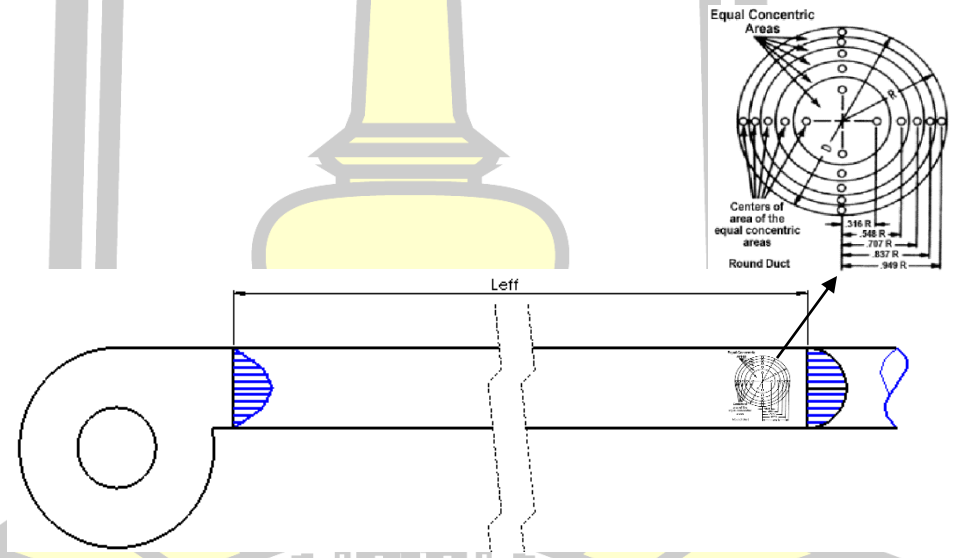
จากสมการ $L_{eff} = 10\ D_h$

เมื่อ L_{eff} คือ ขนาดความยาวท่อจากทางออกพัดลมถึงตำแหน่งที่จะวัดความเร็วลม (เซนติเมตร) ดังภาพประกอบ 47

แทนค่าในสมการ จะได้

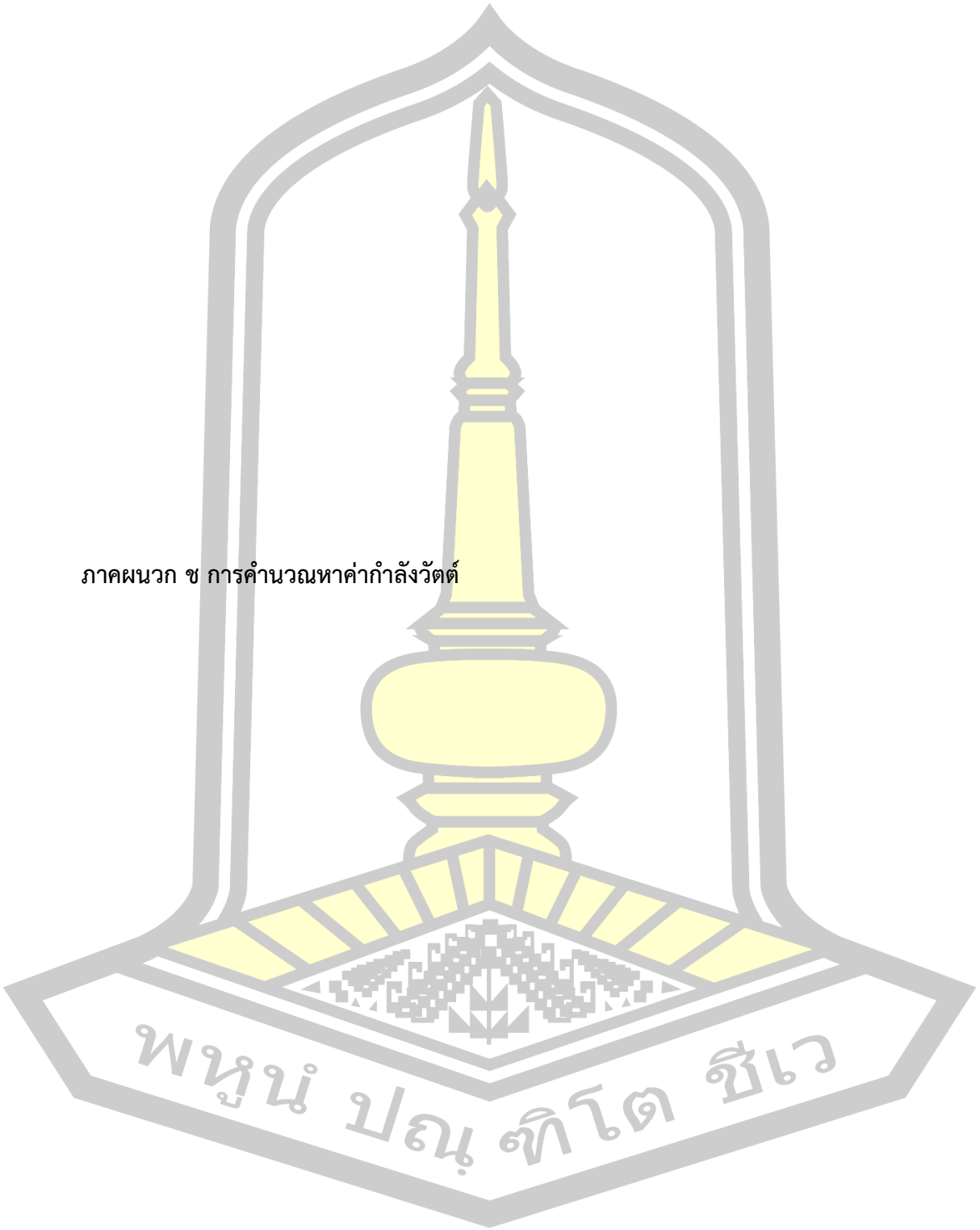
$= 10 \times 12$

$L_{eff} = 120$ เซนติเมตร



ภาพประกอบ 47 ขนาดระยะห่างจากทางออกพัดลมถึงตำแหน่งการวัดความเร็วลม

พหุน ปณฺฑิโต ชีเว



ภาคผนวก ช การคำนวณหาค่ากำลังวัตต์

การหาค่ากำลังวัตต์ต่อกรัม มีรายละเอียดดังนี้

1. การหากำลังอบแห้ง 1.57 วัตต์ต่อกรัม

จากสมการ $MP = \frac{4.18(m_w C_{p,w} \Delta T_w) + (m_g C_{p,g} \Delta T_g)}{t}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{4.18(250x4.19x6.5) + (450x1.91x3)}{60}$

= 656.26 วัตต์

จากสมการ $\text{Specific power} = \frac{MP}{m_m}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{157}{418}$

$= 1.57\ Wg^{-1}$

2. การหากำลังอบแห้ง 2.56 วัตต์ต่อกรัม

จากสมการ $MP = \frac{4.18(m_w C_{p,w} \Delta T_w) + (m_g C_{p,g} \Delta T_g)}{t}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{4.18(250x4.19x11) + (450x1.91x4.5)}{60}$

= 1,070.71 วัตต์

จากสมการ $\text{Specific power} = \frac{MP}{m_m}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{1{,}070.71}{418}$

$= 2.56\ Wg^{-1}$

3. การหากำลังอบแห้ง 3.55 วัตต์ต่อกรัม

จากสมการ $MP = \frac{4.18(m_w C_{p,w} \Delta T_w) + (m_g C_{p,g} \Delta T_g)}{t}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{4.18(250x4.19x14.2) + (450x1.91x7.5)}{60}$

= 1,483.9 วัตต์

จากสมการ $\text{Specific power} = \frac{MP}{m_m}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{1,483.9}{418}$

= 3.55 Wg^{-1}

4. การหากำลังอบแห้ง 4.39 วัตต์ต่อกรัม

จากสมการ $MP = \frac{4.18(m_w C_{p,w} \Delta T_w) + (m_g C_{p,g} \Delta T_g)}{t}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{4.18(250x4.19x18.2) + (450x1.91x8.5)}{60}$

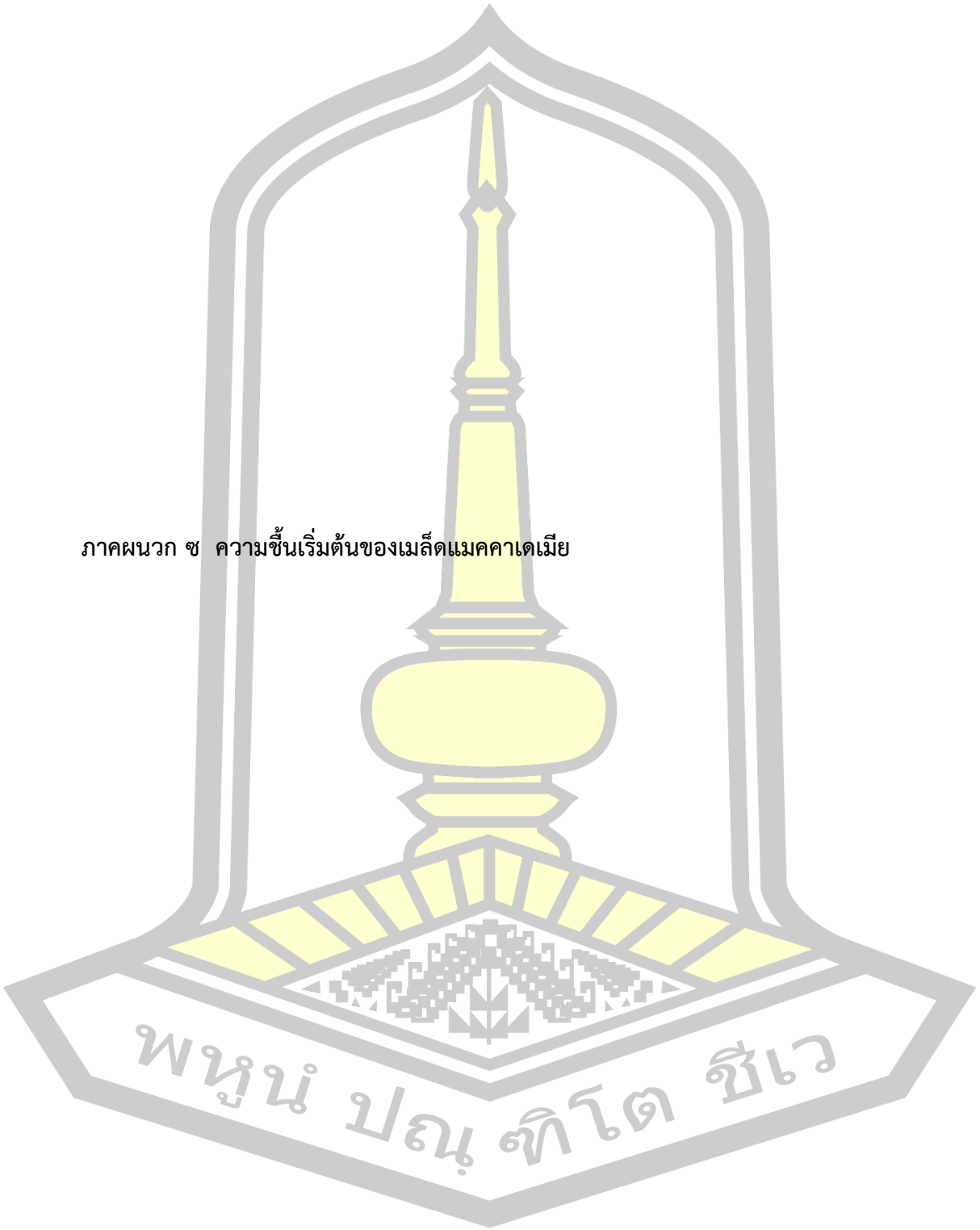
= 1,835.02 วัตต์

จากสมการ $\text{Specific power} = \frac{MP}{m_m}$

แทนค่าในสมการ จะได้

$= \frac{1,835.02}{418}$

= 4.39 Wg^{-1}



ภาคผนวก ซ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดแมคคาเดเมีย

ตาราง ซ.1 ค่าความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดแมคคาเดเมีย

ครั้งที่	น้ำหนักเม็ดก่อนอบ (g)	น้ำหนักเม็ดหลังอบ (g)	ปริมาณความชื้น (%db.)
1	13.22	11.54	14.51
2	17.55	15.45	13.56
3	15.72	13.85	13.44
4	13.07	11.55	13.16
5	17.54	15.69	12.00
6	13.12	11.57	13.40
7	15.77	13.93	13.20
8	15.32	13.52	13.31
9	13.39	11.80	13.41
10	15.11	13.24	14.11
11	17.41	15.38	13.21
12	16.31	14.43	13.00
13	14.54	12.82	13.40
14	16.17	14.21	13.78

พหุน ปณ ฑิโต ชีเว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายปกรณ์เกียรติ ภูกองพลอย
วันเกิด	วันที่ 20 พฤศจิกายน พ.ศ. 2517
สถานที่เกิด	อำเภอหนองกุงศรี จังหวัดกาฬสินธุ์
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 90 หมู่ 8 ตำบลชัยพฤกษ์ อำเภอเมืองเลย จังหวัดเลย รหัสไปรษณีย์ 42000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	พนักงานมหาวิทยาลัย ตำแหน่ง อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย ตำบลในเมือง อำเภอในเมือง จังหวัดเลย รหัสไปรษณีย์ 42000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2539 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาวิชาช่างยนต์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2541 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น พ.ศ. 2549 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ พ.ศ. 2551 ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (คอ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2560 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	Pakonkiad Poogungploy, Nattapol Poomsa-ad and Lamul Wiset. (2014). The effects of combined microwave-hot air drying on drying behavior, surface temperature and energy consumption of macadamia nuts drying. 7th TSAE International Conference (TSAE2014) April 2-4, 2014; Pranakorn Sri Ayutthaya, THAILAND.p.146-150. Pakonkiad Poogungploy, Nattapol Poomsa-ad and Lamul Wiset.

(2014). Macadamia nuts drying using microwave-hot air combination with surface temperature control. The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI), 28-30 August 2014, Apsara Angkor Resort & Conference, Siem Reap, Kingdom of Cambodia.p.132-137.

Pakonkiad Poogungploy, Nattapol Poomsa-ad and Lamul Wiset. (2018). Control of microwave assisted macadamia drying. Journal of Microwave power and electromagnetic energy. 52(1): 60-72.