



## การประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อแปรรูปเห็ดหอมอบแห้ง

## The Application of Microwave combined with Solar Drying to produce Dried Shitake Mushroom

สำรวย ภูบาล<sup>1</sup>, สุรพิชญ์ ทับเที่ยง<sup>1\*</sup>

Sumruay Pubali<sup>1</sup>, Suratip Tabtiang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชาราษฎร์สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

<sup>1</sup>Department of social and applied science, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat Sai 1 Road, Wongsawang, Bangkok 10800, Thailand

\*Corresponding author: Tel: +66 91 876 1661 , E-mail: [Surapit\\_t@yahoo.com](mailto:Surapit_t@yahoo.com); [Ohmpare@hotmail.com](mailto:Ohmpare@hotmail.com)

### บทคัดย่อ

เห็ดหอมเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งได้รับความนิยมในการบริโภค อย่างไรก็ตามเห็ดหอมมีอายุการเก็บรักษาสั้น การอบแห้งเห็ดหอมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในการแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและยกระดับคุณภาพของเห็ดอบแห้ง ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากนำเห็ดมาสองกลุ่ม กลุ่มแรกเห็ดเต็มชิ้นและกลุ่มที่สองเห็ดหั่นครึ่งชิ้น จากนั้นนำมาอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ คือ อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศธรรมชาติ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศแบบบังคับ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการพuffingด้วยไมโครเวฟและการตากแห้ง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทดสอบคุณภาพด้านต่างๆ ผลการทดลองพบว่าวิธีการอบแห้งส่งผลต่อคุณภาพเห็ดและเวลาการอบแห้ง การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟช่วยลดเวลาการอบแห้งและช่วยให้เห็ดมีการหดตัวน้อยที่สุด การหดตัวที่น้อยทำให้เห็ดอบแห้งมีอัตราส่วนการคืนตัวสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเห็ดที่อบแห้งวิธีอื่นๆ อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟพuffingในการอบแห้งช่วงสุดท้ายทำให้เห็ดหอมเกิดสีน้ำตาลคล้ำมากกว่าการอบแห้งวิธีอื่นๆ การไหลของอากาศบังคับและขนาดของเห็ดครึ่งชิ้นช่วยให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลง

คำสำคัญ : เห็ดอบแห้ง, การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, ไมโครเวฟพuffing, อัตราส่วนการคืนตัว, สี

### Abstract

Shiitake mushroom is one of the economic crops in Thailand. However, the mushroom shelf life is short time, therefore the mushroom processing could applied to extend its shelf life. Mushroom processing by solar drying combined microwave puffing is an interesting technique. The fresh mushroom preparation of experiment divided 2 groups, the first group was full size mushroom and half size of the second group. Then, it was dried by various drying method i.e. natural air flow drying with solar energy, forced-air flow drying with solar energy, forced-air drying with solar energy combined microwave puffing and shade drying. The final dried products were evaluated in various qualities. The experimental results showed that the drying method significantly affected on dried mushroom quality and drying time. Forced-air drying with solar energy combined microwave puffing reduced drying time. In addition, the combined drying method provided the lowest degree of shrinkage resulted in the highest rehydration was obtained from such volumetric shrinkage of dried mushroom. However, the combined drying method resulted in more browning than that of other drying methods. Solar drying by forced air flow and half size of mushroom provided lower drying time.

Keywords: Dried mushroom, Solar drying, Microwave puffing, Rehydration ratio, Color

Received: June 21, 2020

Revised: August 30, 2020

Accepted: September 4, 2020

Available online: January 20, 2021

## 1 บทนำ

เห็ดหอมเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมบริโภคอย่างแพร่หลาย แต่เห็ดหอมมีอายุการเก็บรักษาสั้นจึงทำให้เกิดการเน่าเสียง่าย ดังนั้นเกษตรกรจึงนำเห็ดมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลาย เช่น เห็ดทอด เห็ดอบแห้งและเห็ดตากแห้ง การแปรรูปเห็ดด้วยการตากแห้งเป็นวิธีการที่เกษตรกรนิยมใช้กันกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามข้อเสียของการตากแห้งนั้นมีหลายประเด็น เช่น ความไม่สม่ำเสมอของแสงแดด การปนเปื้อน ระยะเวลาการตากแห้งนานด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เห็ดมีคุณภาพต่ำ ดังนั้นการนำเห็ดมาอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคนิคที่น่าสนใจเนื่องจากช่วยลดระยะเวลาการแปรรูปและป้องกันการปนเปื้อน (สมชาติ โสภณธฤทธิ์, 2540)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีหลายปัจจัย เช่น ขนาดของวัสดุอบแห้ง วิธีการอบแห้ง ลักษณะการไหลของอากาศ Reyes et al. (2013) ศึกษาผลของขนาดเห็ดต่อคุณลักษณะของการอบแห้ง โดยกำหนดความหนาของเห็ดที่ 4 และ 8 mm เมื่ออบแห้งพบว่าเห็ดที่มีความหนา 8 mm จะมีอัตราส่วนความชื้นลดลงช้ากว่าเห็ดที่มีความหนา 4 mm ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งเดียวกัน สาเหตุเนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในวัสดุมาผิวมากขึ้น (Prakotmak et al., 2010) จึงต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่ออบแห้งให้ความชื้นลดลงเหลือระดับเดียวกับเห็ดที่มีความหนาน้อยกว่า

นอกจากนี้วิธีการอบแห้งยังส่งผลต่อคุณลักษณะการอบแห้งของอาหาร Mennouche et al. (2014) ศึกษาการอบแห้ง deglet nour date ด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีรูปแบบต่างๆ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศธรรมชาติช่วยให้ deglet nour date มีการลดลงของความชื้นมากกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศบังคับและการอบแห้งแบบการผึ่งแดดร่วมกับการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศธรรมชาติสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าเนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุมีอัตราเพิ่มขึ้นสูงสุดในระหว่างช่วงกลางวันเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ แต่เทคนิคการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศธรรมชาติทำให้อุณหภูมิของ deglet nour date สูงเกินไปจึงส่งผลเสียต่อคุณภาพของ deglet nour date

อย่างไรก็ตามการผลิตเห็ดอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีการหดตัวสูงเพราะใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำจึงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านนี้ได้ Feng and Tang (1998) พบว่าการอบแห้งแอปเปิลด้วยไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งโดยเทคนิค spouted bed ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้ระยะเวลาการ

อบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิค spouted bed ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เพียงอย่างเดียว เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้ออาหารให้รวดเร็วและทำให้น้ำในแอปเปิลเกิดการระเหยเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็วและระเหยออกมาจากแอปเปิล(Venkatesh and Raghavan, 2004; Paengkanya et al., 2015) การระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้เกิดไอน้ำที่มีแรงดันสูงกระทำให้โครงสร้างแอปเปิลเกิดการขยายตัวจึงเกิดรูพรุนในโครงสร้างอาหาร (Paengkanya et al., 2015) ด้วยสาเหตุนี้แอปเปิลที่อบแห้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วย spouted bed จึงมีความพรุนตัวสูงกว่าแอปเปิลที่อบแห้งด้วยเทคนิค spouted bed เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้สมบัติการคั้นตัวของแอปเปิลที่อบแห้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟร่วมกับการอบแห้งด้วย spouted bed มีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยเทคนิค spouted bed เพียงอย่างเดียว

จากรายงานวิจัยก่อนหน้ายังมีการศึกษาผลของขนาดวัสดุอบแห้งร่วมกับวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งไม่มาก ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของขนาดวัสดุอบแห้งและวิธีการอบแห้งต่อคุณภาพของเห็ดหอมอบแห้งในทอมของสี การหดตัว การคั้นตัวและคุณลักษณะการอบแห้ง

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การเตรียมเห็ด

นำเห็ดหอมสดที่ซื้อจากตลาดซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 cm มาหาปริมาณความชื้นเริ่มต้นโดยนำเห็ดสดน้ำหนัก 5 g ใส่ในภาชนะอบแห้ง แล้วนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 4-5 h (Wang et al., 2014)

### 2.2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

รูปที่ 1 แสดงเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยมีส่วนประกอบดังนี้ (1) แผงรับความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (2) ห้องอบแห้ง (3) ถาดอบแห้ง (4) พัดลมดูดอากาศ (5) แผงควบคุมพัดลมดูดอากาศ ในการอบแห้งนำเห็ดสดน้ำหนัก 250 g มาวางบนถาดอบแห้งแต่ละถาด จำนวนรวม 3 ถาด ซึ่งน้ำหนักรวมของเห็ดสดก่อนอบแห้งเท่ากับ 750 g จากนั้นนำถาดอบแห้งทั้งหมดมาวางบนชั้นภายในห้องอบแห้งโดยการบรรจุ 1 ถาดต่อชั้นอบแห้ง แล้วอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ ในระหว่างอบแห้งจะนำเห็ดอบแห้งออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 2 h เพื่อคำนวณหาความชื้นที่ลดลงจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของเห็ดเหลือ 14% wet basis (w.b.) หรือ 12% dry basis (d.b.)

### 2.3 การอบแห้ง

การอบแห้งการอบแห้งเห็ดหอมจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เห็ดหอมเต็มชิ้นซึ่งไม่ผ่าครึ่ง กลุ่มที่ 2 เห็ดหอมผ่าครึ่งขึ้นตามแนวของเส้นผ่านศูนย์กลาง แล้วจึงนำเห็ดมาวางลงบนถาดอบแห้ง ทำการอบแห้งเห็ดโดยศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ ขนาดเห็ดและวิธีการอบแห้ง โดยสภาวะของการอบแห้งดังแสดงในตารางที่ 1 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศ

ธรรมชาติจะปิดการทำงานของพัดลมดูดอากาศระหว่างการอบแห้ง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศบังคับจะเปิดการทำงานของพัดลมดูดอากาศระหว่างการอบแห้งโดยใช้ความเร็วการไหลอากาศที่  $2 \text{ ms}^{-1}$  ส่วนการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดพียงด้วยไมโครเวฟจะทำการอบแห้งช่วงแรกด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศแบบบังคับที่ความเร็ว  $2 \text{ ms}^{-1}$  จนเห็ดมีความชื้นภายในเหลือ 25% w.b. แล้วนำมาพัดพียงด้วยไมโครเวฟจนความชื้นเหลือ 14% w.b. การอบแห้งเพื่อลดความชื้นในเห็ดทั้ง 4 วิธีจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเห็ดที่ตากแห้ง

ในกระบวนการอบแห้งเห็ดจะเริ่มอบแห้งตั้งแต่วันที่เวลา 09.00 am -5.00 pm ในทุกเดือนไขเป็นเวลา 8 h ต่อวัน ซึ่งหากยังไม่สิ้นสุดกระบวนการอบแห้งดังกล่าวจะทำการเก็บเห็ดอบแห้งไว้ในถาดอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันความชื้นของอากาศสัมผัสกับผลิตภัณฑ์จนเกิดความเสียหายและเริ่มกระบวนการอบแห้งต่อในวันถัดไป ความเข้มแสงอาทิตย์ในระหว่างการทดลองวัดค่าด้วยเครื่อง Pyranometer (MS-601, Eko, Japan) ส่วนอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและอุณหภูมิภายในเห็ดอบแห้งวัดค่าด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แล้วทำการบันทึกข้อมูลทั้งหมดด้วย Data recorder (8422-51, Hioki, Japan) โดยทำการบันทึกข้อมูลทุก 1 h

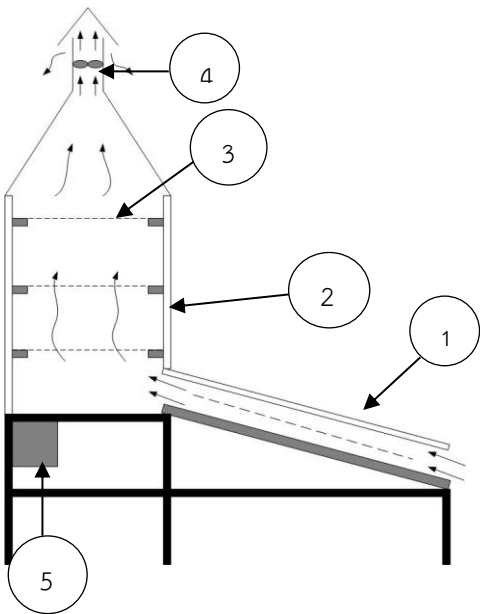


Figure 1 Solar drying equipment for mushroom processing.

#### 2.4 กระบวนการพัดพียง

เห็ดที่ผ่านการอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัดพียงด้วยไมโครเวฟจนมีความชื้นภายในเหลือ 25% w.b. จากการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในขั้นตอนแรก มาพัดพียงด้วยตู้อบไมโครเวฟ (Samsung, Model

MG23F301EAS, Thailand) ในขณะที่พัดพียงใช้กำลังไมโครเวฟที่ 600 W เป็นเวลา 2.5 และ 3 min สำหรับเห็ดที่หั่นครึ่งชิ้นและเห็ดที่ไม่หั่นครึ่งชิ้นตามลำดับ หลังพัดพียงความชื้นในเห็ดจะเหลือไม่เกิน 14% w.b.

#### 2.5 การทดสอบคุณภาพสี

การทดสอบคุณภาพสีของเห็ดอบแห้งจะสุ่มตัวอย่างเห็ดตามจำนวน 15 ชิ้น แล้วใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer (HunterLab, ColorFlex, UK) วัดสีของเห็ดในระบบ CIE โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงแบบ D65 และมุมสังเกต  $10^\circ$  พิจารณาสีในทอมของค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) ความเป็นสีเหลือง ( $b^*$ ) และโทนสี (Hue angle) ซึ่งก่อนทำการทดสอบจะต้องเปรียบเทียบปรับค่าสีของเครื่องวัดกับแผ่นสีมาตรฐานสีดำและสีขาวก่อนทุกครั้ง

#### 2.6 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวจะใช้เห็ดอบแห้งจำนวน 15 ชิ้น มาวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวตามแนวแกนของเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $x$ ,  $y$ ) และการเปลี่ยนแปลงความสูง ( $z$ ) เพื่อคำนวณหาร้อยละการหดตัวตามแนวแกนของเห็ดหลังจากการอบแห้งด้วยสมการ (1) - (3)

$$\text{แนวแกน } x; \quad \text{Shrinkage}(\%) = \left( \frac{X_1 - X_2}{X_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{แนวแกน } y; \quad \text{Shrinkage}(\%) = \left( \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{แนวแกน } z; \quad \text{Shrinkage}(\%) = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $X_1$  = ขนาดของเห็ดก่อนอบแห้งแนวแกน  $x$ , cm  
 $X_2$  = ขนาดของเห็ดหลังอบแห้งแนวแกน  $x$ , cm  
 $Y_1$  = ขนาดของเห็ดก่อนอบแห้งแนวแกน  $y$ , cm  
 $Y_2$  = ขนาดของเห็ดหลังอบแห้งแนวแกน  $y$ , cm  
 $Z_1$  = ขนาดของเห็ดก่อนอบแห้งแนวแกน  $z$ , cm  
 $Z_2$  = ขนาดของเห็ดหลังอบแห้งแนวแกน  $z$ , cm

#### 2.7 การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัวเพื่อวัดพฤติกรรมการดูดซึมน้ำผ่านผิวของเห็ดอบแห้งเข้ามาภายในเนื้อเห็ด การทดสอบจะนำเห็ดอบแห้งมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ  $60^\circ \text{C}$  ระหว่างการทดสอบจะนำเห็ดมาชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นทุก 5 min จนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างเห็ดอบแห้งคงที่ (Wang et al., 2014) จากนั้นนำมาหาอัตราส่วนของน้ำหนักเห็ดที่ทำการดูดซึมน้ำต่อน้ำหนักเริ่มต้นของเห็ดอบแห้งดังสมการที่ 4

$$RR = \frac{G_f}{G_s} \quad (4)$$

เมื่อ  $RR$  คือ อัตราส่วนการคืนตัว

$G_f$  คือ น้ำหนักเห็ดต่อแห้งหลังการดูดซับน้ำ, g

$G_g$  คือ น้ำหนักเห็ดต่อแห้งเริ่มต้น, g

## 2.8 การวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image analysis)

ความพรุนตัวในเห็ดต่อแห้งจะพิจารณาจาก void area fraction โดยใช้ภาพถ่ายระดับจุลภาคที่กำลังขยาย 50 เท่า ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JSM – 5800LV, JEOL, UK) มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image analysis (ImagePro+5.0, MediaCybernetic, USA) การวิเคราะห์จะนำเทคนิค threshold-based segmentation มาใช้แปลงภาพถ่ายระดับจุลภาคให้อยู่ในรูปแบบ binary image เพื่อจำแนกรูพรุนออกจากเนื้อเห็ด เกณฑ์การจำแนกรูพรุนออกจากเนื้อเห็ดพิจารณาจากค่า threshold ของ grey level ถ้า pixel ที่มีค่าต่ำกว่าค่า threshold ที่กำหนดถือว่าเป็นรูพรุนซึ่งเป็นพื้นที่ที่เป็นสีดำในภาพ ส่วน pixel ที่มีค่าสูงกว่าค่า threshold ถือว่าเป็นส่วนของเนื้อเห็ดซึ่งเป็นพื้นที่สีขาวในภาพถ่าย การหาค่า void area fraction จะพิจารณาจากจำนวน pixel ของพื้นที่ส่วนที่เป็นสีดำในขอบเขตของภาพถ่ายที่เป็นเนื้อเห็ดต่อพื้นที่หน้าตัดของเห็ดต่อแห้งทั้งหมด

## 2.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติด้านสี การหดตัว และ void area fraction ของเห็ดหอมอบแห้งจะใช้วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรม SPSS (SPSS, Version 22 for Windows, SPSS Inc., Chicago, U.S.A.) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

## 3 ผลและวิจารณ์

### 3.1 ความเข้มแสงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันขณะอบแห้ง ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในระหว่างช่วงเวลากลางวันมีค่าระหว่าง 278 ถึง 824  $Wm^{-2}$  โดยช่วงเวลา 9.00 – 12.00 am ค่าความเข้มแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มแสงมีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 am หลังจากนั้นความเข้มแสงจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นในช่วง 13.00 – 17.00 pm ผลของความเข้มแสงอาทิตย์จะส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิในห้องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 3 อุณหภูมิของห้องอบแห้งทั้งรูปแบบการไหลของอากาศแบบธรรมชาติ (DCB\_V0) และการไหลของอากาศแบบบังคับ (DCB\_Vmax) มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงอาทิตย์ในระหว่างวัน โดยมีอุณหภูมิของห้องอบแห้งระหว่าง 38 ถึง 57 °C ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการอบแห้ง โดยอุณหภูมิมีค่าสูงสุดในช่วงระหว่างเวลา 12.00-13.00 pm อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของห้องอบแห้งแบบการไหลของอากาศแบบธรรมชาติมีค่าสูงกว่าห้องอบแห้งแบบการไหลของอากาศแบบบังคับในช่วงเวลาเดียวกัน อุณหภูมิในห้องอบแห้งแบบการไหลของอากาศแบบธรรมชาติมีค่า

สูงกว่าเนื่องจากมีอัตราการระบายลมร้อนเข้าและออกจากห้องอบแห้งต่ำจึงเกิดการสะสมของความร้อนภายในห้องอบแห้ง

นอกจากนี้อุณหภูมิของเห็ดอบแห้งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิห้องอบแห้งทั้งการอบแห้งแบบการไหลของอากาศแบบธรรมชาติ (PD\_V0) และการไหลของอากาศแบบบังคับ (PD\_Vmax) โดยมีช่วงอุณหภูมิของเห็ดระหว่าง 32 ถึง 59 °C ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาการอบแห้ง ซึ่งอุณหภูมิเห็ดมีค่าสูงสุดในช่วงระหว่าง 12.00-13.00 pm เห็ดอบแห้งมีอุณหภูมิภายในสูงขึ้นโดยการถ่ายโอนความร้อนระหว่างลมร้อนกับเห็ดอบแห้งในรูปแบบการพาความร้อนร่วมกับความร้อนที่รับโดยตรงจากแสงอาทิตย์ในรูปแบบการแผ่รังสี (Reyes et al., 2013) นอกจากนี้อุณหภูมิของเห็ดอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของเห็ดตากแห้งในทุกช่วงเวลาการอบแห้ง ผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างวิธีการอบแห้งจะส่งผลต่อคุณลักษณะการอบแห้งของเห็ดซึ่งรายงานในหัวข้อถัดไป

### 3.2 คุณลักษณะการอบแห้ง

รูปที่ 4 แสดงผลของวิธีการอบแห้งและขนาดของเห็ดต่อคุณลักษณะของการอบแห้ง วิธีการอบแห้งส่งผลต่อคุณลักษณะของการอบแห้ง การอบแห้งเห็ดด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยให้ความชื้นในเห็ดลดลงรวดเร็วกว่าการตากแห้ง เนื่องจากเห็ดที่อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งมีอุณหภูมิภายในเนื้อเห็ดที่สูงกว่าเห็ดตากแห้งจึงช่วยเร่งให้ความชื้นระเหยออกเห็ดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เมื่อนำไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์พบว่าช่วยลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว โดยการอบแห้งด้วยไมโครเวฟลดระยะเวลาการอบแห้งลงได้ 22-34% เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบใช้อากาศบังคับ การใช้ไมโครเวฟในการอบแห้งช่วยเร่งการระเหยความชื้นได้มากเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟทำให้ขั้วโมเลกุลของน้ำภายในเกิดการสั่นส่งผลให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานความร้อนภายในวัสดุทำให้การระเหยน้ำรวดเร็วขึ้น (Venkatesh et al., 2004) ผลของความชื้นที่ลดลงอย่างรวดเร็วขณะอบแห้งด้วยไมโครเวฟทำให้การอบแห้งวิธีนี้ใช้เวลาการอบแห้งสั้นที่สุด

นอกจากนี้รูปแบบการไหลของอากาศในขณะอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ยังส่งผลต่อคุณลักษณะการอบแห้ง การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยความเร็วอากาศบังคับที่  $2 ms^{-1}$  ช่วยให้ความชื้นมีการลดลงรวดเร็วกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลของอากาศธรรมชาติ รูปแบบการไหลของอากาศแบบบังคับช่วยเร่งการระเหยได้มากขึ้นเพราะว่าความเร็วอากาศที่สูงจะเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากอากาศสู่ผิวของเห็ดอบแห้ง ทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นช่วยให้ความชื้นที่ผิวเห็ดมีการระเหยอย่างรวดเร็ว จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นที่ผิวและเนื้อด้านใน ดังนั้นความชื้นภายในวัสดุจะเคลื่อนตัวมาที่ผิวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Devahastin, 2012) นอกจากนี้การอบแห้งแบบใช้อากาศบังคับช่วยระบายความชื้นใน

ตัวกลางอบแห้งออกจากห้องอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งแบบ การไหลของอากาศแบบธรรมชาติ ส่งผลให้ความชื้นในเห็ดเกิดการ ระเหยออกมาได้ง่ายขึ้น ผลการทดลองนี้มีความแตกต่างจาก รายงานของ Mennouche et al. (2014) ซึ่งพบว่ากรอบแห้งด้วย พลังงานแสงอาทิตย์โดยการไหลของอากาศแบบธรรมชาติสามารถ ลดความชื้นได้ดีกว่าการใช้การไหลของอากาศแบบบังคับ อาจเนื่องจากอากาศในประเทศแถบแอฟริกาเหนือมีค่าความชื้น สัมพัทธ์ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับประเทศไทย จึงส่งผลให้ความชื้น สัมพัทธ์ในห้องอบแห้งมีค่าไม่สูงทั้งแบบการไหลของอากาศแบบ ธรรมชาติและแบบบังคับ แต่การไหลของอากาศแบบธรรมชาติ จะช่วยกักเก็บความร้อนในห้องอบแห้งได้ดีจึงช่วยให้ความชื้น ในอาหารระเหยออกมาได้เร็วขึ้น

เมื่อพิจารณาขนาดของเห็ดต่อคุณลักษณะการอบแห้ง พบว่า เห็ดที่ผ่านการหั่นครึ่งชิ้นมีการลดลงของความชื้นรวดเร็วกว่าเห็ดที่ มีขนาดเต็มชิ้นในทุกวิธีการอบแห้ง การผ่าครึ่งช่วยเร่งการระเหย ของความชื้นได้เนื่องจากการผ่าครึ่งจะเพิ่มพื้นที่การระเหยและลด ระยะทางการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในมายังบริเวณผิวจึง ทำให้ความชื้นระเหยออกเห็ดได้รวดเร็วกว่า (Prakotmak et al., 2010; Reyes et al., 2013) ดังนั้นเห็ดที่ผ่าครึ่งชิ้นจึงมีระยะเวลาการ อบแห้งสั้นกว่าเห็ดที่เต็มชิ้นในทุกวิธีการอบแห้ง

### 3.3 สีของเห็ดอบแห้ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าความสว่าง ( $L^*$ ) ความเป็นสีแดง ( $a^*$ ) ความ เป็นสีเหลือง ( $b^*$ ) และโทนสี (Hue angle) ของเห็ดอบแห้ง ที่สภาวะต่างๆ ผลลัพธ์ที่พบคือการเปลี่ยนแปลงสีมากแสดงว่า ผลลัพธ์ที่มีสีน้ำตาลคล้ำมากขึ้นหลังอบแห้งดังนั้นค่า  $L^*$   $b^*$  Hue angle จะลดลง ส่วน  $a^*$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น (Tabtiang et al., 2016) เห็ดสด (Fresh-Shiitake) ก่อนแปรรูปมีสีน้ำตาลอ่อนซึ่งมีค่า  $L^*$   $b^*$  และ Hue angle สูงสุด ส่วน  $a^*$  มีค่าต่ำที่สุด เมื่อนำเห็ดมาผ่าน การอบแห้งด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าเห็ดจะมีค่า  $L^*$   $b^*$  Hue angle ลดลง และค่า  $a^*$  เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ เห็ดสด เห็ดอบแห้งมีค่า  $L^*$   $b^*$  Hue angle ลดลง และค่า  $a^*$  เพิ่มขึ้นเนื่องจากการแปรรูปด้วยความร้อนจะทำให้เกิดปฏิกิริยา สีน้ำตาล (browning reaction) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เห็ดเกิด สีน้ำตาลคล้ำบนผิวมากขึ้นหลังอบแห้ง (Tabtiang et al., 2012; Raikhamh et al., 2015)

เมื่อพิจารณาวิธีการอบแห้ง พบว่าการตากแห้งและการอบแห้ง ด้วยแสงอาทิตย์ให้คุณภาพสีของเห็ดอบแห้งไม่แตกต่างกัน โดยเห็ด อบแห้งทั้งสองกลุ่มมีสีน้ำตาลแก่ จึงทำให้เห็ดทั้งสองกลุ่ม

มีค่าพารามิเตอร์  $L^*$   $b^*$   $a^*$  และ Hue angle ไม่แตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับ ไมโครเวฟทำให้เห็ดมีสีแตกต่างจากเห็ดที่ผ่านการตากแห้งหรือ อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว โดยเห็ดอบแห้งมี สีน้ำตาลแก่ปนสีดำ ดังนั้นเห็ดอบแห้งที่ได้จึงมีค่า  $L^*$   $b^*$  และ Hue angle ต่ำกว่าเห็ดที่ผ่านการตากแห้งหรืออบแห้งด้วยพลังงาน แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ และ  $a^*$  ของเห็ด อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟมีค่าสูงกว่าเห็ด อบแห้งวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

เห็ดอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟมีการ เปลี่ยนแปลงสีมากที่สุดเนื่องจากในขณะพัพฟิงช่วงสุดท้ายด้วย ไมโครเวฟพบว่าอุณหภูมิของเห็ดอบแห้งจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุณหภูมิภายในเห็ดขณะพัพฟิงมีค่าระหว่าง 90-95 °C จึงช่วย เร่งให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลบนผิวของอาหารได้มากและมีรอยไหม้ บางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Maskan et al. (2001) นอกจากนี้ขนาดของเห็ดและรูปแบบการไหลของอากาศ พบว่าไม่ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสีในทุกวิธีการอบแห้ง

เมื่อพิจารณาคุณภาพสีของเห็ดอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งในทุก วิธีพบว่าสีคุณภาพสีที่ดีกว่าเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาด (Com\_Dried\_Shiitake) เห็ดที่วางขายตามท้องตลาดมีสีน้ำตาล ซึ่งแตกต่างจากเห็ดอบแห้งในการทดลองที่มีสีน้ำตาลเข้มเมื่อ อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวและสีน้ำตาลเข้ม แกมสีดำเมื่ออบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพัพฟิงด้วย ไมโครเวฟ ดังนั้นเห็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลองจึงมีค่า  $L^*$   $b^*$  และ Hue angle ต่ำกว่าของเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาด อย่างมีนัยสำคัญ และค่า  $a^*$  ของเห็ดอบแห้งจากการทดลองมีค่าสูง กว่าเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาดอย่างมีนัยสำคัญ เห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาดเกิดสีน้ำตาลน้อยอาจเนื่อง จากผู้ผลิตใช้การพรีทรีทเห็ดสดก่อนอบแห้งเพื่อลดการเกิดปฏิกิริยา สีน้ำตาลบนผิวเห็ดในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ หลังอบแห้งจึงมีคุณภาพสีที่ดีกว่าเห็ดอบแห้งจากการทดลองซึ่งไม่ ผ่านการพรีทรีทก่อนแปรรูป

Table 1 Drying conditions of mushroom processing.

Drying method	Condition description
SD_Shii_Vmax_Full	Forced-air flow drying with solar energy and full size of mushroom
SD_Shii_Vmax_Half	Forced-air flow drying with solar energy and half size of mushroom
SD_Shii_V0_Full	Natural air flow drying with solar energy and full size of mushroom
SD_Shii_V0_Half	Natural air flow drying with solar energy and half size of mushroom
SD_Shii_Shade_Full	Shade drying and full size of mushroom
SD_Shii_Shade_Half	Shade drying and half size of mushroom
SD+MV800_Shii_Full	Forced-air drying with solar energy combined microwave puffing and full size of mushroom
SD+MV800_Shii_Half	Forced-air drying with solar energy combined microwave puffing and half size of mushroom

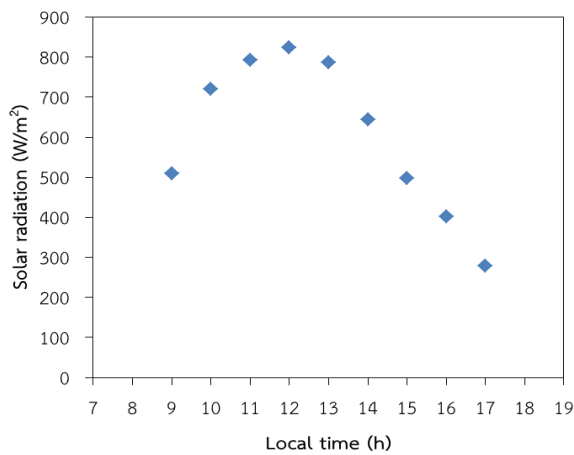


Figure 2 Daily solar radiation changes.

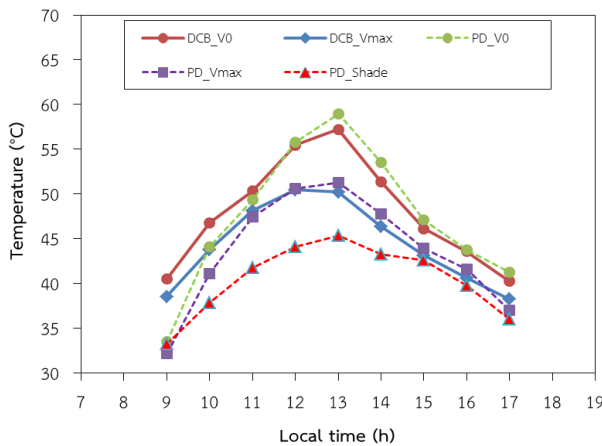


Figure 3 Drying chamber temperature and mushroom product temperature changes.

### 3.4 การหดตัวของเห็ดอบแห้ง

การหดตัว (shrinkage) ของเห็ดที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ ใช้การวัดร้อยละการหดตัวในแนวแกน x y และ z ดังแสดงในตารางที่ 3 วิธีการอบแห้งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการหดตัวของเห็ด เห็ดที่ตากแห้งมีการหดตัวในแกน x y และ z สูงสุด เมื่อ

เปรียบเทียบกับเห็ดที่ผ่านการแปรรูปวิธีอื่นๆ เห็ดตากแห้งมีการหดตัวสูงเนื่องจากขณะตากแห้งพบว่าการลดของความชื้นจากภายในเห็ดจากภายนอกสู่ภายในเนื้อเห็ดต่ำ เมื่อเซลล์ภายในเนื้อเห็ดมีการสูญเสียความชื้นมากขึ้นจะทำให้เซลล์ภายในเห็ดตัวจึงเกิดแรงดึงให้ผิวภายนอกยุบตัวส่งผลให้ปริมาตรเห็ดมีขนาดเล็กลง (Yan et al., 2008)

อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอากาศบังคับและแบบการไหลของอากาศธรรมชาติช่วยให้เห็ดมีการหดตัวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตากแห้ง การหดตัวที่ลดลงเนื่องจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งช่วยเร่งอัตราการระเหยของน้ำในเห็ดให้เร็วขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 ส่งผลให้ผิวหน้าของเห็ดเกิดชั้นผิวแข็ง (case hardening) ซึ่งช่วยคงสภาพและลดการหดตัวของเห็ดในขณะอบแห้ง เมื่อใช้ไมโครเวฟพิพพ์ร่วมกับเครื่องอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์พบว่าเห็ดอบแห้งมีการหดในแนวแกน x y และ z น้อยกว่าการอบแห้งวิธีอื่นๆ โดยร้อยละการหดตัวในแนวแกน x y และ z มีค่าระหว่าง 17.18-18.78 22.72-23.80 และ 32.00-33.94 ตามลำดับ การหดตัวที่ลดลงของเห็ดอบแห้งวิธีนี้เนื่องจากไมโครเวฟช่วยให้ความชื้นในเห็ดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงเกิดการระเหยเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว (Paengkanya et al., 2015) ซึ่งไอน้ำที่เกิดขึ้นมาขณะพิพพ์จะออกแรงดันโครงสร้างภายในของเห็ดให้เกิดการพองขยายขณะพิพพ์ในช่วงสุดท้าย (Varnalis et al., 2001; Hofsetz et al., 2007; Tabtiang et al., 2017)

อย่างไรก็ตามขนาดของเห็ดและลักษณะการไหลของอากาศไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละการหดตัวของเห็ดอบแห้งในทุกวิธีการอบแห้ง เมื่อนำเห็ดอบแห้งที่ได้มาเปรียบเทียบกับเห็ดตัวกับเห็ดที่วางขายตามท้องตลาดพบว่าไม่สามารถเปรียบเทียบได้เนื่องจากทางผู้วิจัยไม่มีข้อมูลขนาดของเห็ดสดก่อนอบแห้งในกรณีเห็ดที่วางขายตามท้องตลาดจึงหาร้อยละการหดตัวไม่ได้

ตารางที่ 4 แสดงร้อยละ void area fraction ของเห็ดอบแห้งที่สภาวะต่างๆ ผลลัพธ์ที่พบคือเห็ดที่มีการหดตัวต่ำจะมี void area fraction สูง (Hofsetz et al., 2007; Tabtiang et al., 2012) เห็ดที่ผ่านการตากแห้งมี void area fraction ต่ำ

ที่สุด เนื่องจากเห็ดมีการหดตัวตามแนวแกน x y และ z มากที่สุด จึงทำให้โครงสร้างภายในยุบตัวมากที่สุด การยุบตัวมากส่งผลให้เห็ดตากแห้งมีรูพรุนน้อย การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดการหดตัวของเห็ดอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับเห็ดตากแห้ง ส่งผลให้โครงสร้างภายในเห็ดมี void area fraction สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ร้อยละ void area fraction ของเห็ดอบแห้งมีค่าสูงสุดเมื่อใช้การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟ โดยเห็ดมีค่าร้อยละ void area fraction ระหว่าง 36.57-38.29% เห็ดอบแห้งด้วยวิธีนี้มีความพรุนตัวสูงสุดเนื่องจากเห็ดมีการหดตัวตามแนวแกนทั้งสามแกนต่ำที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละ void area fraction ระหว่างเห็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลองกับเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาด พบว่าเห็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลองมีค่า void area

fraction ต่ำกว่าเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาด ยกเว้นเห็ดอบแห้งที่ใช้การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟซึ่งมีค่าร้อยละ void area fraction ไม่แตกต่างจากเห็ดวางขายตามท้องตลาดอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความพรุนตัวของเห็ดอบแห้งที่ได้จากวิธีต่างๆ จะส่งผลต่อความสามารถในการคืนตัวของเห็ดอบแห้งซึ่งจะรายงานในหัวข้อถัดไป

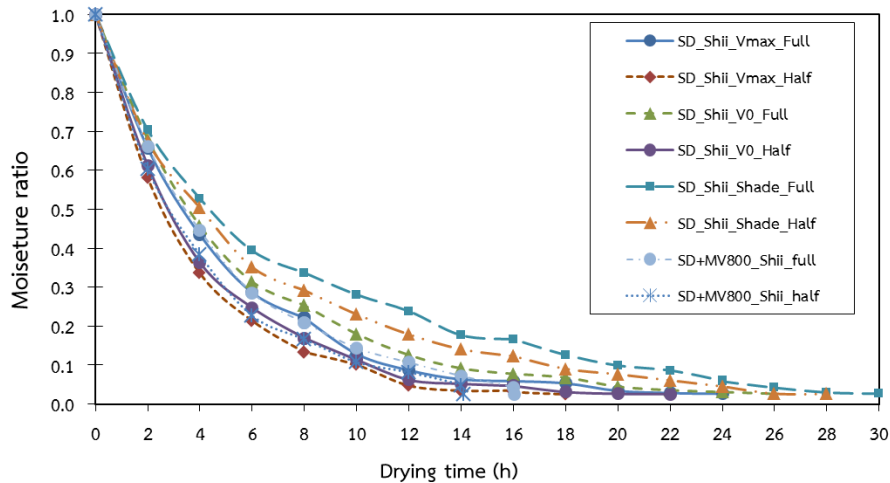


Figure 4 Drying curves of dried mushroom as various drying conditions.

Table 2 Colour parameters of dried mushroom as various drying conditions

Drying Method	L*	a*	b*	Hue angle
Fresh-Shiitake	48.45±1.36 <sup>e</sup>	7.71±0.29 <sup>a</sup>	18.76±0.65 <sup>d</sup>	67.65±1.03 <sup>d</sup>
Com_Dried_Shiitake	41.54±1.91 <sup>d</sup>	8.06±0.27 <sup>b</sup>	17.63±0.23 <sup>c</sup>	65.31±0.73 <sup>c</sup>
SD_Shii_Vmax_Full	35.87±2.08 <sup>bc</sup>	8.79±0.25 <sup>c</sup>	16.83±0.23 <sup>b</sup>	61.89±0.73 <sup>b</sup>
SD_Shii_Vmax_Half	36.64±2.43 <sup>bc</sup>	8.70±0.30 <sup>c</sup>	16.91±0.32 <sup>b</sup>	62.85±0.71 <sup>b</sup>
SD_Shii_V0_Full	34.35±1.88 <sup>bc</sup>	8.98±0.34 <sup>c</sup>	16.51±0.86 <sup>b</sup>	61.44±1.27 <sup>b</sup>
SD_Shii_V0_Half	34.15±1.24 <sup>b</sup>	8.78±0.35 <sup>c</sup>	16.70±0.58 <sup>b</sup>	62.24±0.98 <sup>b</sup>
SD_Shii_Shade_Full	37.52±2.10 <sup>c</sup>	8.68±0.29 <sup>c</sup>	17.05±0.18 <sup>b</sup>	63.02±0.81 <sup>b</sup>
SD_Shii_Shade_Half	37.99±1.42 <sup>c</sup>	8.67±0.38 <sup>c</sup>	16.90±0.26 <sup>b</sup>	63.08±0.76 <sup>b</sup>
SD+MV800_Shii_Full	25.15±1.14 <sup>a</sup>	9.31±0.16 <sup>d</sup>	15.75±0.25 <sup>a</sup>	59.06±0.46 <sup>a</sup>
SD+MV800_Shii_Half	24.94±2.50 <sup>a</sup>	9.36±0.24 <sup>d</sup>	15.38±0.44 <sup>a</sup>	58.67±0.94 <sup>a</sup>

\* Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different ( $p \leq 0.05$ ).

Table 3 Percentage of shrinkage of dried mushroom as various drying conditions.

Drying Method	Shrinkage (%)		
	X	Y	Z
Com_Dried_Shiiitake	N/A	N/A	N/A
SD_Shii_Vmax_Full	26.11±3.16 <sup>b</sup>	33.20±3.25 <sup>b</sup>	39.32±2.36 <sup>b</sup>
SD_Shii_Vmax_Half	27.92±3.10 <sup>bc</sup>	36.13±1.81 <sup>b</sup>	42.05±3.72 <sup>bc</sup>
SD_Shii_V0_Full	28.54±3.93 <sup>bc</sup>	35.27±3.25 <sup>b</sup>	41.08±3.67 <sup>bc</sup>
SD_Shii_V0_Half	30.19±2.73 <sup>c</sup>	36.30±2.78 <sup>b</sup>	42.20±3.44 <sup>c</sup>
SD_Shii_Shade_Full	37.11±2.11 <sup>d</sup>	44.34±3.21 <sup>c</sup>	49.59±2.29 <sup>d</sup>
SD_Shii_Shade_Half	34.15±3.31 <sup>d</sup>	46.02±3.65 <sup>c</sup>	51.51±3.57 <sup>d</sup>
SD+MV800_Shii_Full	17.18±4.28 <sup>a</sup>	22.72±2.13 <sup>a</sup>	32.00±2.95 <sup>a</sup>
SD+MV800_Shii_Half	18.78±3.32 <sup>a</sup>	23.80±3.05 <sup>a</sup>	33.94±2.65 <sup>a</sup>

\*Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different ( $p \leq 0.05$ ).

Table 4 percentage of void area fraction of dried mushroom as various drying conditions.

Drying Method	Void area fraction (%)
Com_Dried_Shiiitake	40.90±2.47 <sup>c</sup>
SD_Shii_Vmax_Full	31.01±2.26 <sup>b</sup>
SD_Shii_Vmax_Half	30.09±3.18 <sup>b</sup>
SD_Shii_V0_Full	28.61±3.03 <sup>b</sup>
SD_Shii_V0_Half	29.15±1.96 <sup>b</sup>
SD_Shii_Shade_Full	22.94±2.32 <sup>a</sup>
SD_Shii_Shade_Half	21.83±2.13 <sup>a</sup>
SD+MV800_Shii_Full	39.27±2.51 <sup>c</sup>
SD+MV800_Shii_Half	37.58±2.67 <sup>c</sup>

\*Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different ( $p \leq 0.05$ ).

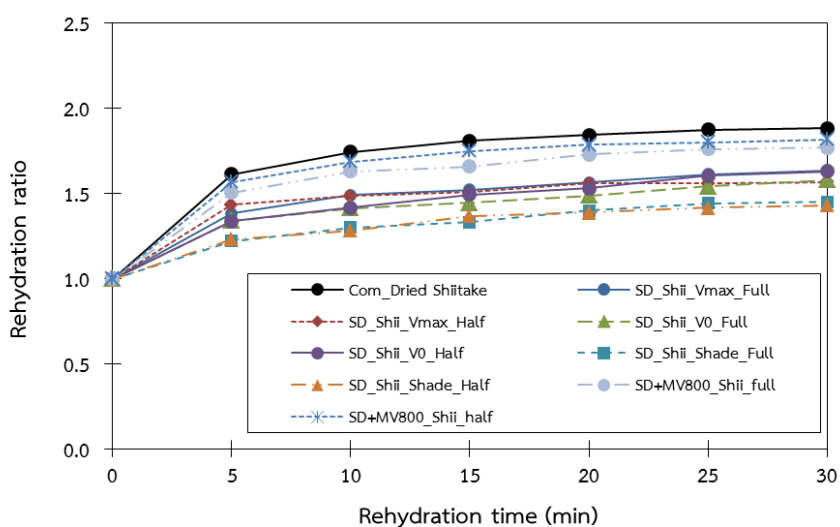


Figure 5 Rehydration ratio of dried mushroom as various drying conditions.



### 3.5 การคืนตัวของเห็ดอบแห้ง

รูปที่ 5 แสดงอัตราส่วนการคืนตัว (rehydration ratio) ของเห็ดอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ ผลผลิตแห้งที่อบแห้งที่มีอัตราส่วนการคืนตัวสูงแสดงว่ามีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มาก (Rewthong, 2011; Wang et al., 2014) วิธีการอบแห้งส่งผลต่อความสามารถในการคืนตัวของเห็ดอบแห้ง เห็ดที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟมีอัตราส่วนการคืนตัวสูงที่สุดในช่วง 0-5 min รองลงมา คือ เห็ดอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และเห็ดตากแห้งตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงเวลา 5-15 min พบว่าอัตราส่วนการคืนตัวของเห็ดที่อบแห้งทุกวิธีมีค่าลดลง และอัตราส่วนการคืนตัวของเห็ดเริ่มคงที่เมื่อเวลาการทดสอบมากกว่า 15 min เห็ดที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าเห็ดที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีอื่นๆ เนื่องจากว่าเห็ดอบแห้งด้วยวิธีนี้มีการหดตัวต่ำที่สุดจึงทำให้โครงสร้างภายในของเห็ดอบแห้งมีความพรุนตัวสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 4 ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้น้ำจากภายนอกแทรกซึมเข้ามาภายในโครงสร้างเห็ดอบแห้งได้มากกว่าเห็ดที่อบแห้งด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับรายงานของ Boualaphanh (2007) และ Rewthong (2011)

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการคืนตัวระหว่างเห็ดอบแห้งที่ได้การทดลองกับเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาด พบว่าเห็ดอบแห้งที่วางขายตามท้องตลาดมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงกว่าเห็ดอบแห้งที่ได้จากการทดลอง ยกเว้นเห็ดอบแห้งที่ผ่านการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟที่อัตราส่วนการคืนตัวใกล้เคียงกับเห็ดที่วางขายตามท้องตลาด อัตราส่วนการคืนตัวที่ใกล้เคียงกันระหว่างเห็ดอบแห้งทั้งสองกลุ่มเนื่องจากเห็ดทั้งสองกลุ่มมีความพรุนตัวใกล้เคียงกันดังแสดงด้วยค่าร้อยละ void area fraction ในตารางที่ 4 จึงส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ใกล้เคียงกัน

### 4 บทสรุป

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไมโครเวฟช่วยลดเวลาการอบแห้งลง เนื่องจากการใช้ไมโครเวฟพัพฟิงในการอบแห้งช่วงสุดท้ายช่วยลดความชื้นในการอบแห้งช่วงสุดท้ายโดยการระเหยน้ำออกจากเห็ดอย่างรวดเร็ว ผลของการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วทำให้เกิดไอน้ำแรงดันสูงกระทำให้เกิดการฟองตัวขึ้นจึงช่วยลดการหดตัวของเห็ดขณะอบแห้ง การหดตัวที่ลดลงช่วยให้เห็ดมีความสามารถในการดูดซับน้ำกลับมากขึ้น ดังนั้นเห็ดอบแห้งด้วยวิธีนี้จึงมีอัตราส่วนการคืนตัวสูงกว่าเห็ดที่อบแห้งวิธีอื่นๆ อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยไมโครเวฟในช่วงสุดท้ายทำให้คุณสมบัติเห็ดเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจึงทำให้เกิดการสีน้ำตาลแก่ปนสีดำซึ่งเป็นสีที่ไม่พึงประสงค์ การไหลของอากาศแบบบังคับและขนาดของเห็ดที่ลดลงช่วยให้ระยะเวลาการอบแห้งสั้นลง

### 5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ตาม “สัญญาเลขที่ Res – CIT0303/2016”

### 6 เอกสารอ้างอิง

- สมชาติ โสภณธณฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Boualaphanh, K. 2007. Banana slice drying using hot air combined with superheated steam. Masters Thesis. Thailand: School of Energy, Environmental and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Devahastin, S. 2012. Drying of Foods and Biomaterials. Bangkok: Top Publishing Company.
- Feng, H., Tang, J. 1998. Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. Journal of Food Science 63, 679-683.
- Hofsetz, K., Lopez, C.C., Hubinger, M.D., Mayor, L., Sereno, A.M. 2007. Change in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air drying. Journal of Food Engineering 83, 531-540.
- Maskan, M. 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering 48, 169-175.
- Mennouche, D., Bouchekima, B., Boubekri, A., Boughari, S., Bouguettaia, H., Bechki, D. 2014. Valorization of rehydrated deglet-nour dates by an experimental investigation of solar drying processing method. Energy Conversion and Management 84, 481-487.
- Paengkanya, S., Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A. 2015. Application of microwaves for drying of durian chips. Food and Bioproducts Processing 96, 1-11.
- Prakotmak, P., Soponronnarit, S., Prachayawarakorn, S. 2010. Modelling of moisture diffusion in pores of banana foam mat using a 2-D stochastic pore network: determination of moisture diffusion coefficient during adsorption process. Journal of Food Engineering 96, 119-126.
- Raikham, C., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A., Soponronnarit, S. 2015. Influence of pretreatments and drying process including fluidized bed puffing on quality attributes and microstructural changes of banana slices. Drying Technology 33, 915-925.

- Rewthong, O. 2011. Effects of pretreatments and drying conditions on qualities of instant rices. Ph.D. dissertation. Thailand: School of Energy, Environmental and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Reyes, A., Mahn, A., Cubillos, F., Huenulaf, P. 2013. Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer. *Energy Conversion and Management* 70, 31-39.
- Tabting, S., Prachayawarakorn, S., Soponronarit, S. 2012. Effects of osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices. *Drying Technology* 30, 20-28.
- Tabting, S., Prachayawarakorn, S., Soponronarit, S. 2016. Optimum condition of producing crisp osmtic banana using superheated steam puffing. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97, 1244-1251.
- Tabting, S., Prachayawarakorn, S. 2017. Effect of banana ripeness and puffing temperature on puffed banana qualities and drying time. *Journal of Agricultural Technology* 13, 281-1292.
- Varnalis, A.I., Brennan J.G., MacDougall, D.B. 2001. A proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. *Journal of Food Engineering* 48, 361-367.
- Venkatesh M.S., Raghavan, G.S.V. 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering* 88, 1-18.
- Wang, H., Zhang, M., Mujumdar, A.S. 2014. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Drying Technology* 32, 1791-1802.
- Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J., Oliveira, F.A.R. 2008. Shrinkage and Porosity of Banana, Pineapple and Mango Slice during Air-Drying. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84, 430-440.