



การผลิตดักแด้ไหมกรอบโดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

Production of Crispy Pupae Silkworm Using Drying of

Microwave Combined with Hot Air

สุวิทย์ แพงกันยา^{1*}, อติศักดิ์ นาทกรณกุล² และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์²

Suwit Paengkanya^{1*}, Adisak Nathakaranakule² and Somchart Soponronnarit²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

²Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials,

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received : 29 September 2020

Revised : 8 January 2021

Accepted : 11 January 2021

บทคัดย่อ

แมลงและหนอนทอดกรอบเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีความนิยมบริโภค แต่ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีปริมาณน้ำมันมากซึ่งส่งผลเสียต่อสุขภาพและเกิดกลิ่นเหม็นเมื่อเก็บไว้นาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตดักแด้ไหมกรอบผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยประเมินจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหมอบแห้งทางด้านสี เนื้อสัมผัส วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค โดยนำดักแด้ไหมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 150, 200, 250 และ 300 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลม 0.3 m/s และใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% อบแห้งจนกระทั่งตัวอย่างมีความชื้นประมาณ 4% ฐานแห้ง และเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C จากผลการทดลองพบว่า วิธีการอบแห้งดักแด้ไหมด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ส่งผลให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่า การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง ดักแด้ไหมอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าความสว่างของสีและความกรอบมากกว่า และรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า แต่มีค่าสีแดง (+a*) ค่าสีเหลือง (+b*) และความแข็งต่ำกว่าดักแด้ไหมอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟทำให้ดักแด้ไหมอบแห้งมีค่าความแข็งต่ำ ค่าความกรอบมากขึ้น แต่ค่าสีของดักแด้ไหมไม่แตกต่างกัน และดักแด้ไหมอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต่ำกว่า 0.6 เป็นไปตามมาตรฐานและมีความปลอดภัยต่อการเก็บรักษา โดยเงื่อนไขที่แนะนำสำหรับอบแห้งดักแด้ไหมคือวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลัง 300 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C

คำสำคัญ : การอบแห้งแบบใช้ไมโครเวฟร่วม ; ความกรอบ ; จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง ; ดักแด้ไหมอบแห้ง



Abstract

Crispy insect and worm are popular foods, but contain a lot of oil which is not good for health. Therefore, the objective of this research was to produce crispy pupae silkworm using microwave combined with hot air (MWA) and hot air (HA) drying method. The drying kinetics, specific energy consumption (SEC) of the drying processes and the qualities of the dried product in terms of color, texture, water activity, and microstructure were evaluated. The pupae silkworm was dried using MWA drying method at 150, 200, 250 and 300 W combined with HA at 65 °C, air velocity of 0.3 m/s and circulating air of 80% . The sample was dried until the moisture content was approximately 4% (d.b.) and compared with those dried by the HA drying at 65 °C. The results showed that all cases of pupae silkworm dried by MWA had higher drying rates than those under the HA, resulting in shorter drying time and lower SEC of drying process. Increasing the microwave power level increased the drying rate and reduced the SEC of the drying process. The dried pupae silkworm from MWA had more lightness and larger pore size but had lower in redness (+ a*), yellowness (+b*) and hardness than dried pupae from HA. The increase of the microwave power causes the dried pupae to have low hardness, more crispiness, but not effect on the color values. The dried pupae silkworm from all experimental cases had lower water activity than 0.6, conforming to standards and safe for storage. The recommended condition for drying pupae silkworms using MWA is a microwave power of 300 W combined with HA at 65 °C.

Keywords : combined microwave drying ; crispiness ; drying kinetic ; dried silkworm

บทนำ

ดักแด้ไหม (*Bombyx mori* Linnaeus) เป็นตัวอ่อนของแมลงผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้จากการเลี้ยงไหมของเกษตรกรที่ผลิตผ้าไหม โดยดักแด้ไหมเป็นตัวอ่อนที่อยู่ในรังไหม เมื่อรังไหมถึงช่วงเวลาในเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปเกษตรกรจะนำไปต้มในน้ำร้อนเพื่อทำให้สารที่เคลือบรังไหมหลุดออกแล้วจึงค่อยๆ ดึงเส้นไหมออกจากรังไหม เมื่อเส้นไหมหลุดออกหมดจะได้ดักแด้ไหมสุกพร้อมรับประทาน (Usab *et al.*, 2008) โดยประเทศไทยนิยมเลี้ยงไหมในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตผ้าไหมที่สำคัญ (Wiset *et al.*, 2018) ดักแด้ไหมเป็นแหล่งอาหารที่มีโปรตีนสูง โดยมีสัดส่วนมากถึง 55% ที่เหลือเป็นไขมัน 25% และพลังงานงาน 1% ตามลำดับ (Longvah *et al.*, 2011) ซึ่งดักแด้ไหมที่ผ่านการต้มในน้ำร้อนมีความชื้นสูงและเป็นสาเหตุของการเน่าเสียได้ง่าย ดังนั้นเกษตรกรจึงนำดักแด้ไหมไปใช้ในการประกอบอาหารและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ดักแด้ไหมคั่ว ดักแด้ไหมทอด และดักแด้ไหมแช่แข็ง เป็นต้น เพื่อเพิ่มมูลค่าและยืดอายุในการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น โดยจากการรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่า ประเทศไทยมีการส่งออกสินค้าเกษตรเพื่ออุตสาหกรรมจากผลิตภัณฑ์ไหมในปี พ.ศ. 2562 ประมาณ 232,370 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 55,492,957 บาท (Office of Agricultural Economics, 2020)

โดยเฉพาะดักแด้ไหมทอดกรอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมในกลุ่มผู้บริโภคทุกเพศทุกวัย เนื่องจากมีโปรตีนสูงและรสชาติอร่อย แต่อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดในน้ำมันเดือดมักมีน้ำมันตกค้างปริมาณมาก ซึ่งการบริโภคอาหารที่มีปริมาณน้ำมันมากอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพได้หากบริโภคมากเกินไป อาทิเช่น มีความเสี่ยงเป็นโรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจ และโรคเบาหวาน เป็นต้น นอกจากนี้อาหารที่ทอดด้วยน้ำมันเมื่อเก็บไว้นานจะเกิดกลิ่นหืน

ดังนั้นการนำดักแด้ไหมมาแปรรูปด้วยวิธีอื่นที่ไม่ใช้น้ำมันเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการถนอมอาหารที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากเทคโนโลยีการอบแห้งซึ่งง่าย ไม่ซับซ้อน และสามารถจัดหาได้ทั่วไป แต่วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาอบแห้งนาน ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก (Varith *et al.*, 2007) ส่งผลให้ประสิทธิภาพพลังงานต่ำ และที่สำคัญผลิตภัณฑ์อบแห้งมีความกรอบต่ำ (Pu & Sun, 2017) การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นวิธีทางเลือกที่น่าสนใจซึ่งมีข้อดีคืออัตราการอบแห้งสูง ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งให้ดีขึ้น ผลิตภัณฑ์อบแห้งมีความแข็งและการหดตัวต่ำ แต่มีความกรอบสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนทั่วไป (Paengkanya *et al.*, 2015; Guo *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018) เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุได้โดยตรง น้ำภายในวัสดุจะดูดซับคลื่นไมโครเวฟแล้วเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิภายในวัสดุจะเหวี่ยงออกไปสู่บริเวณผิวของวัสดุอย่างรวดเร็ว โดยปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสำหรับอบแห้งวัสดุ เช่น ลำไย (Apinyavisit *et al.*, 2017) ทูเรียน (Paengkanya *et al.*, 2018) แครอท (Xu *et al.*, 2018) และดักแด้ไหม (Wiset *et al.*, 2018) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม Wiset *et al.* (2018) พบว่า ดักแด้ไหมไม่สามารถอบแห้งให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการได้ เนื่องจากวัสดุเกิดการไหม้เสียหายนก่อนที่ความชื้นจะลดลงถึงจุดที่ต้องการ

จากข้อดีของการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟในการอบแห้งดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำไมโครเวฟมาใช้ในการอบแห้งดักแด้ไหมร่วมกับลมร้อนและเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวในด้านจุลพลศาสตร์ของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดักแด้ไหมอบแห้งทางด้านสี ความแข็ง ความกรอบ วอเตอร์แอกทิวิตี และโครงสร้างระดับจุลภาค

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบ

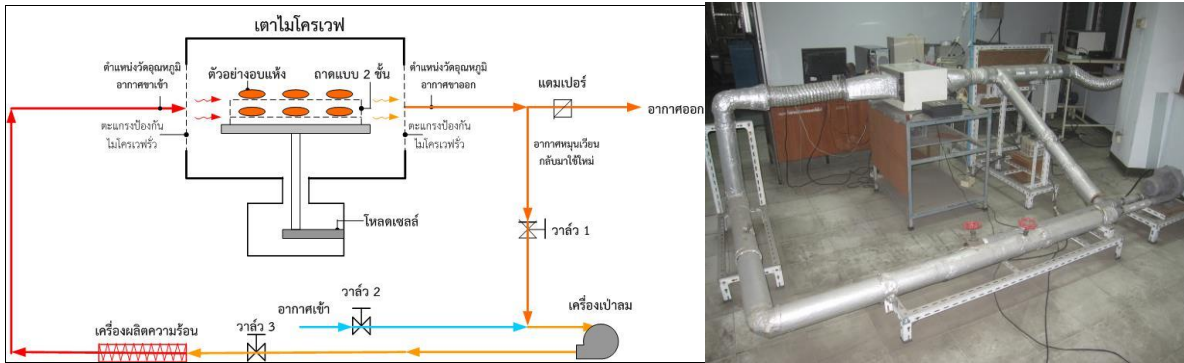
งานวิจัยนี้ใช้ผักคั่วใหม่เป็นวัตถุดิบในการทดลองโดยนำมาจากซูเปอร์มาร์เก็ตซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 270-330% ฐานแห้ง ก่อนทดลอง อบแห้งจะนำผักคั่วใหม่ออกจากห้องแช่เย็น และปล่อยให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม จากนั้นจึงนำตัวอย่างอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและอบแห้งด้วยลมร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ จนตัวอย่างมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 4% ฐานแห้ง โดยการหาความชื้นของตัวอย่างจะดำเนินการตามวิธีของ AOAC (1995) การทดลองอบแห้งผักคั่วใหม่แต่ละครั้งใช้น้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 160 กรัม

2. อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยคือเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้งซึ่งได้จากการดัดแปลงเตาอบไมโครเวฟ (LG, Model MS2427BM, Thailand) ขนาด 24 ลิตร ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2,450 MHz และกำลังไมโครเวฟสูงสุด 800 W 2) เครื่องผลิตความร้อน ขนาด 1 kW สำหรับผลิตความร้อนให้กับระบบอบแห้ง และ 3) เครื่องเป่าลม (LDL, Model RT 2005, Taiwan) ขนาด 0.4 kW ใช้ในการเป่าอากาศผ่านเครื่องผลิตความร้อนผ่านไปยังห้องอบแห้งเพื่ออบแห้งผักคั่วใหม่ โดยมีการติดตั้งตะแกรงเหล็กทรงบริเวณทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งเพื่อการป้องกันคลื่นไมโครเวฟรั่วออกนอกห้องอบแห้ง โดยเครื่องอบแห้งนี้ยังสามารถใช้ในกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวได้ด้วย

3. วิธีการทดลอง

การทดลองอบแห้งผักคั่วใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนเริ่มต้นด้วยการเปิดเครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 65 °C จากนั้นนำผักคั่วใหม่ที่เตรียมไว้วางบนถาดไฟเบอร์แบบสองชั้นและดำเนินการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขกำลังไมโครเวฟ 150, 200, 250 และ 300 W ร่วมกับลมร้อนอุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลม 0.3 m/s และใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ 80% เปรียบเทียบกับกรณีอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เพียงอย่างเดียว ซึ่งใช้ความเร็วลมและอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เดียวกันกับวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน การกำหนดกำลังไมโครเวฟใช้วิธีควบคุมการ เปิด-ปิด การทำงานของแมกนีตรอน อุณหภูมิของผักคั่วใหม่ในขณะอบแห้งวัดโดยใช้ Optic sensor เชื่อมต่อกับ Fiber optic thermometer (Omega, Model FOB104, Omega Engineering, Canada) มีค่าความถูกต้อง ± 0.8 °C ในขณะที่อุณหภูมิของลมร้อนขาเข้าและขาออกของห้องอบแห้งในขณะอบแห้งวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (Supcon, Model R3000, China) มีค่าความถูกต้อง ± 1 °C และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในขณะอบแห้งวัดโดยใช้ Load cell เชื่อมต่อกับ Weighing indicator (AD-4329, Korea) มีค่าความถูกต้อง ± 1 กรัม สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งวัดโดยใช้ Watt-hour meter (Mitsubishi, MF-33F, Thailand)



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน

4. จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้ง

จลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งนำเสนอในรูปของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผักแต่ใหม่ในขณะอบแห้ง (Moisture ratio; MR) โดยอัตราส่วนความชื้นของผักแต่ใหม่อบแห้งคำนวณจากสมการ (1)

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ

- M_t คือ ความชื้นของผักแต่ใหม่ในขณะอบแห้งที่เวลาใดๆ, %ฐานแห้ง
- M_o คือ ความชื้นเริ่มต้นของผักแต่ใหม่, %ฐานแห้ง
- M_e คือ ความชื้นสมดุลของผักแต่ใหม่, %ฐานแห้ง สำหรับงานวิจัยนี้สมมติให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากมีค่าต่ำมากเมื่ออบแห้งตามเงื่อนไขที่กำหนดในการทดลอง

5. การวัดสีของผักแต่ใหม่อบแห้ง

สีของผักแต่ใหม่อบแห้งวัดโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (HunterLab, ColorFlex, UK) ด้วยระบบสีแบบ CIE แสดงค่าเป็นแบบ L^* (0 คือสีดำ, 100 คือสีขาว) a^* (+ แดง, - เขียว) และค่า b^* (+ เหลือง, - น้ำเงิน) โดยก่อนทดสอบวัดสีผักแต่ใหม่อบแห้งจะต้องปรับเทียบกับแผ่นสีขาวมาตรฐาน จากนั้นจึงนำตัวอย่างใส่ลงในกระบอกแก้วและใช้กระบอกสีดำครอบอีกครั้งเพื่อไม่ให้แสงภายนอกเข้าไปรบกวนในขณะวัดสี

6. การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของผักแต่ใหม่อบแห้ง

โครงสร้างระดับจุลภาคของผักแต่ใหม่อบแห้งทดสอบโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (JEOL, Model JSM-5410 LV, Tokyo, Japan) ที่ความต่างศักย์ของอิเล็กตรอน 15 kV และใช้กำลังขยายของภาพ 30 เท่า ก่อนทดสอบนำตัวอย่างผักแต่ใหม่อบแห้งแช่ในแอลกอฮอล์เพื่อแยกน้ำมันที่อยู่ในตัวอย่างออกจากนั้นนำไปพ่นทองเคลือบบริเวณผิวก่อนนำไปทดสอบ

7. การวัดเนื้อสัมผัสของดักแด้ใหม่อบแห้ง

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของดักแด้ใหม่อบแห้งใช้เครื่อง Texture Analyzer (Stable Micro System, model TA.XT. Plus, Surrey, UK) ใช้หัวกดชนิด Ball probe มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm ความเร็วก่อนกด 10 mm/min และความเร็วหัวกด 30 mm/min โดยค่าเนื้อสัมผัสพิจารณาจากค่าความแข็งและความกรอบของดักแด้ใหม่อบแห้ง การทดสอบดำเนินการทั้งหมด 15 ซ้ำ และทำซ้ำ 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย

8. การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของดักแด้ใหม่อบแห้ง

การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของดักแด้ใหม่อบแห้งใช้เครื่องวอเตอร์แอกทิวิตี (Novasina, model LabMaster-aw, Switzerland) โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25 °C การทดสอบดำเนินการซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

9. การประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งประเมินจากการใช้พลังงานของอุปกรณ์อบแห้ง ได้แก่ เครื่องเป่าลม เตามโครเวฟ และเครื่องผลิตความร้อน โดยในงานวิจัยนี้นำเสนอในรูปของความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption : SEC) ซึ่งค่า SEC เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยค่า SEC กรณีอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) โดย 2.6 คือค่าแฟคเตอร์การเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน (พลังงานปฐมภูมิ) (Achariyaviriya *et al.*, 200; Kumklam *et al.*, 2019) แต่สำหรับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนไม่มีเทอมของค่าพลังงานจากไมโครเวฟ

$$SEC = \frac{2.6 E_{blower} + 2.6 E_{microwave} + E_{heater}}{M_{water}} \quad (2)$$

เมื่อ

SEC	คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง, MJ/kg น้ำที่ระเหย
E_{blower}	คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องเป่าลม, MJ
$E_{microwave}$	คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าของไมโครเวฟ, MJ
E_{heater}	คือ การใช้พลังงานความร้อนของเครื่องผลิตความร้อน, MJ
M_w	คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากตัวอย่างอบแห้ง, kg

10. การวิเคราะห์ทางสถิติ

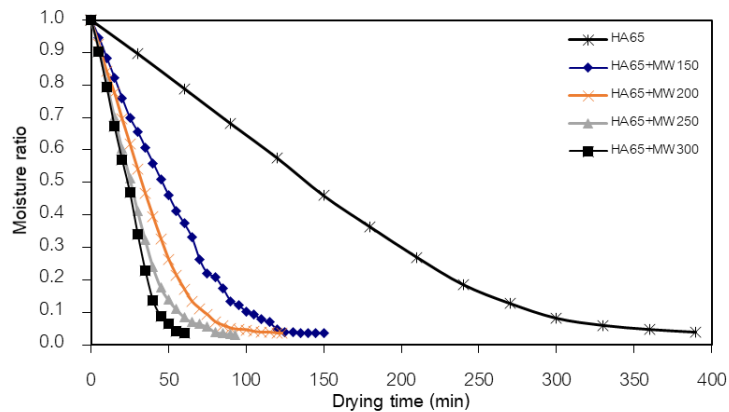
นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคุณภาพของดักแด้ใหม่อบแห้งในด้านสี ความแข็ง และความกรอบ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

ผลการวิจัย

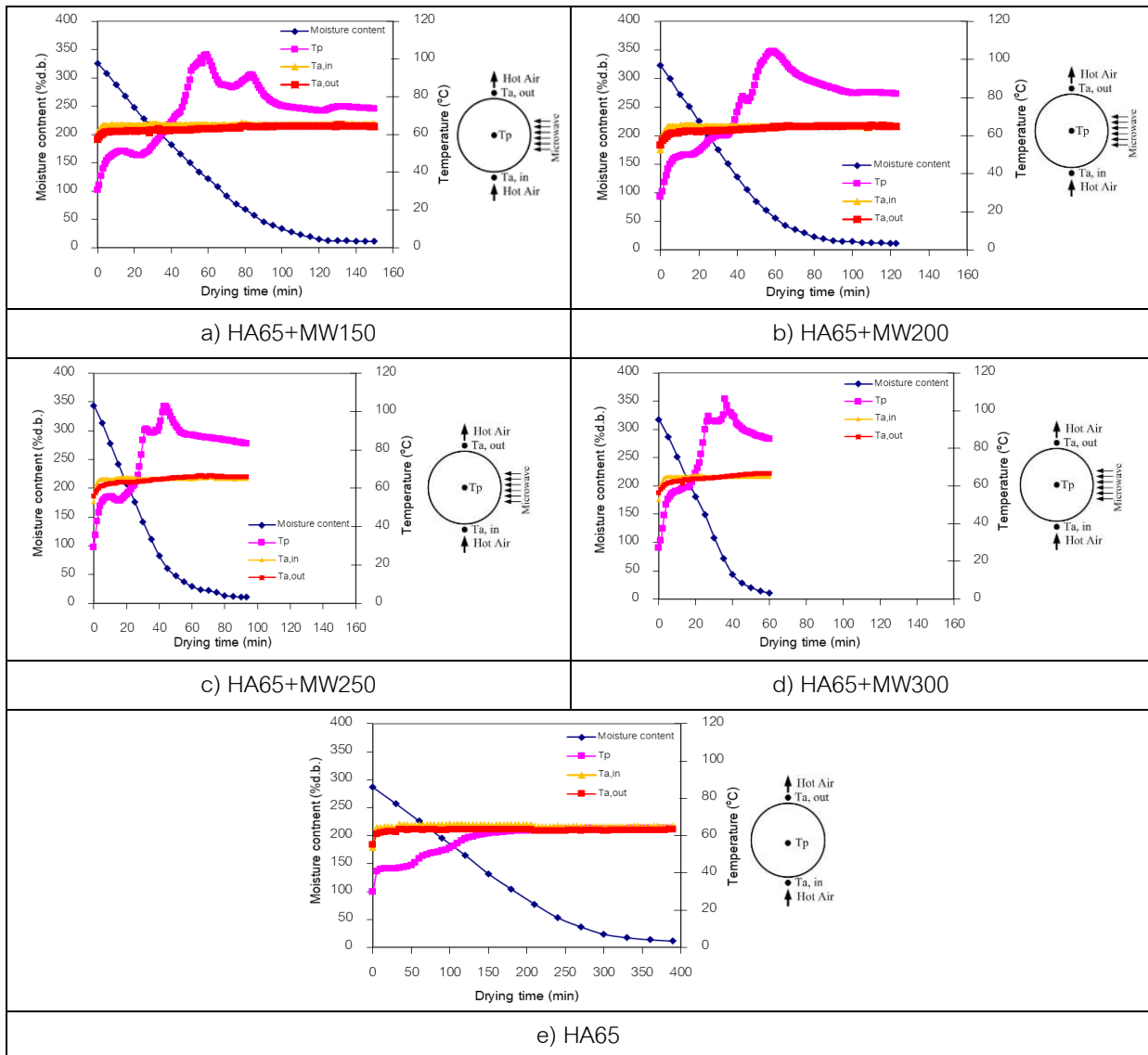
1. จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งดักแด้ใหม่

การอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการใช้กำลังไมโครเวฟ 150, 200, 250 และ 300 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C และการอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C โดยใช้ดักแด้ใหม่ที่

ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 270-320% ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งผักแห้งใหม่มีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 4% ฐานแห้ง โดยจลนพลศาสตร์ของกระบวนการอบแห้งผักแห้งใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดง ในภาพที่ 2 และการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของการอบแห้งผักแห้งใหม่ด้วยลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของผักแห้งใหม่ในขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ (MW คือ ไมโครเวฟ, 150-300 คือ กำลังไมโครเวฟ, HA คือ ลมร้อน, 65 คือ อุณหภูมิลมร้อน 65 °C)



ภาพที่ 3 a-d) การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของผักตัดใหม่และอากาศอบแห้งในขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่กำลัง 150-300 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C และ e) การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C (Ta, in คือ อุณหภูมิลมร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้ง; Ta, out คือ อุณหภูมิลมร้อนที่ทางออกของห้องอบแห้ง; Tp คือ อุณหภูมิของผักตัดใหม่)

2. คุณภาพทางด้านสีของผักตัดใหม่อบแห้ง

ค่าสีของผักตัดใหม่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการใช้กำลังไมโครเวฟ 150, 200, 250 และ 300 W ร่วมกับลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C และผักตัดใหม่อบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C แสดงในตารางที่ 1

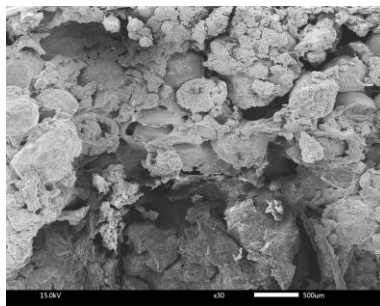
ตารางที่ 1 ค่าสีของดักแด้ไหมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อน

Drying methods	L*	a*	b*	Drying times (min)
HA65	42.10±1.14 ^a	9.57±1.04 ^b	13.93±1.43 ^a	390±3 ^e
HA65+MW150	45.10±1.20 ^b	7.79±0.95 ^a	10.23±1.74 ^b	150±2 ^d
HA65+MW200	44.58±0.44 ^b	7.92±0.44 ^a	10.50±0.35 ^b	120±2 ^c
HA65+MW250	44.22±0.29 ^b	7.93±0.60 ^a	10.53±1.24 ^b	90±1 ^b
HA65+MW300	44.12±0.86 ^b	8.15±0.23 ^a	11.00±1.94 ^b	60±1 ^a

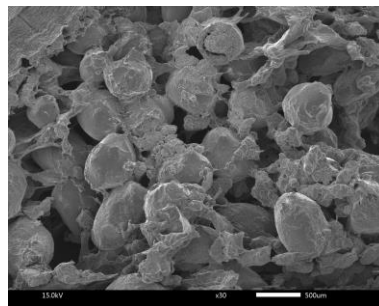
หมายเหตุ : อักษรภาษาอังกฤษที่ยกกำลังที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันของตารางแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

3. โครงสร้างระดับจุลภาคของดักแด้ไหมอบแห้ง

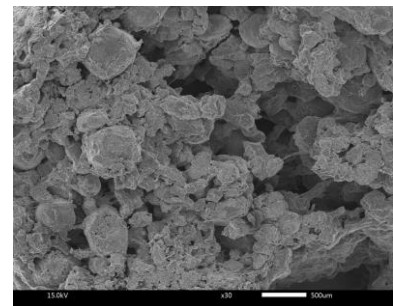
โครงสร้างระดับจุลภาคของดักแด้ไหมที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ และการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 4



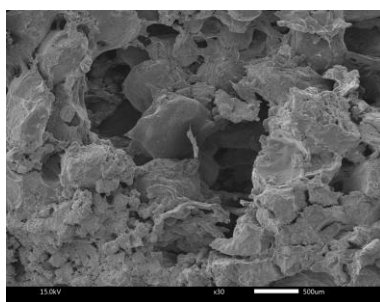
a) HA65



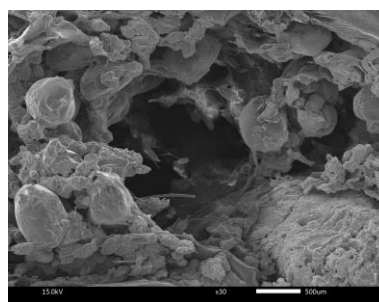
b) HA65+MW150



c) HA65+MW200



d) HA65+MW250



e) HA65+MW300

ภาพที่ 4 ภาคตัดขวางของโครงสร้างระดับจุลภาคของดักแด้ไหมไหมที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ

4. คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี

คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผักตัดใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 2 แสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผักตัดใหม่อบแห้งด้วยเงื่อนไขการอบแห้งแบบวิธีต่างๆ

ตารางที่ 2 ค่าเนื้อสัมผัสและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของผักตัดใหม่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ

Drying methods	Hardness (N)	Number of peak	Water activity	Drying time (min)
HA65	7.60±1.88 ^c	15.22±2.28 ^a	0.565±0.011 ^a	390±3 ^e
HA65+MW150	5.02±1.96 ^b	17.88±2.42 ^b	0.548±0.007 ^a	150±2 ^d
HA65+MW200	4.07±1.25 ^{ab}	18.36±2.79 ^b	0.548±0.007 ^a	120±2 ^c
HA65+MW250	3.78±1.59 ^{ab}	21.00±2.14 ^c	0.564±0.012 ^a	90±1 ^b
HA65+MW300	3.08±1.35 ^a	24.44±2.88 ^d	0.556±0.011 ^a	60±1 ^a

หมายเหตุ : อักษรภาษาอังกฤษที่ยกกำลังที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันของตารางแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

5. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งของงานวิจัยนี้แสดงอยู่ในรูปแบบของความสิ้นเปลืองพลังงานเชิงความร้อน โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ

Drying methods	Drying time (min)	Water evaporated (kg)	SEC (MJ/kg water evaporated)				Overall energy
			Thermal Energy	Electric energy*			
				Blower	Microwave	Total	
HA65	390±3 ^e	0.1219±0.0020 ^{abc}	70.29±1.47 ^e	65.38±1.73 ^e	-	65.38±1.73 ^c	135.67±3.19 ^d
HA65+MW150	150±2 ^d	0.1238±0.0013 ^c	23.55±0.70 ^d	24.76±1.03 ^d	37.80±0.58 ^b	62.56±1.59 ^c	86.12±2.29 ^c
HA65+MW200	120±2 ^c	0.1227±0.0010 ^{bc}	19.66±0.46 ^c	19.99±0.86 ^c	43.48±0.94 ^c	63.47±1.66 ^c	83.13±2.09 ^c
HA65+MW250	90±1 ^b	0.1205±0.0005 ^{ab}	15.24±0.36 ^b	15.26±0.22 ^b	43.50±0.96 ^c	58.76±1.18 ^b	74.00±1.54 ^b
HA65+MW300	60±1 ^a	0.1196±0.0010 ^a	10.54±0.10 ^a	10.25±0.46 ^c	33.65±0.99 ^a	43.90±1.44 ^a	54.44±1.55 ^a

หมายเหตุ : อักษรภาษาอังกฤษที่ยกกำลังที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันของตารางแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

*พลังงานไฟฟ้าแสดงในรูปของพลังงานความร้อนด้วยการคูณค่าแฟคเตอร์การแปลงพลังงาน 2.6

วิจารณ์ผลการวิจัย

การอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยลมร้อนใช้ผักตัดใหม่ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 270-320% ฐานแห้ง อบแห้งจนกระทั่งผักตัดใหม่มีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 4% ฐานแห้ง โดยจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 2 พบว่าวิธีการอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นมากกว่าวิธีการอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยลมร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของผักตัดใหม่ในขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยลมร้อนดังแสดงในภาพที่ 3 a-e ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลสูงกว่า ซึ่งเกิดจากน้ำภายในวัสดุดูดซับคลื่นไมโครเวฟ แล้วเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วอันเป็นผลมาจากการที่น้ำเป็นโมเลกุลมีขั้วเมื่อดูดซับคลื่นไมโครเวฟที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างรวดเร็ว ทำให้โมเลกุลของน้ำในผักตัดใหม่เกิดการเสียดสีกันอย่างรวดเร็วกำเนิดความร้อนขึ้นภายในผักตัดใหม่ ส่งผลให้อุณหภูมิของผักตัดใหม่เพิ่มขึ้น ทำให้น้ำที่อยู่ภายในผักตัดใหม่ระเหยกลายเป็นไอน้ำและเคลื่อนออกจากภายในเนื้อของผักตัดใหม่มายังบริเวณผิวอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความชื้นของผักตัดใหม่จึงลดลงรวดเร็ว ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง (Varith *et al.*, 2007; Wiset *et al.*, 2018)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น อุณหภูมิของผักตัดใหม่ และอุณหภูมิของอากาศในขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 3 a-e พบว่า ในขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน อุณหภูมิของผักตัดใหม่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของระดับกำลังไมโครเวฟ จากนั้นอุณหภูมิของวัสดุจะเกิดความแปรปรวนในช่วงเวลาในการอบแห้งประมาณ 18-22 นาที แรกของการอบแห้ง เนื่องจากผลของปรากฏการณ์การลดลงของอุณหภูมิของผักตัดใหม่ในขณะอบแห้ง (Cooling effect) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากอัตราการถ่ายเทมวลน้ำภายในเนื้อของผักตัดใหม่มายังผิวมากกว่าอัตราการระเหยของน้ำจากผิวของผักตัดใหม่ไปยังอากาศอบแห้ง การระเหยของน้ำจากผิวของผักตัดใหม่ในช่วงนี้เป็นการระบายความร้อนออกจากผิวของผักตัดใหม่ที่เปียก ทำให้อุณหภูมิของผักตัดใหม่ลดลง จากนั้นอุณหภูมิของผักตัดใหม่จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งอุณหภูมิของผักตัดใหม่จะลดลงเนื่องจากปริมาณความชื้นที่จะดูดซับคลื่นไมโครเวฟลดลง (Paengkanya *et al.*, 2015)

ค่าสีของผักตัดใหม่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและผักตัดใหม่อบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ผักตัดใหม่ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความสว่างของสีสูงกว่า แต่มีค่าสีแดง ($+a^*$) และสีเหลือง ($+b^*$) ต่ำกว่าผักตัดใหม่อบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาอบแห้งนานกว่าจึงเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้มากกว่า โดยวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งนานประมาณ 4 เท่าของวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในกรณีอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนไม่ส่งผลให้ค่าสีของผลิตภัณฑ์ผักตัดใหม่อบแห้งที่เงื่อนไขต่างๆ มีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wiset *et al.* (2018) พบว่า การใช้ระดับกำลังไมโครเวฟเพิ่มขึ้นในการอบแห้งผักตัดใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ไม่ส่งผลต่อทุกค่าสี (L, a และ b) ของผักตัดใหม่อบแห้ง

โครงสร้างระดับจุลภาคของผักตัดใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่เงื่อนไขต่างๆ และการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในภาพที่ 4 พบว่า ผักตัดใหม่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองเกิดรูพรุนภายในเนื้อของผักตัดใหม่ขนาดใหญ่กว่าภาคตัดขวางของผักตัดใหม่อบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากอุณหภูมิของผักตัดใหม่ที่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสูงกว่า ทำให้ความดันไอน้ำภายในผักตัดใหม่สูงกว่า ส่งผลให้แรงอัตราการระเหยของไอน้ำออกสู่ภายนอกบริเวณผิวของผักตัดใหม่อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดรูพรุนภายในเนื้อของผักตัดใหม่จากผลของการถ่ายเทมวลออก

อย่างรวดเร็ว ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนให้อุณหภูมิของดักแด้น้อยกว่า ทำให้ความชื้นภายในดักแด้น้อยๆ ระเหยออกไปอย่างช้าๆ จึงทำให้เนื้อของดักแด้เกิดรูพรุนเพียงเล็กน้อย (Paengkanya *et al.*, 2015) เมื่อพิจารณาผลของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของดักแด้ใหม่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่าการเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟทำให้เกิดรูพรุนภายในเนื้อดักแด้มีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการใช้กำลังไมโครเวฟสูงอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนจะทำให้รูพรุนของวัสดุสูงกว่า ความชื้นภายในวัสดุระเหยออกจากวัสดุอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดรูพรุนขยายออก (Guo *et al.*, 2017)

คุณภาพทางด้านเนื้อสัมผัสและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของดักแด้ใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ดักแด้ใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าความแข็ง (Hardness) ต่ำกว่า แต่มีค่าความกรอบ (Number of peak) สูงกว่าดักแด้ใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เนื่องจากดักแด้ใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดักแด้ใหม่อบแห้งด้วยลมร้อน รูพรุนหรือช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของดักแด้ใหม่ช่วยทำให้วัสดุมีความกรอบมากขึ้น (Paengkanya *et al.*, 2015) เมื่อพิจารณาผลของระดับกำลังไมโครเวฟที่ส่งผลต่อโครงสร้างระดับจุลภาคของดักแด้ใหม่อบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้นจาก 150 W เป็น 300 W จะทำให้ดักแด้ใหม่อบแห้งมีความแข็งต่ำกว่าและมีความกรอบสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากขนาดรูพรุนที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 2 แสดงค่าวอเตอร์แอกทิวิตีของดักแด้ใหม่อบแห้งด้วยวิธีต่างๆ พบว่า ผลิตภัณฑ์ดักแด้ใหม่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองและดักแด้ใหม่อบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีอยู่ระหว่าง 0.548-0.565 และมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าไม่เกิน 0.6 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.1148/2559 (Thai Industrial Standards Institute, 2016) แสดงให้เห็นว่าดักแด้ใหม่อบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์และหากบรรจุในภาชนะปิดภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะทำให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งแสดงในรูปแบบของความสิ้นเปลืองพลังงานเชิงความร้อน โดยความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในตารางที่ 3 พบว่า วิธีการอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนทุกเงื่อนไขการทดลองมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเชิงความร้อนรวมต่ำกว่าวิธีการอบแห้งดักแด้ใหม่ด้วยลมร้อนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo *et al.* (2017) เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า โดยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งอยู่ระหว่าง 60-150 นาที ในขณะที่วิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้ง 390 นาที โดยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด คือ 54.44 MJ/kg น้ำระเหย ช่วยให้สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 60% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อพิจารณาผลของระดับกำลังไมโครเวฟที่มีต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน พบว่า การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟมากขึ้น ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเชิงความร้อนรวมของกระบวนการอบแห้งลดลง เนื่องจากการใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง (Varith *et al.*, 2007) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ และ Wiset *et al.* (2018)



สรุปผลการวิจัย

วิธีการอบแห้งผักตบชวาด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะของกระบวนการอบแห้งลงได้ และยังสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผักตบชวาอบแห้งได้ โดยวิธีการอบแห้งผักตบชวาด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนในทุกเงื่อนไขการทดลอง ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะของกระบวนการอบแห้งต่ำกว่าวิธีการอบแห้งผักตบชวาด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว การเพิ่มระดับของกำลังไมโครเวฟมากขึ้นในการอบแห้งผักตบชวาด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง ผักตบชวาที่ผ่านอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนมีค่าความแข็งต่ำกว่า และมีค่าความกรอบสูงกว่าผักตบชวาที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามผักตบชวาที่ผ่านการอบแห้งทั้งสองวิธีมีค่าสีไม่แตกต่างกัน โดยผักตบชวาอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนที่ กำลังไมโครเวฟ 300 W เป็นเงื่อนไขที่แนะนำสำหรับผลิตผักตบชวาอบแห้งไขมันต่ำ เพื่อสุขภาพทางเลือกทดแทนผักตบชวาสด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนการวิจัย ขอขอบคุณโครงการ ศ.ดร.สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (Grant No. DPG 5980004) โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนเครื่องมือวิจัย และขอบคุณคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

AOAC. Official Methods of Analysis. (1995). 16th ed. Association of official Agricultural Chemists. Washington: DC.

Acharyaviriyaya, A., Soponronnarit, S. & Tiansuwan, J. (2001). Study of longan flesh drying. *Drying Technology*, 19(9), 2315-2329.

Guo, Q., Sun, D.-W., Cheng, J.-H. & Han, Z. (2017). Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 236-247.

Kumklam, P., Prachayawarakorn, S., Devahastin, S. & Soponronnarit, S. (2019). Effects of operating parameters of impinging stream dryer on parboiled rice quality and energy consumption. *Drying Technology*, 128, 1-12.

Longvah, T., Mangthya, K. & Ramulu P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (*Samia ricinii*) prepupae and pupae. *Food Chemistry*, 128, 400-403.



- Office of Agricultural Economics. (2020). Quantity and value of agricultural products exports for Industry in 2019. Retrieved November 12, 2020, from http://impexp.oae.go.th/service/report_product01.php?S.
- Paengkanya, S, Nathakaranakule, A. & Soponronnarit, S. (2018). Production of durian chips using combined microwave-grilling and hot air drying. *KKU Science Journal*, 46(4), 789-799. (in thai)
- Paengkanya, S, Soponronnarit, S. & Nathakaranakule, A. (2015). Application of microwaves for drying of durian chips. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 1-11.
- Pu, Y.-Y. & Sun, D.-W., (2017). Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualization of moisture content distribution. *Biosystems Engineering*, 156, 108-119.
- Thai Industrial Standards Institute. (2016). Product standard of fried Ginoon (1148/2016). Ministry of Industry, 1-5. (in Thai)
- Usub, T., Lertsatitthanakorn, C., Poomsa-ad, N., Wiset, L., Yang, L. & Siriamornpun, S. (2008). Experimental performance of a solar tunnel dryer for drying silkworm pupae. *Biosystems Engineering*, 101, 209-216.
- Varith, J., Dijknanarukkul, P., Achariyaviriya, A. and Achariyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering*, 81, 459-468.
- Wiset, L., Wongkasem, K., Poomsa-ad, N. & Kampakdee, M. (2018). Silkworm pupae drying using microwave combined with hot air. *International Food Research Journal*, 25, 702-705.
- Xu, W., Song, C., Li, Z., Song, F., Hu, S., Li, J., Zhu, G. & Raghavan, G.S. V. (2018). Temperature gradient control during microwave combined with hot air drying. *Biosystems Engineering*, 169, 175-187.