Kasem Bundit Engineering Journal Vol.13 No.1 January-April 2023

การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ

DRYING OF BARRACUDA MANGO USING HOT AIR AND COMBINED HOT AIR-MICROWAVE

สัญชิต มานะเศวตกุล[1] จิรวัฒน์ สิตรานนท์[2] และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์[3]
[1]นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต. บางพระ อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี 2110, manasavetkul.k@gmail.com
[2,3]อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก, 43 ม.6 ต. บางพระ อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี 2110, [2]jirawat_si@rmutto.ac.th, [3]kittisak_wi@rmutto.ac.th

Sanchit Manasavetkul[1], Jirawat Sitranon[2] and Kittisak Witinantakit[3]
[1]Student, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand, manasavetkul.k@gmail.com
[2,3] Lecturer, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 2110, Thailand,
[2]jirawat_si@rmutto.ac.th, [3]k_yong28@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกด้วยลมร้อนที่ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที โดยใช้ลมร้อนอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ร่วมกับไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวมก่อนและหลังอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ปริมาณน้ำอิสระ และการหดตัวของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุก จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งทำให้อบแห้งมะม่วงได้เร็วขึ้น ใช้เวลาอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง โดยการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด 320 นาที และความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวม

ก่อนและหลังอบแห้งน้อยที่สุด (ΔE=6.08) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 478.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย การหดตัวน้อยที่สุดร้อยละ 79.77 ปริมาณน้ำอิสระมีค่า 0.516 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มารตราฐานอาหารแห้ง การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสาน คือการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตามด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 700 วัตต์ เปรียบเทียบการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลงร้อยละ 3.12 และความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวมก่อนและหลังอบแห้งลดลงร้อยละ 40.30 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 36.7 การหดตัวลดลงร้อยละ 11.12 และปริมาณน้ำอิสระมีค่า 0.505 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มารตราฐานอาหารแห้ง

คำสำคัญ: ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง, ไมโครเวฟ, ลมร้อน

ABSTRACT

The objective of this research was to study on drying kinetic, total color difference of mango before and after drying, before and after drying, specific energy consumption, water activity and shrinkage. The Nam Dok Mai mangoes were dried with hot air at 2 m/s, temperature of 50, 60, 70 °C and hot air at 70 °C in combination with a microwave with a power of 700 watts. The study found that increasing drying temperature results in faster drying of mangoes. As a result, the drying time and the specific energy consumption are reduced. Drying mangoes with hot air at 70 °C took the shortest drying time of 320 minutes, total color difference of mango before and after drying was minimal (ΔE=6.08), specific energy consumption was lowest at 478.73 $MJ/kg_{evaporated}$ water, The smallest shrinkage at 79.77% and water activity was 0.516, which was within the dry food standard. Comparison between drying of mangoes with hot air at 70 °C and drying by combined drying technique with hot air at 70 °C and microwave at 700 watts. It was found that drying by combined technique had shorter the drying time by 3.12%, the color difference before and after drying was reduced by 40.30%, specific energy consumption was reduced by 36.7%, shrinkage decreased by 11.12% and water activity was 0.505, which was within the dry food standard.

KEYWORDS: specific energy consumption, barracuda mango, microwave, hot air

1. บทนำ

มะม่วง เป็นไม้ยืนต้นในสกุล ชื่อสามัญ Mango Mangifera ซึ่งเป็นไม้ผลเมืองร้อน ชื่อทางวิทยาศาสตร์ : *Mangifera indica Linn* เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอินเดีย มะม่วงมีหลากหลายสาย

พันธุ์ เช่น เขียวเสวย ฟ้าลั่น แก้ว โชคอนันต์ อกร่อง แรดและน้ำดอกไม้ เป็นต้น มะม่วงนิยมปลูกกันมากในประเทศไทย มีพื้นที่ปลูกประมาณ 2 ล้านไร่ มีผลผลิตประมาณ 2.1 ล้านตัน เป็นอันดับ 4 ของโลก รองจาก ประเทศอินเดีย เม็กซิโก และปากีสถาน เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศเหมาะสมกับการเพาะปลูก ประกอบกับเป็นพืชปลูกง่าย เจริญเติบโตได้ดี มีคุณค่าทางโภชนาการทั้งวิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ มะม่วงจึงเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาและส่งเสริมการผลิตตามนโยบายของรัฐบาล [1] มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง (barracuda mango) เป็นพันธุ์ที่ทำให้ออกดอกติดผลนอกฤดูได้ ทรงพุ่มเล็กใบค่อนข้างใหญ่ ขอบใบเป็นคลื่น การเรียงตัวของใบเป็นระเบียบ ทนต่อแมลงและโรคได้ดีปานกลาง มีผลขนาดปานกลางใช้เวลาตั้งแต่ออกดอกจนกระทั่งผลแก่ประมาณ 110-115 วัน ผลจะมีสีเหลืองสวยถ้าได้รับการห่อ ผลสุกมีสีเหลืองนวล เนื้อสีเหลืองละเอียด รสหวาน กลิ่นหอมซึ่งเป็นเอกลักษณ์ น้ำหนักต่อผลประมาณ 300 กรัม [2] เป็นมะม่วงรับประทานสุก แต่เมื่อสุกจะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว และในช่วงฤดูกาลออกผลมักพบปัญหามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองมีมากจนล้นตลาดส่งผลให้ราคามะม่วงน้ำดอกไม้สีทองตกต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่า การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารวิธีหนึ่งที่ลดความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารจนถึงจุดที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ ซึ่งเป็นที่มาของการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร

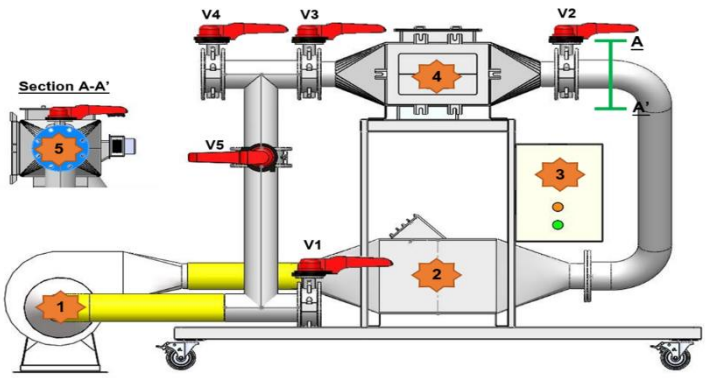
การอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่นวิธีการตากแห้งมะม่วงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีที่ง่ายใช้อุปกรณ์ไม่ซับซ้อน แต่วิธีนี้จะใช้เวลาในการอบแห้งที่นานกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบแบบลมร้อนถึงร้อยละ 85 [3] การอบแห้งด้วยลมร้อน ส่วนใหญ่จะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางพาความร้อนถ่ายเทไปยังผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำหรือความชื้นระเหยออกจากผิววัตถุ การระเหยออกของน้ำที่ผิวจะรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัตถุไปยังผิวทำให้ในการอบแห้งด้วยลมร้อนในช่วงแรกมีอัตราการอบแห้งที่เร็ว จากนั้นอัตราการอบแห้งก็จะลดลง จนถึงจุดหนึ่งจะไม่เปลี่ยนแปลง [4] การอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก ราคาเครื่องจักรไม่แพง [5, 6] มะม่วงที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการ เช่น วิตามินซีและเบต้าแคโรทีนเป็นต้น [7] การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคไมโครเวฟ ความถี่คลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในมะม่วงเกิดการสั่นสะเทือนจนเกิดเป็นพลังงานจลน์และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็ว [8] แต่การทำแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งพลังงานเพียงอย่างเดียว ทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เช่น ผลไม้และผัก ที่ต้องใช้เวลาในการทำแห้งเป็นเวลานาน จะมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการลงทุนและการใช้งานของเครื่องมือค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบลมร้อน อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นไมโครเวฟในการทำแห้งวัสดุที่มีความชื้นต่ำจะมีประสิทธิภาพดีกว่า จึงมีการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟผสมผสานกับการทำแห้งแบบลมร้อน [9] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความแตกต่าง

ของสีมะม่วงโดยรวมก่อนและหลังอบแห้ง ปริมาณน้ำอิสระ และการหดตัวในการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุก

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ

เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการดังรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยระบบให้ความร้อนกับอากาศโดยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 0 ถึง 6000 วัตต์ และระบบให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ 0 ถึง 1000 วัตต์ ยี่ห้อ LG รุ่น MS2448BKW พร้อมปรับตั้งผ่านชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟแบบทำงานต่อเนื่อง ยี่ห้อ Newsail รุ่น LCEL01D พร้อมชุดมอเตอร์หมุนถาดอบแห้ง ระบบการวัดและควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (Proportional integral derivative control) ยี่ห้อ Delta รุ่น DTA4849 ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งให้คงที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดโดยไม่มีการแกว่งของอุณหภูมิ มีความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแบบ thermocouple type k มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันต่ออุณหภูมิ 41 μv/ °C ย่านการวัดอุณหภูมิ -200 ถึง 1350 °C ต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL220 มีความละเอียด ± 0.05% ของค่าที่อ่านได้ ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งด้วยโหลดเซลล์พิกัด 2 กิโลกรัม ยี่ห้อ Tedea Huntleigh รุ่น 1022 แรงดันเอาท์พุท 2mV/V อุปกรณ์แสดงค่าน้ำหนัก ยี่ห้อ Eyecon รุ่น EICMC-1AB ความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 กรัม ความแม่นยำ ±0.01% ค่าพลังงานไฟฟ้าจะใช้เครื่องวัดและบันทึกแบบดิจิตอล ยี่ห้อ Schneider รุ่น PM2200



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย (1) พัดลม (2) ฮีตเตอร์ (3) ตู้ควบคุม (4) ห้องอบแห้ง (5) แม็กนีตรอน

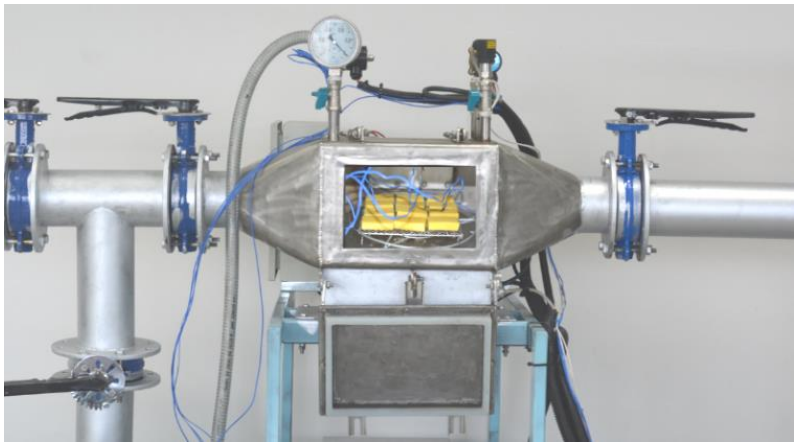
2.2 วิธีการทดลอง

เตรียมมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองระยะสุก วันที่ 4-7 หลังการเก็บเกี่ยว [10] ซึ่งมะม่วงจะสุกจัดและจะเริ่มเน่าเสียในวันที่ 8 ดังรูปที่ 2 โดยเลือกผลที่มีสีและขนาดสม่ำเสมอน้ำหนักประมาณ 300 กรัม และวัดค่าความหวานของมะม่วงก่อนอบแห้งเท่ากับ 18±2 องศาบริกซ์ โดยใช้เครื่อง Refractometer ยี่ห้อ OEM รุ่น RHB-90ATC ย่านการวัดความหวาน: 0-90 องศาบริกซ์ ความแม่นยำ 0.5 องศาบริกซ์

ผลมะม่วงในวันที่ 7 ของการเก็บรักษา ผลมะม่วงในวันที่ 8 ของการเก็บรักษา

รูปที่ 2 ระยะสุกมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง [10]

นำมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกมาทำความสะอาด ปอกเปลือก แล้วหั่นขนาด (กว้างxยาวxหนา) 2x4x1 เซ็นติเมตร จำนวน 12 ชิ้น น้ำหนักโดยรวมประมาณ 108±2 กรัม นำมาวางบนตะแกรง และนำมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกที่เตรียมไว้บางส่วนมาหาความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง ส่วนชิ้นมะม่วงที่จัดวางบนตะแกรงนำเข้าเครื่องอบแห้ง ดังรูปที่ 3 โดยมีการอบแห้ง 2 วิธี ดังนี้



รูปที่ 3 ชิ้นมะม่วงที่จัดวางบนตะแกรงเข้าเครื่องอบแห้ง

1) การอบแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying, HA) จะทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยตั้งอุณหภูมิลมร้อนตรงบริเวณทางเข้าห้องอบแห้งตามเงื่อนไขการทดลอง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที [11] วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งเดียวกับการวางชิ้นมะม่วงในห้องอบแห้งโดยเปิดวาล์ว V1-V4 และปิดวาล์ว V5 เพื่อปล่อยลมร้อนที่ผ่านห้องอบแห้งทิ้งทั้งหมด ชั่งน้ำหนักของมะม่วงจำนวน 12 ชิ้น โดยใช้โหลดเซลล์ และวัดอุณหภูมิห้องอบแห้งและมะม่วง โดยใช้เซ็นเซอร์แบบ thermocouple type k เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิและวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง

2) การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ (Hot air and microwave drying, HA&MW) แบบผสมผสานสองขั้นตอนจะทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ขั้นตอนแรกอบแห้งด้วยลมร้อนโดยตั้งค่าลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที [11] โดยเปิดวาล์ว V1-V4 และปิดวาล์ว V5 อบแห้งมะม่วงจนความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 70 มาตรฐานแห้ง เนื่องจากช่วงแรกมะม่วงมีความชื้นสูง ลมร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับเนื้อมะม่วงทำให้ความชื้นระเหยออกอย่างต่อเนื่องจนความชื้นของมะม่วงจะลดลง ความชื้นในมะม่วงเคลื่อนที่ออกมาได้ช้าลงเพราะผิวหน้าของมะม่วงอุณหภูมิสูงขึ้นจึงปิดพัดลมและระบบให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าแล้วเปลี่ยนเป็นอบแห้งมะม่วงด้วยไมโครเวฟ 700 วัตต์ แบบจังหวะ เปิด 20 วินาที และปิด 10 วินาที [6] เป็นขั้นตอนที่สอง และบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งเหมือนกับวิธีในข้อที่ 1

2.3 การหาความชื้นและอัตราการอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

สามารถทำได้โดยนำชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองที่ต้องการหาความชื้นมาชั่งน้ำหนัก แล้วเอาไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [12] หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้นดังสมการที่ (1)

$$M_d = \frac{w-d}{d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.) d คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง (kg) และ w คือ น้ำหนักของวัสดุสด (kg)

ในการทดลองได้ดำเนินการบันทึกการเปลี่ยนมวลหรือปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากมะม่วง ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะสามารถวิเคราะห์หาอัตราการอบแห้งได้ดังสมการที่ (2)

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (กรัมน้ำระเหยต่อนาที) Δw คือ มวลน้ำที่ระเหย (กรัม) และ Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลง (นาที)

2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) คือ การนำน้ำหนักมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองก่อนการอบแห้งและหลังการอบแห้ง และปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งมาคำนวณดังสมการที่ (3) [13]

$$SEC = \frac{3.6E_p}{(m_i - m_f)} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย) Ep คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง) m_i คือ มวลของมะม่วงก่อนอบแห้ง (กิโลกรัม) และ m_f คือ มวลของมะม่วงหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

2.5 การทดสอบคุณภาพด้านสีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

ทดสอบสีมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยเครื่อง 3HN รุ่น Portable colorimeter NH310 ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.04 ($\Delta E*ab$) ระบบสีที่วัดได้ คือ CIE L*a*b* โดยจะวัดค่าสี L*a*b* ที่ชิ้นมะม่วงตำแหน่ง หัว กลาง ท้ายของชิ้นมะม่วง ซึ่งแต่ละการทดลองใช้ 9 ตัวอย่าง จากนั้นนำค่าสีที่วัดได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ คำนวณหาความแตกต่างของสีโดยรวมก่อนและหลังอบแห้ง โดยใช้สมการที่ (4) [14]

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม ΔL^* คือ ค่าความแตกต่างของความสว่าง Δa^* คือ ค่าความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียว และ Δb^* คือ ค่าความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน

2.6 การหดตัว

หาปริมาตรของชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองโดยใช้หลักการแทนที่ปริมาตรของชิ้นมะม่วงในโทลูอีน (Toluene, $C_6H_5CH_3$) แล้วนำไปหาค่าการหดตัวจากสมการที่ (5) [15]

$$S = \left(1 - \frac{V_f}{V_o}\right) x100 \quad (5)$$

เมื่อ S คือ การหดตัวหลังการอบแห้ง (ร้อยละ) V_f คือ ปริมาตรของมะม่วงสุกหลังการอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร) และ V_o คือ ปริมาตรของมะม่วงสุกก่อนการอบแห้ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.7 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ

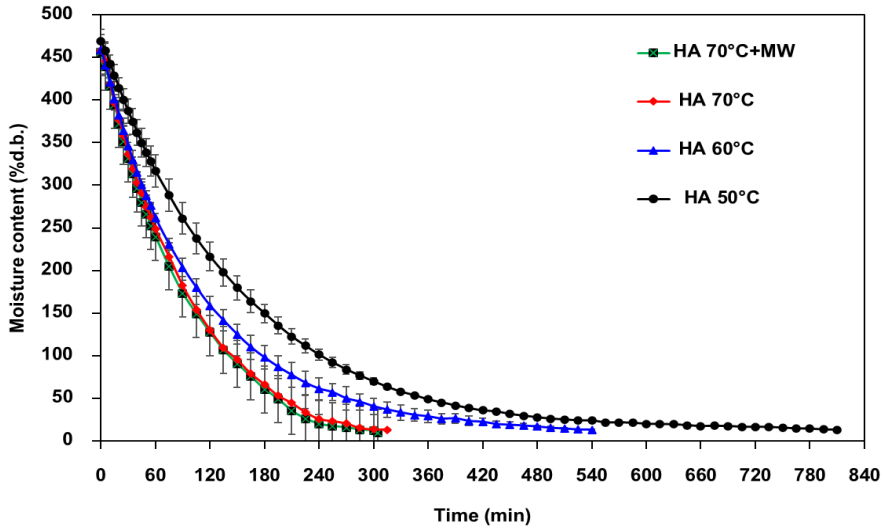
การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระโดยนำเอาชิ้นมะม่วงน้ำดอกไม้เข้าทดสอบด้วยเครื่องมือวัดปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ Aqualab รุ่น Pre ช่วงการอ่านค่า 0.03 ถึง 1.00 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความแม่นยำในการวัด ±0.003 โดยควรมีค่าต่ำกว่า 0.6 ที่อยู่ในเกณฑ์อาหารแห้ง ซึ่งจุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [16]

3. ผลการวิจัย

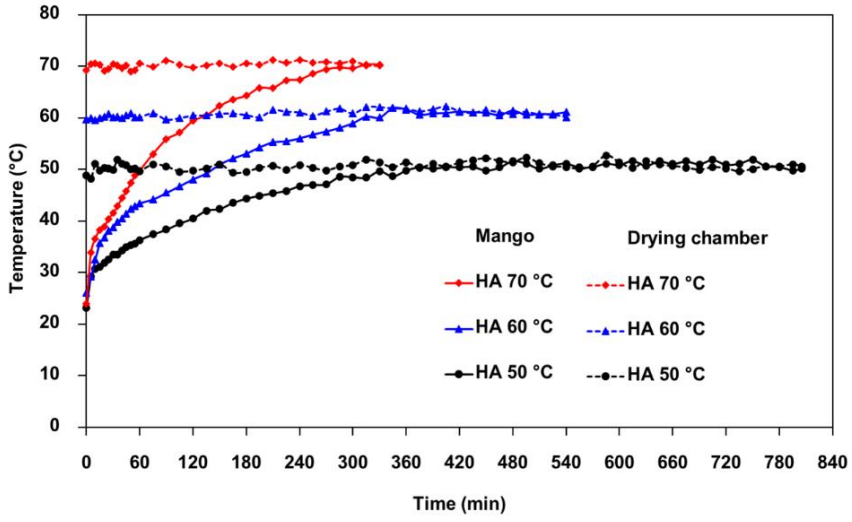
3.1 การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองด้วยลมร้อน

จากการอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจากความชื้นเริ่มต้นที่ร้อยละ 470.11 มาตรฐานแห้ง อบแห้งด้วยลมร้อนจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 13 มาตรฐานแห้ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะเป็นในทิศทางเดียวกันทั้ง 3 อุณหภูมิ ดังรูปที่ 4 คือ ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรก เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งมะม่วงมีความชื้นสูง เมื่อลมร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับเนื้อมะม่วง และมะม่วงมีช่องว่างของเซลล์มากทำให้น้ำที่อยู่ด้านในระเหยออกมาด้านนอกได้ดี ช่วงท้ายของการอบแห้งความชื้นของมะม่วงจะลดลงและมีการหดตัวของมะม่วงทำให้ช่องว่างของเซลล์ลดลงส่งผลให้น้ำระเหยออกได้ช้า [17] สำหรับปัจจัยของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง [3] คือเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 2 เมตรต่อวินาที โดยที่อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส จะใช้ระยะเวลา 320 นาที ซึ่งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลาการอบแห้ง 810 นาที และ 540 นาที ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิลมร้อนที่สูงขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เนื้อมะม่วงมากขึ้นและส่งผลให้ช่วยเร่งอัตราการถ่ายเทมวลจากภายในเนื้อมะม่วงสู่อากาศได้ดีขึ้น [18] โดยในช่วงแรกที่มะม่วงมีความชื้นสูงความร้อนที่มะม่วงได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำเป็นส่วนใหญ่ เมื่อความชื้นมะม่วงเริ่มลดลง ความร้อนที่มะม่วงได้รับจึงใช้ใน

การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยเนื้อมะม่วงจะค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้น จนถึงเวลาประมาณ 300 นาที อุณหภูมิเนื้อมะม่วงจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิอบแห้งจนสิ้นสุดการอบแห้ง ดังรูปที่ 5

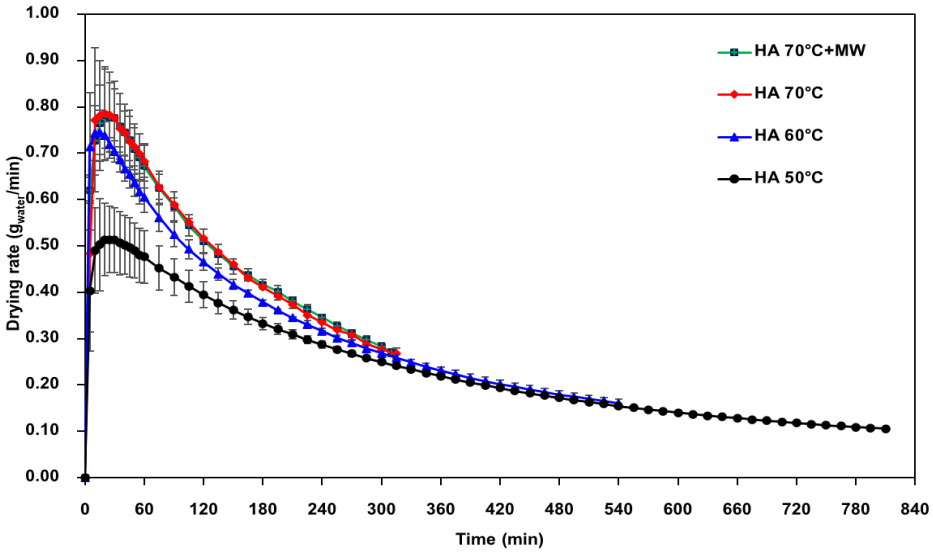


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของมะม่วงระหว่างการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสาน



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมะม่วงระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาถึงการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานโดยการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อน จนมีความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 70 มาตรฐานแห้ง จากนั้นเปลี่ยนเป็นอบแห้งด้วยไมโครเวฟที่กำลังไฟ 700 วัตต์ โดยไมโครเวฟทำงานแบบเปิด 20 วินาที และปิด 10 วินาที ใช้เวลาในการอบแห้งทั้งสองขั้นตอนรวม 310 นาที พบว่าการอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคผสมผสานใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนลมร้อน 70 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว 10 นาที ดังรูปที่ 4 เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟช่วยลดปัญหาการเกิดลักษณะเปลือกแข็งที่ผิวหน้าของมะม่วงจึงทำให้ความชื้นระเหยออกมาได้เร็วกว่าการอบแห้งโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวและพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟเข้าสู่ภายในมะม่วงโดยตรงจึงทำให้เกิดความร้อนจากภายในเนื้อมะม่วงส่งผลให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น [9] ดังรูปที่ 6

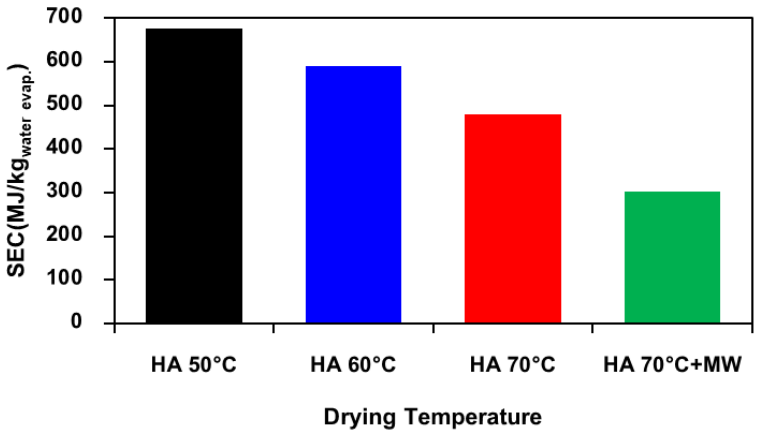


รูปที่ 6 อัตราการอบแห้งของมะม่วงระหว่างการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสาน

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากการทดลองอบแห้งชิ้นมะม่วง แล้วนำน้ำหนักก่อนและหลังอบแห้ง ปริมาณพลังงานที่ใช้ตลอดกระบวนการอบแห้งมาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า ในการอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50 เป็น 60 องศาเซลเซียส และจาก 60 เป็น 70 องศาเซลเซียส จะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 12.63 และ 18.98 ตามลำดับ โดยอุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด 478.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส มีการใช้พลังงานจำเพาะสูงสุด 676.34 เมกะจูล

ต่อกิโลกรัม เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่สูงทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนในชิ้นมะม่วงสูงส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากมะม่วงได้เร็วทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยลง [19] เมื่อนำการอบแห้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟเข้ามาผสมผสานแบบสองขั้นตอน พบว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน โดยอบแห้งมะม่วงอุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ต่อด้วยไมโครเวฟกำลัง 700 วัตต์ จะใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว จึงส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 36.7 เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 7 เนื่องจากการอบแห้งมะม่วงด้วยลมด้วยจนเหลือความชื้นร้อยละ 70 มาตรฐานแห้ง ความชื้นภายในมะม่วงจะถ่ายเทออกมายังผิวนอกได้ช้าลง คลื่นไมโครเวฟสามารถผ่านจากผิวนอกของมะม่วงเข้าไปในเนื้อมะม่วงเพื่อกระตุ้นให้น้ำในเนื้อมะม่วงแพร่ออกมาที่ผิวและระเหยออกจากมะม่วงได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

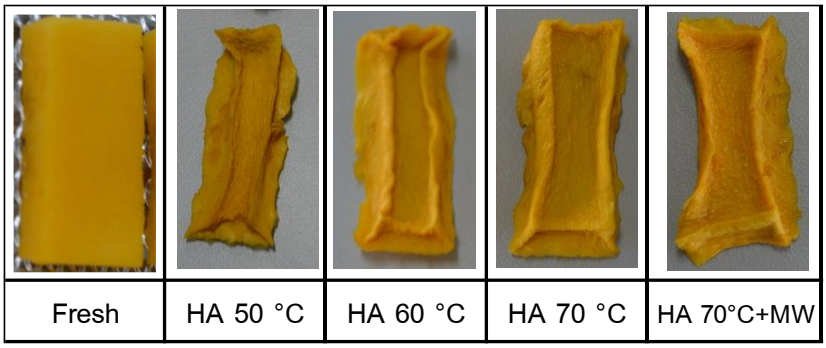


รูปที่ 7 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งมะม่วง

3.3 คุณภาพด้านสีของมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง

คุณภาพด้านสีของมะม่วงหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนทุกอุณหภูมิพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้ค่า L* a* b* และ ΔE มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 8 และตารางที่ 1 ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งทั้ง 3 อุณหภูมิส่งผลต่อค่าสีของมะม่วงหลังการอบแห้งโดยจะมีค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลสด [20] เมื่อพิจารณาถึงความต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่า L* a* และ b* ใกล้เคียงกัน และที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส มีค่า L* ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวม (ΔE) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน คือการอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ต่อด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ พบว่า มะม่วงหลังการ

อบแห้งมีค่าความแตกต่างของสีโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งมีค่าเหลือ 3.63 โดยมะม่วงมีค่า L* และ b* ก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งใกล้เคียงกัน แต่มีค่าสีแดงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล ระหว่างการอบแห้ง [21]



รูปที่ 8 ชิ้นมะม่วงก่อนและหลังการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 1 สีของมะม่วงและค่าความแตกต่างของสีโดยรวมหลังอบแห้ง

Temp (°C)	L*	a*	b*	ΔE
Fresh	32.38±0.23^{c}	3.91±0.16^{d}	17.67±0.20^{c}	N/A
HA 50 °C	34.14±0.50^{ab}	9.64±0.17^{a}	25.73±0.48^{a}	10.04±0.33^{a}
HA 60 °C	35.68±0.39^{a}	6.10±0.19^{c}	23.87±0.53^{ab}	7.35±0.55^{b}
HA 70 °C	35.16±0.35^{a}	5.53±0.25^{c}	22.84±0.52^{b}	6.08±0.52^{b}
HA 70 °C +MW	33.27±0.61^{bc}	7.14±0.20^{b}	16.26±0.70^{c}	3.63±0.29^{c}

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

3.4 การหดตัวและปริมาณน้ำอิสระ

การอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีอัตราการหดตัวสูงกว่าอุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 2 เนื่องจากอุณหภูมิต่ำทำให้การถ่ายเทความร้อนและการคายความชื้นภายในเนื้อมะม่วงต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง โดยที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ผิวของมะม่วงเกิดเป็นโซนแข็งที่ผิว เนื่องจากการจับตัวของน้ำตาลในเนื้อมะม่วงทำให้เกิดการหดตัวน้อยลง [18] เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส กับการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน โดยอบแห้งมะม่วงอุณหภูมิลม

ร้อน 70 องศาเซลเซียส ต่อด้วยไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ พบว่า การอบแห้งมะม่วงด้วยเทคนิคผสมผสาน มีการหดตัวของมะม่วงน้อยกว่าอบแห้งมะม่วงอุณหภูมิลมร้อน 70 องศาเซลเซียส ร้อยละ 11.12 เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วจึงเกิดแรงดันสูงภายในเนื้อมะม่วงระหว่างการอบแห้งทำให้เกิดรูพรุน เช่นเดียวกับการอบฟักทองด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อน [22] ปริมาณน้ำอิสระของมะม่วงหลังการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และการอบแห้งด้วยเทคนิคผสมผสานสองขั้นตอน มีค่า 0.540 0.515 0.516 และ 0.505 ตามลำดับ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตราฐาน ไม่เกิน 0.6 ซึ่งเป็นค่าที่เชื้อจุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเติบโตได้ [15]

ตารางที่ 2 ค่าความชื้น การหดตัว และปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์

Temp (°C)	Moisture content (%d.b.)	Shrinkage (%)	Water activity (a_w)
Fresh	470.11	N/A	0.988±0.0053[a]
HA 50 °C	12.96	84.81±0.150[a]	0.540±0.0052[b]
HA 60 °C	12.88	83.26±0.153[a]	0.515±0.0065[b]
HA 70 °C	13.05	79.77±0.652[b]	0.516±0.0112[b]
HA70 °C +MW	9.37	68.65±0.312[c]	0.505±0.0106[b]

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4. สรุป

การอบแห้งมะม่วงน้ำดอกไม้สีทองสุกด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและระยะเวลาการอบแห้ง ความแตกต่างของสีโดยรวมและการหดตัวของมะม่วงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความแตกต่างของสีโดยรวมและการหดตัวของมะม่วงหลังอบแห้ง สูงกว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการอบแห้งที่แตกต่างกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของปริมาณน้ำอิสระ ดังนั้น นการอบแห้งมะม่วงด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาอบแห้งสั้นที่สุด 320 นาที ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 478.73 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ความแตกต่างของสีมะม่วงโดยรวม 6.08 การหดตัวน้อยที่สุด ร้อยละ 79.77 เมื่อพิจารณาถึงการนำเอาไมโครเวฟกำลังไฟ 700 วัตต์ เข้ามาผสมผสานกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในการอบแห้งมะม่วงเป็นแบบสองขั้นตอน มีผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ความแตกต่างของสีโดยรวมและ

การหดตัวของมะม่วงลดลง เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

References

[1] Sukkhet S. Research and breeding of mango. Bangkok: Department of Agriculture; 2015. (In Thai)

[2] Peerasak C. Cultivation of nam dok mai mango. Bangkok: National Research Council of Thailand. (In Thai)

[3] Mugodo K, Workneh TS. The kinetics of thin-layer drying and modelling for mango slices and the influence of differing hot-air drying methods on quality. Heliyon 2021;7(6):e07182.

[4] Tanapat S. Comparative study of drying using hot air and far infrared [thesis]. Ubon Ratjathanee: Ubon Ratjathanee University; 2007. (In Thai)

[5] Wilawan C, Withu C, Touchpong C. Effect of swirling air flow drying on color of ripe mango. Proceedings of the 2nd Graduate School Conference. Bangkok; 2018. p. 752-60. (In Thai)

[6] Jia Y, Khalifa I, Hu L, Zhu W, Li J, Li K, et al. 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 Journal 2019;118:67-76.

[7] Singh S, Kawade S, Dhar A, Powar S. Analysis of mango drying methods and effect of blanching process based on energy consumption, drying time using multi-criteria decision-making. Cleaner Engineering and Technology Journal 2022;8:100500.

[8] Duanraem P, Chartree P, Pakpoom P, Nattakamon L. The optimization of combined microwave and hot air for drying system. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal 2019;1(3):21-33. (In Thai)

[9] Chaleeda B. Hybrid drying technology application for preservation of heat sensitive food products. KMUTT Research and Development Journal 2012;35(2):269-84. (In Thai)

[10] Sakaya S, Tawarat T, Krawee T. Postharvest Changes in Quality Characteristics of Nam Dokmai Mango. Proceedings of the 13th Thai Society of Agricultural Engineering Conference. Chiangmai; 2012. p. 518-25. (In Thai)

[11] Sriariyakul W. Drying of Nam Dok Mai mango using far-infrared radiation in combination with hot-air. Journal of Industrial Technology 2021;17(3):169-82.

[12] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official Methods of Analysis. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists. Maryland: Gaithersburg; 2000.

[13] Tirawanichakul S, Chanchiew S, Tirawanichakul Y. Pennywort drying using infrared radiation drying kinetics, energy consumption and quality aspect. KKU Research Journal 2013;18(2):311-24. (In Thai)

[14] Pei Y, Li Z, Song C, Li J, Xu W, Zhu G. Analysis and modelling of temperature and moisture gradient for ginger slices in hot air drying. Journal of Food Engineering 2022;323 (February):111009.

[15] Ojediran JO, Okonkwo CE, Olaniran AF, Iranloye YM, Adewumi AD, Erinle O, et al. Hot air convective drying of hog plum fruit (Spondias mombin): effects of physical and edible-oil-aided chemical pretreatments on drying and quality characteristics. Heliyon 2021;7(11):e08312.

[16] Piyanuch R, Maliwan K. Effects of sugar, citric acid and pectin content on quality of mulberry fruit leather product. RMUTP Research Journal 2020;14(1):58-69. (In Thai)

[17] Bounnak M, Yingyong P, Benya M. Effect of drying temperature on quality of cassumunar ginger (Plai) Rhizome (Zingiber montanum (Koenig) Link ex. Dieter). Thai Agricultural Research Journal 2011;29(1):59-72. (In Thai)

[18] Bi YX, Zielinska S, Ni JB, Li XX, Xue XF, Tian WL, et al. Effects of hot-air drying temperature on drying characteristics and color deterioration of rape bee pollen. Food Chemistry X 2022 Sep 28;16:100464.

[19] Im-erb N, Witinantakit K. The Study of drying kinetics and qualities of dried banana slices by vacuum-infrared drying. SWU Engineering Journal 2021;16(3):24-36. (In Thai)

[20] Duangsrisen W. Effect of raw material preparation method prior drying and temperature in hot-air drying process on the drying time and melon of quality. Journal of Science and Technology Mahasarakham University 2021;40(5):341-6. (In Thai)

[21] Choosri W, Wiriyawattana P, Promsakha na Sakon Nakhon P, Choosri T. Effect of hot-air drying process on properties of dried ripe bananas and pumpkins. Journal of Food technology, Siam University 2020;15(1):37-52. (In Thai)

[22] Therdthai N, Krajangmathekul S. Effect of microwave assisted hot air drying on quality of dried pumpkin. Proceedings of the 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry. Bangkok; 2011. p. 133-40. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ

สัญชิต มานะเศวตกุล ตำแหน่ง นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 092-9195352 Email: manasavetkul.k@gmail.com

จิรวัฒน์ สิตรานนท์ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 081-001-0903 Email: jirawat_si@rmutto.ac.th

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110
โทรศัพท์ 086-386-1885 Email: kittisak_wi@rmutto.ac.th

Article History:

Received: January 5, 2023

Revised: March 13, 2023

Accepted: April 8, 2023