วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

บทความวิจัย

การอบแห้งใบกะเพราด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง

อณัฐธิชา จันทะพันธ์[1], สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ[2*] และ ธนิต สวัสดิ์เสวี[3]

[1] สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมยานยนต์และพลังงาน, ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[2] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก (CTAE), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[3] สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ, คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sumol.s@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 ธันวาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 24 กุมภาพันธ์ 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 2 มีนาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 18 มีนาคม 2564

บทคัดย่อ: ใบกะเพราเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาหารไทย แต่อย่างไรก็ตามใบกระเพราเก็บรักษาได้ไม่นาน ด้วยเหตุนี้การใช้กระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาใบกะเพรา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและคุณภาพในด้านสีของใบกะเพราอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนแบบสายพานลำเลียง ใบกะเพราจะถูกอบแห้งที่ช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟช่วงกำลัง 300 ถึง 500 วัตต์ ความเร็วลมตั้งไว้ที่ 0.3 เมตรต่อวินาที และมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ในขณะที่ใช้ความเร็วสายพาน (ไป-กลับ) 0.02 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า อัตราการลดลงของความชื้นในใบกะเพราจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้ง และกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความสว่าง (L^*) และสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ค่าความสว่าง และสีเหลือง จะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งใบกะเพราด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในการทดลองนี้คือ ใช้ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอบแห้ง 80 องศาเซลเซียส และกำลังไมโครเวฟ 500 วัตต์ (2x250 W)

คำสำคัญ: ใบกะเพรา; ลมร้อน; ลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ; ปริมาณการใช้พลังงานจำเพาะ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

บทความวิจัย

Holy Basil Leaves Drying using Combined Microwave and Hot Air Conveyer Belt Dryer

Anatticha Chanthaphan[1], Sumol Sae-heng Pisitsungkakarn[2*] and Thanit Swasdisevi[3]

[1] Automotive and Energy Engineering Technology, Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[2] Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy (CTAE), College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[3] Division of Thermal Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[*] Corresponding author, E-mail: sumol.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 23 December 2020; Revised 24 February 2021; Accepted: 2 March 2021
Online Published: 18 March 2021

Abstract: Holy basil is an important ingredient of Thai food. However, it cannot preserve for a long time since the use of a suitable drying process is necessary to prolong the shelf-life of holy basil. This research aimed to investigate the drying kinetics, specific energy consumption and quality (in term of color) of dried holy basil leaves using a microwave-hot air conveyer belt dryer. The holy basil leaves was dried at temperature range 60 to 80°C and microwave powers range 300 to 500 watt. Air velocity was set at 0.3 m/s with 80% of recycled air while the belt conveyor velocity (forward-backward) was 0.02 m/s. The results showed that the rate of moisture reduction increased with an increase in drying temperature and microwave power. For hot air drying, it was found that the lightness (L^*) and yellowness (b^*) decreased with an increase in temperature. For microwave-hot air drying, the L^* and b^* value increased with and increased in microwave power. The specific energy consumption decreased with an increase in the microwave power. Based on this experiment, the optimum condition for holy basil drying using microwave-hot air drying was the use of an air velocity 0.3 m/s, temperature of 80°C and microwave power of 500 watt (2x250 W).

Keywords: Holy basil leaves; Hot air drying; Microwave-hot air drying; Specific energy consumption

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

บทความวิจัย

1. บทนำ

กะเพราเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในไทยและต่างประเทศ โดยเอกลักษณ์ของใบกะเพราจะมีกลิ่นหอมและมีรสเผ็ดเหมาะสำหรับนำมาประกอบอาหารโดยเฉพาะเมนูผัดกะเพราและอาหารจำพวกต้มยำ รวมถึงเป็นสรรพคุณทางยาเพื่อช่วยในการบรรเทาอาการหรือโรคต่าง ๆ ที่เป็นอยู่ซึ่งสามารถใช้เป็นยาขับลมแก้อาการท้องอืดท้องเฟ้อและช่วยทำให้เลือดลมไหลเวียนดีขึ้น [1] เป็นต้น แต่ปัจจุบันใบกะเพราที่จำหน่ายในตลาดต่างประเทศหาซื้อได้ยากและมีราคาสูง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการดูแลและเก็บรักษาใบกะเพราเพื่อไม่ให้ใบกะเพราเกิดการเหี่ยวเฉาและเน่าเสีย อีกทั้งการขนส่งยังต้องใช้ระยะเวลานานกว่าจะถึงมือผู้บริโภคซึ่งการที่จะนำใบกะเพราไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั้น ใบกะเพราควรมีคุณภาพที่ดีและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับใบกะเพราสดมากที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการนำใบกะเพราไปผ่านกระบวนการถนอมอาหารในวิธีการต่าง ๆ โดยกระบวนการอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาคุณภาพ [2] และสามารถเพิ่มมูลค่าของใบกะเพราได้ ซึ่งกระบวนการอบแห้งนั้นมีหลากหลายวิธีเช่น การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด [3] การอบแห้งด้วยลมร้อน [4] การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ [5] การอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ [6] การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดคลื่นไกล [7] เป็นต้น

โดยทั่วไปจะนิยมใช้วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่มีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ไม่สูงมากนัก การใช้งานไม่ซับซ้อน แต่การอบแห้งด้วยวิธีนี้ใช้เวลาค่อนข้างนาน เป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเสื่อมคุณภาพทั้งในแง่ของทางกายภาพและทางโภชนาการ อีกทั้งมีการสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทำให้ใช้พลังงานมาก ส่งผลให้กระบวนการอบแห้งไม่มีประสิทธิภาพ [8-10] จากงานวิจัยการอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรพบว่า การอบแห้งใบมะกรูดด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50°C ความเร็วลม 0.3 m/s มีอัตราส่วนความชื้นต่ำที่สุด โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 420 min และใช้พลังงานรวมทั้งหมด 411.48 MJ/kg (น้ำระเหย) ซึ่งใช้เวลาและพลังงานมากที่สุด [11] ปัจจุบันจึงมีการนำคลื่นไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟมีคุณสมบัติในการกำจัดความชื้นภายในเนื้อวัสดุได้โดยไม่ทำให้ผิวด้านบนของวัสดุเกิดความเสียหายและทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะช่วยในการเร่งการระเหยของน้ำภายในวัสดุ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟในระดับพลังงานที่แตกต่างกันคือ 100, 300 และ 450 W จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของกำลังไมโครเวฟ [10,12] แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวเป็นระยะเวลานาน จะทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในวัสดุจนผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหายระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการนำพริกชี้ฟ้าไปอบแห้งด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวจะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงเมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้นและที่คลื่นไมโครเวฟสูงกว่า 106.93 W จะส่งผลให้พริกเกิดความเสียหายเป็นอย่างมากและก่อให้เกิดการติดไฟภายในห้องอบได้ [13] ดังนั้นเพื่อลดความเสียหายในการอบแห้ง สามารถนำเทคนิค

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมาใช้โดยการให้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นช่วง ๆ จะช่วยลดพลังงานในการอบแห้งลง ส่งผลให้ค่าอัตราการอบแห้งสูงขึ้นและเกิดการกระจายความชื้นที่สม่ำเสมอ [13-14] อีกทั้งมีสีและกลิ่นใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์สด ตลอดจนได้คุณสมบัติของเนื้อสัมผัสที่ดีในเวลาที่รวดเร็วและประหยัดพลังงานกว่าวิธีอื่น [15]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำไมโครเวฟมาทำงานร่วมกับลมร้อน เพื่อใช้ศึกษากระบวนการอบแห้งของใบกะเพราในกรณีต่าง ๆ ที่จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีคุณภาพ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น สามารถเป็นแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปได้

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ใช้ใบกะเพราสดที่ผ่านมาตรฐาน GAP จากผู้ประกอบการ โดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล ค่าความละเอียด 0.01 g (Sartorius BSA3202S-CW) ค่าความคลาดเคลื่อน 0.05 g ในการชั่งน้ำหนักรวมไปถึงการหาความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายของใบกะเพราก่อนและหลังจากการอบแห้ง ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียง ดังรูปที่ 1

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟแสดงดังรูปที่ 2 โดยใช้ขดลวดให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ร่วมกับเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟทั้งหมด 2 ตัวขนาด 2x150, 2x200 และ 2x250 W ที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ปรับความเร็วลมเฉลี่ยภายในห้องอบแห้ง 0.3 m/s โดยใช้ลมร้อนหมุนเวียนที่ 80% เพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานจากการสูญเสียความร้อน และปรับความเร็วสายพาน (ไป-กลับ) ไว้ที่ 0.02 m/s

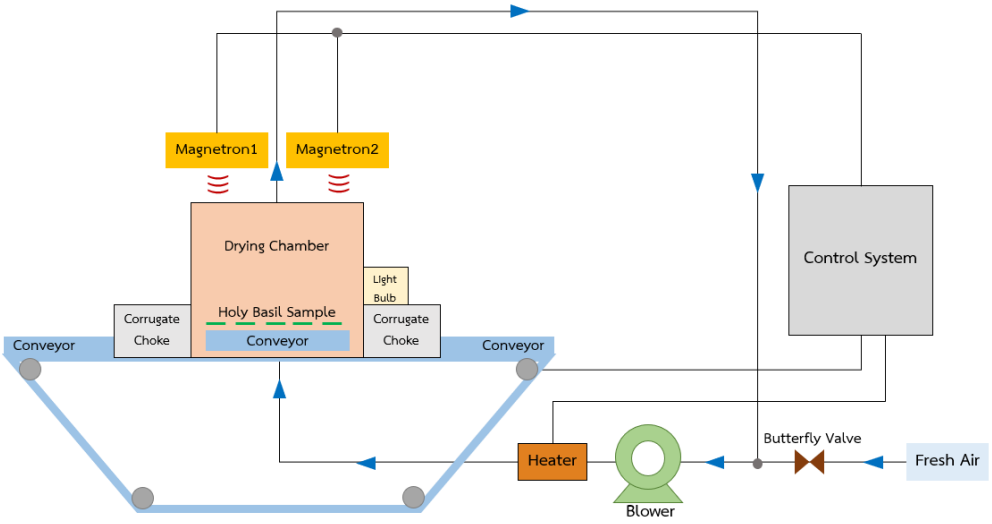
รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ [16]

เครื่องทดสอบคุณภาพด้านสี Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) ที่สามารถวิเคราะห์ Reflectance graph ได้ ซึ่งมีการกำหนดมาตรฐานทางการวิจัยโดยใช้ระบบ CIE Lab scale สำหรับวัดค่าคุณภาพสีของใบกะเพราก่อนและหลังการอบแห้ง โดยที่ L* คือ ค่าความสว่าง (100), มืด (0) ค่า a* คือ ค่าสีเขียว (-a*), ค่าสีแดง (+a*) และค่า b* คือ ค่าสีน้ำเงิน (-b*), ค่าสีเหลือง (+b*)

2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบก่อนการทดลอง การอบแห้ง และการทดสอบคุณภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003



รูปที่ 2 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

2.2.1 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบก่อนการทดลอง

การหาค่าความชื้นเริ่มต้นโดยการนำใบกะเพราสดมาล้างทำความสะอาดและซับน้ำออกให้แห้ง แล้วทำการชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิตอลให้ได้ใบกะเพราสดประมาณ 2 g ตัดแบ่งเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อทำการอบแห้งหาค่าความชื้นเริ่มต้น ด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103±2°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตามวิธีการ AOAC (1990)

การเตรียมใบกะเพราเพื่อใช้ในการอบแห้ง โดยการนำใบกะเพราสดมาทำการชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิตอลให้ได้ 20 g แล้วล้างทำความสะอาดและซับน้ำก่อนทำการอบแห้ง

2.2.2 ขั้นตอนการอบแห้ง

ในขั้นตอนนี้การทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ อบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

ในส่วนแรกนำใบกะเพราสดน้ำหนัก 20 g ที่เตรียมไว้มาทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ความเร็วลม 0.3 m/s โดยบันทึกค่าที่จำเป็นทุก 3 min จนได้ค่าความชื้นสุดท้าย 6-8% (d.b.) จากนั้นทำการจดบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลมขดลวดความร้อน และไมโครเวฟ จากมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานจำเพาะ

ในส่วนที่สองนำใบกะเพราสดน้ำหนัก 20 g ที่เตรียมไว้มาทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250, 2x200 และ 2x250 W ความเร็วลม 0.3 m/s ความเร็วสายพาน 0.02 m/s โดยบันทึกค่าที่จำเป็นทุก 3 min จนได้ค่าความชื้นสุดท้าย 6-8% (d.b.) โดยปริมาณความชื้นหาได้จากสมการที่ (1)

$$MC_d = \frac{(w-d)}{d} \quad (1)$$

โดยที่ MC_d คือ ความชื้นฐานแห้ง (d.b.), เศษส่วน
w คือ มวลของใบกะเพราสด, kg
d คือ มวลของใบกะเพราอบแห้ง, kg

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

จากนั้นทำการจดบันทึกค่าพลังงานของเครื่องเป่าลม ขดลวดความร้อน และไมโครเวฟ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบกะเพราดังสมการที่ (2)

$$SEC_{dry\ solid} = \frac{E_{blower} + E_{heater} + E_{microwave,\ MJ}}{Mass,\ kg} \quad (2)$$

โดยที่ $SEC_{dry\ solid}$ คือ พลังงานจำเพาะสำหรับอบใบกะเพราแห้งหนึ่งกิโลกรัม, MJ/kg

E_{blower} คือ พลังงานที่ใช้ในเครื่องเป่าลม, MJ

E_{heater} คือ พลังงานที่ใช้ในขดลวดความร้อน, MJ

$E_{microwave}$ คือ พลังงานที่ใช้ในไมโครเวฟ, MJ

Mass คือ น้ำหนักใบกะเพราอบแห้ง, $kg_{(dry\ solid)}$

2.2.3 ขั้นตอนทดสอบคุณภาพ

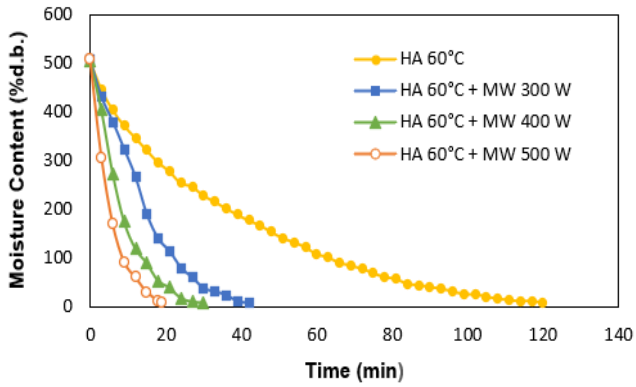
ทำการทดสอบคุณภาพด้านสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) โดยพิจารณาจากค่า L^* a^* และ b^* ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ใบ ทำการวัดสีของใบกะเพราทั้ง 2 ด้าน และนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี ANOVA

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งใบกะเพรา

การทดลองนี้เพื่อหาปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา โดยมีรายละเอียดดังนี้

กรณีอุณหภูมิลมร้อน 60°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W วัดความชื้นเริ่มต้นได้ 506.75% (d.b.) จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงช้ากว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 120 min และเมื่ออบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ 2x150, 2x200 และ 2x250 W พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงเร็วขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 42 30 และ 19 min ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน 60°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250 W ใช้เวลาน้อยที่สุด เนื่องจากไมโครเวฟจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนก่อให้เกิดความร้อนขึ้นทำให้น้ำระเหยออกมาจากวัสดุได้เร็วขึ้น

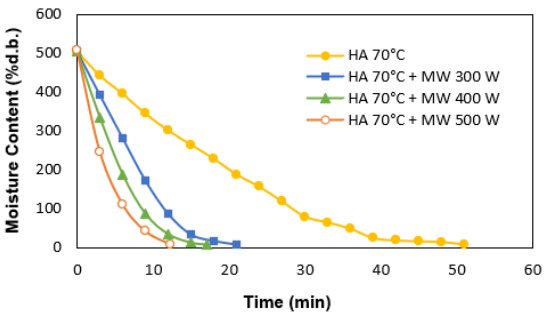


รูปที่ 3 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เทียบกับเวลากรณีอุณหภูมิลมร้อน 60°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W

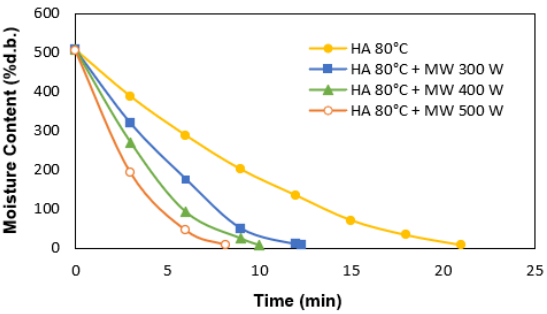
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

กรณีอุณหภูมิลมร้อน 70°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W วัดความชื้นเริ่มต้นได้ 506.75% (d.b.) จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงช้ากว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 51 min และเมื่ออบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ 2x150, 2x200 และ 2x250 W พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงเร็วขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 21 17 และ 12.30 min ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน 70°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250 W ใช้เวลาน้อยที่สุด กรณีอุณหภูมิลมร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W วัดความชื้นเริ่มต้นได้ 506.75% (d.b.) จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จะทำให้ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงช้ากว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี โดยใช้เวลาในการอบแห้งทั้งหมด 21 min และเมื่ออบลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟที่ 2x150, 2x200 และ 2x250 W พบว่า ปริมาณความชื้น (Moisture Content) ลดลงเร็วขึ้นตามกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 12.30 10 และ 8.15 min ตามลำดับ จะเห็นได้ชัดว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟ 2x250 W ใช้เวลาน้อยที่สุด

ความเร็วของลมร้อนส่งผลต่อการอบแห้งใบกะเพรา โดยเมื่อความเร็วของลมร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะส่งผลต่อการอบแห้งมากกว่าผลจากการเพิ่มความเร็วลมดังกล่าว ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วลมเพียง 0.3 m/s เนื่องจากถ้าใช้ความเร็วลมที่มีค่าสูงกว่านี้ จะส่งผลให้ใบกะเพราปลิวภายในห้องอบได้



รูปที่ 4 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เทียบกับเวลากรณีอุณหภูมิลมร้อน 70°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W



รูปที่ 5 ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เทียบกับเวลากรณีอุณหภูมิลมร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x150, 2x200 และ 2x250 W

นอกจากนี้ผลของการเพิ่มอุณหภูมิและกำลังของไมโครเวฟให้สูงขึ้น หากมีค่าสูงเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลขึ้นที่ใบกะเพราและส่งผลให้เกิดรอยไหม้หรือจุดดำที่ใบกะเพราอบแห้ง รวมทั้งมีผลทำให้ใบกะเพราสูญเสียคุณภาพตามมาอีกด้วย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

3.2 คุณภาพของใบกะเพราอบแห้ง

ใบกะเพราอบแห้งที่ได้จากการทดลองด้วยลมร้อนเทียบกับลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกเงื่อนไข จะถูกนำไปทดสอบคุณภาพด้านสีด้วยการวัดค่าสี *L* a** และ *b** ของใบกะเพราอบแห้งเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด โดยผลการทดสอบด้านสีของใบกะเพราด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ค่าสีจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ANOVA

เมื่อพิจารณาใบกะเพราอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งทางด้านหน้า และด้านหลังพบว่าค่า *L** และ *b** จะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนของใบกะเพราพบว่าเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นค่า *L** และ *b** จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการอบแห้งใบกะเพราโดยใช้ไมโครเวฟกำลัง 2x250 W ที่ลมร้อนอุณหภูมิ 70°C และ 80°C จะมีค่าความสว่าง (*L**) ดีที่สุด คือ 27.51±0.26 และ 27.53±0.36 ตามลำดับ ในขณะที่เงื่อนไขที่ใช้ไมโครเวฟกำลัง 2x200 W ที่ลมร้อนอุณหภูมิเดียวกันจะมีค่าสีแดง (*a**) ดีที่สุด คือ 0.40±0.62 และ 0.37±0.48 ตามลำดับ สำหรับค่าสีเหลือง (*b**) ของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C พบว่า ที่กำลังไมโครเวฟ 2 x 250 W อุณหภูมิลมร้อน 80°C ค่าสีเหลืองมีค่าน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาสีของใบกะเพราทั้ง *L* a** และ *b** พบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟกำลัง 2x250 W และลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ให้ค่าสีของใบกะเพรามีค่าดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด

ตารางที่ 1 ค่าสี L* a* b* ของด้านหน้าและด้านหลังของใบกะเพราอบแห้งเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด

Condition	*L**		*a**		*b**	
	Front	Back	Front	Back	Front	Back
Fresh Basil	24.82±0.58^{b}	28.49±1.18^{a}	-6.97±0.34^{d}	-6.71±0.19^{f}	19.13±1.18^{a}	19.34±0.37^{a}
HA 60°C	20.13±0.65^{ef}	20.49±1.66^{f}	1.74±0.26^{b}	1.73±1.14^{abc}	15.00±2.88^{bcd}	13.53±1.93^{de}
HA-MW 60°C, 2x150 W	20.68±2.47^{de}	22.98±1.53^{de}	2.15±0.34^{ab}	1.82±0.51^{ab}	12.06±1.48^{ef}	13.96±1.76^{cd}
HA-MW 60°C, 2x200 W	20.25±2.87^{def}	21.77±0.63^{def}	2.56±0.67^{a}	2.23±0.52^{a}	12.57±0.89^{ef}	12.62±1.09^{de}
HA-MW 60°C, 2x250 W	22.06±0.35^{cde}	22.28±1.85^{def}	1.60±0.23^{b}	1.72±0.37^{abc}	11.90±0.34^{ef}	12.86±1.13^{de}
HA 70°C	20.43±1.93^{def}	20.87±1.44^{ef}	0.62±0.25^{c}	1.17±0.56^{abcde}	12.80±1.19^{def}	12.17±0.96^{de}
HA-MW 70°C, 2x150 W	23.64±1.16^{bc}	23.76±1.05^{cd}	1.71±0.77^{b}	1.46±1.21^{abcd}	13.29±1.47^{cde}	13.25±0.89^{de}
HA-MW 70°C, 2x200 W	24.47±1.66^{bc}	26.19±0.42^{ab}	0.40±0.62^{c}	0.85±0.78^{bcde}	15.38±0.57^{bc}	16.41±2.76^{bc}
HA-MW 70°C, 2x250 W	27.51±0.26^{a}	27.34±1.17^{ab}	0.51±0.34^{c}	-0.02±0.18^{e}	16.82±0.39^{b}	16.61±1.90^{b}
HA 80°C	17.78±1.41^{f}	20.41±1.91^{f}	0.73±0.66^{c}	0.98±0.17^{bcde}	10.69±0.19^{f}	12.46±0.53^{de}
HA-MW 80°C, 2x150 W	20.93±1.25^{de}	21.31±1.03^{ef}	0.69±0.26^{c}	0.78±0.43^{bcde}	11.28±0.48^{ef}	11.21±1.24^{e}
HA-MW 80°C, 2x200 W	22.99±1.25^{bcd}	25.62±1.41^{bc}	0.37±0.48^{c}	0.59±0.38^{cde}	15.57±0.47^{bc}	14.60±1.31^{bcd}
HA-MW 80°C, 2x250 W	27.53±0.36^{a}	28.25±0.29^{a}	0.72±0.27^{c}	0.41±0.62^{de}	15.48±1.95^{bc}	16.63±1.31^{b}

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของใบกะเพราอบแห้ง

การทดลองนี้จะใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งทั้งหมด 3 ส่วนคือ เครื่องเป่าลม ขดลวดความร้อน และพลังงานที่ใช้กับแมกนีตรอนของไมโครเวฟ ซึ่งจะมีการนำลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ที่ 80% เพื่อลดการใช้พลังงานในการอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงการแจกแจงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเครื่องเป่าลม ขดลวดความร้อน ไมโครเวฟ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวม จะเห็นได้ชัดว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในทุกอุณหภูมิอบแห้งทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งจะลดลงเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งใบกะเพราด้วยลมร้อนกับไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าน้อยกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียวในทุกอุณหภูมิอบแห้ง กรณีอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C กำลังไมโครเวฟ 2x250 W จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุดคือ 515.76 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60°C เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 1,503.19 MJ/kg ซึ่งพบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 987.43 MJ/kg

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานจำเพาะและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งใบกะเพรา

Condition	Time (min)	Blower (MJ/kg)	Heater (MJ/kg)	MW (MJ/kg)	SEC (MJ/kg)
HA 60°C	120	76.60	1426.60	-	1503.19
HA-MW 60°C, 2x150 W	42	52.79	504.58	232.88	790.25
HA-MW 60°C, 2x200 W	30	48.52	390.62	316.72	755.85
HA-MW 60°C, 2x250 W	19	20.63	237.25	257.88	515.76
HA 70°C	51	60.67	889.89	-	950.56
HA-MW 70°C, 2x150 W	21	20.23	394.38	121.35	535.96
HA-MW 70°C, 2x200 W	17	20.23	313.48	161.80	495.51
HA-MW 70°C, 2x250 W	12	20.11	261.45	170.95	452.51
HA 80°C	21	20.40	530.00	-	550.40
HA-MW 80°C, 2x150 W	12	20.23	293.26	70.79	384.27
HA-MW 80°C, 2x200 W	10	20.06	260.72	90.25	371.03
HA-MW 80°C, 2x250 W	8	20.00	234.56	101.98	356.55

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

สำหรับกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x250 W พบว่า มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุด 452.51 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70°C อย่างเดียวมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเท่ากับ 950.56 MJ/kg ซึ่งพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 498.05 MJ/kg

กรณีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x250 W พบว่า มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมน้อยที่สุดคือ 356.55 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C เพียงอย่างเดียว ซึ่งจะมีค่าพลังงานจำเพาะเท่ากับ 550.40 MJ/kg ซึ่งพบว่าการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ 193.85 MJ/kg เป็นที่น่าสังเกตว่า กรณีอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง 2x250 W มีการใช้พลังงานจำเพาะที่น้อยที่สุดเท่ากับ 356.55 MJ/kg โดยใช้พลังงานของเครื่องเป่าลม 5.61% พลังงานของขดลวดความร้อน 65.79% และพลังงานของไมโครเวฟ 28.60% ทำให้สามารถลดพลังงานของขดลวดความร้อนได้ถึง 55.74% เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว

ดังนั้นการอบแห้งด้วยเทคนิคลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟจะช่วยลดพลังงานในส่วนของขดลวดความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้พลังงานจากไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาในการอบแห้งที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

4. บทสรุป

เมื่อทำการอบแห้งใบกะเพราด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟในทุกกรณี จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ (60 70 และ 80°C) ร่วมกับไมโครเวฟที่กำลังต่าง ๆ (2x150, 2x200 และ 2x250 W) โดยตั้งความเร็วลม 0.3 m/s และมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80% ในขณะที่ใช้ความเร็วสายพาน (ไป-กลับ) 0.02 m/s สามารถลดความชื้นในใบกะเพราสด ลดระยะเวลาอบแห้ง และลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งได้มากขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งและกำลังไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองเป็นไปตามหลักการของการถ่ายเทความร้อนคือ เมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิภายในของใบกะเพราเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกของใบกะเพรามากยิ่งขึ้น เป็นผลโดยตรงต่อการเพิ่ม Drying Force ของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล ดังนั้นจึงส่งเสริมให้การอบแห้งดีขึ้นตามไปด้วย

การทดสอบคุณภาพด้านสีด้วยการวัดค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และและสีเหลือง (b^*) ของใบกะเพราอบแห้งเปรียบเทียบกับใบกะเพราสด พบว่า สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น และสำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ค่าความสว่าง (L^*) และสีเหลือง (b^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้น

ดังนั้นกรณีที่เหมาะสมในการอบแห้งคือ การอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟกำลัง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

2x250 W เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด ลดลง 61.19% ค่าพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ลดลง 35.22% และมีคุณภาพสีที่ใกล้เคียงกับใบกะเพราสดมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณห้องวิจัยอบแห้ง สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่เอื้อเฟื้อห้องทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2020-GRAD-03

6. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Suriyakanthorn and R. Assavarachan, Microwave drying models of holy basil (*Ocimum sanctum* L.) leaves, Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, 2012, 18(1), 59–67. (in Thai)

[2] F. Gulcimen, H. Karakaya and A. Durmus, Drying of sweet basil with solar air collectors, Renewable Energy, 2016, 93, 77-86.

[3] T. Wang, R. Khir, Z. Pan and Q. Yuan, Simultaneous rough rice drying and rice bran stabilization using infrared radiation heating, LWT-Food Science and Technology, 2017, 78, 281-288.

[4] S. Srisuriyawong, S. Wanlapa, W. Phromjan, and N. Chankamma, Drying kinetics of paddy dried with the small-scale paddy dryer, Agricultural Science Journal, 2014, 45(2)(Suppl.), 345-348. (in Thai)

[5] A. Chen, G. Achkar, B. Liu and R. Bennacer, Experimental study on moisture kinetics and microstructure evolution in apples during high power microwave drying process, Journal of Food Engineering, 2020, 292, 1-7.

[6] J. Jareanjit, A solar dryer technology and its development, KKU Research Journal, 2012, 17(1), 110-124. (in Thai)

[7] W. Sriariyakul, T. Swasdisevi, S. Devahastin and S. Soponronnarit, Drying of aloe vera puree using hot air in combination with far-infrared radiation and high-voltage electric field: Drying kinetics, energy consumption and product quality evaluation, Food and Bioproducts Processing, 2016, 100, 391-400.

[8] A. Elmizadeh, M. Shahedi and N. Hamdami Comparison of electrohydrodynamic and hot-air drying of the quince slices, Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 43, 130-135.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.03.003

[9] P. Toomthong, S. Suayklang and P. Toomthong, Study of wolffia drying using hot air, Rajamangala Surin Conference (RSC 2016), Proceeding, 2016, 365-370. (in Thai)

[10] S. Pangkanya, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, Durian Chips Drying Using Combined Microwave-Hot Air with Step-Down Microwave Power Input Technique, KKU Research Journal (Graduate Studies), 2016, 16(3), 102-111. (in Thai)

[11] K. Sittichaitaweekul, T. Swasdisevi, and S. Soponronnarit, Kaffir lime leave drying using combined microwave and hot air, 15th Conference on Energy Network of Thailand, (E-NETT-Thailand 2019), Proceeding, 2019, 889-903. (in Thai)

[12] A. Chahbani, N. Fakhfakh, M.A. Balti, M. Mabrouk, H.E. Hatmi, N. Zouari and N. Kechaou, Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.), Food Bioscience, 2018, 25, 32-38.

[13] T. Tipyavimol and S. Chirnaksorn, Hot air-microwave combination drying of chili, Thai Agricultural Research Journal, 2007, (25)1, 46-57. (in Thai)

[14] Y. Pu and D. Sun, Drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution, Biosystem Engineering, 2017, 156, 108-119.

[15] Y. Jia, I. Khalifa, L. Hu, W. Zhu, J. Li, K. Li and C. Lia, Influence of three different drying techniques on persimmon chips' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques, Food and Bioproducts Processing, 2019, 118, 67-76.

[16] K. Apinyavisit, A. Nathakaranakule and S. Soponronnarit, Design of prototype of combined microwave-hot air conveyor belt dryer, KKU Science Journal, 2017, 45(3), 628-638. (in Thai)