# การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน โดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ

# Durian Chips Drying Using Combined Microwave–Hot Air with Step–Down Microwave Power Input Technique

สุวิทย์ แพงกันยา (Suwit Pangkanya)[1]* ดร.อดิศักดิ์ นาถกรณกุล (Dr.Adisak Nathakaranakule)**
ดร.สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ (Dr.Somchart Soponronnarit)***

## บทคัดย่อ

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยทั่วไปใช้กำลังไมโครเวฟคงที่ตลอดกระบวนการอบแห้ง การอบแห้งด้วยเทคนิคนี้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้ระดับกำลังไมโครเวฟสูงได้ เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ได้รับความเสียหาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน ในด้านจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่น คุณภาพทางด้านสีและเนื้อสัมผัส รวมทั้งความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง จากผลการศึกษาพบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีอัตราการลดของความชื้นมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟที่ช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีค่าความสว่าง ค่าสีเขียว และมีค่าความกรอบมากกว่า แต่มีค่าสีเหลืองและค่าความแข็งต่ำกว่าทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตาม ทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีค่าความสว่างมากกว่า แต่ค่าสีเขียว ค่าสีเหลือง และค่าความกรอบต่ำกว่า แต่ค่าความแข็งไม่แตกต่างกันกับทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟในช่วงแรกของการอบแห้งไม่ส่งผลต่อค่าสี ความแข็ง และความกรอบของตัวอย่างอบแห้ง แต่ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง นอกจากนี้การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่ 800 W เป็นเวลา 1 นาที ตามด้วย 400 W เป็นเวลา 3 นาที แล้วตามด้วย 250 W ร่วมกับลมร้อน 65 °C เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับใช้ผลิตทุเรียนแผ่นอบแห้งไขมันต่ำเพื่อสุขภาพ เนื่องจากให้ความกรอบสูงสุดและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

---

[1] *Correspondent author: suwit-energy@hotmail.com*

** นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*

*** รองศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*

**** ศาสตราจารย์ สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*

## ABSTRACT

Combined microwave-hot air drying with constant and continuous-microwave power technique is commonly applied in the drying process. The disadvantage of this technique is product damages due to heat when using high microwave power. Thus, the objective of this work was to study the effect of a combined microwave-hot air (MWHA) with step down microwave power input technique and a hot air (HA) drying technique on the drying kinetic, qualities of dried product in terms of color, texture and specific energy consumption (SEC) of drying process. The results showed that dried durian chips from the step-down MWHA drying technique provided more drying rate than HA drying led to a shorter drying time. Meanwhile, an increase in the microwave power at the first stage of drying process in the step-down MWHA drying also helped increase drying rate. The step-down MWHA drying provided dried products with more lightness, greenness and crispness values but less yellowness and hardness values than the HA drying. The step-down MWHA drying technique also had lower SEC of drying process than HA drying. In addition, dried durian chips from the step-down MWHA were more lightness but less greenness, yellowness and crispness, but no significantly different in hardness when compared with commercial fried durian chips. Meanwhile, increasing in the microwave power at the first stage of step-down MWHA drying had no effect to the qualities in terms of color, hardness and crispness of dried durian chips but resulted in the decreasing of SEC. Moreover, the step-down MWHA at 800 W for 1 min followed by 400 W for 3 min and 250 W combined with hot air at 65 $^{o}$C was the optimum condition for producing low-fat dried durian chip with the highest crispness and lowest SEC.



**คำสำคัญ:** การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน ความกรอบ ความแข็ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เทคนิคการอบแห้งแบบปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ สี

**Keywords:** Combined microwave-hot air drying, Crispness, Hardness, Specific energy consumption, Step-down microwave power input drying technique, Color


## บทนำ

ทุเรียนเป็นผลไม้ที่ได้รับการยกย่องให้เป็นราชาแห่งผลไม้ เนื่องจากมีรสชาติดีและได้รับความนิยมบริโภค อย่างไรก็ตามทุเรียนเป็นผลไม้ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นและเน่าเสียง่าย ดังนั้นการแปรรูปทุเรียนเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับทุเรียนและยืดอายุในการเก็บรักษา ทุเรียนแผ่นทอดกรอบเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปโดยได้รับความนิยมจากผู้บริโภคโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามทุเรียนแผ่นทอดกรอบมีน้ำมันตกค้างอยู่ในชิ้นผลิตภัณฑ์มาก ทำให้มีอายุการเก็บรักษาสั้นและมักเกิดกลิ่นเหม็นหืนหากเก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสม ทำให้ผู้บริโภคบางส่วนที่ใส่ใจในสุขภาพหลีกเลี่ยง [1-2] นอกจากนี้การบริโภคอาหารที่มีน้ำมันมากอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้และยังอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคอ้วน และความเสี่ยงของโรคความดันโลหิตสูง และโรคหัวใจ เป็นต้น [3]

การอบแห้งเป็นวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์วิธีหนึ่งเพื่อใช้ผลิตอาหารขบเคี้ยวไขมันต่ำ [2] การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปในการแปรรูปอาหาร แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ส่งผลให้อาหารสัมผัสกับความร้อนเป็นเวลานาน ดังนั้นอาหารจึงเกิดสีน้ำตาล

คล้ำ นอกจากนี้อาหารยังมีการหดตัวสูง ส่งผลให้อาหารมีเนื้อสัมผัสแข็ง และความสามารถในการคืนตัวต่ำ [4] ดังนั้นจึงมีการอบแห้งรูปแบบใหม่เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งและประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการอบแห้ง เช่น การอบแห้งแบบแช่แข็งซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี มีความพรุนตัวสูง ทำให้ดูดน้ำกลับคืนได้ดี แต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งสูง [5]

การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเป็นวิธีทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสำหรับแปรรูปวัสดุ การอบแห้งด้วยวิธีนี้มีรูปแบบที่แตกต่างจากการอบแห้งด้วยลมร้อน กล่าวคือคลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อของวัสดุได้โดยตรงจากการดูดซับของน้ำแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วผ่านกลไกการเสียดสีกันของโมเลกุลของน้ำและการชนกันของไอออนภายในเนื้อวัสดุ เนื่องจากผลของการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความชื้นของวัสดุระเหยอย่างรวดเร็ว [6] ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการอบแห้งสูง โครงสร้างภายในของวัสดุเกิดเป็นรูพรุน วัสดุมีความแข็งต่ำ และมีความกรอบสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยทั่วไปใช้กำลังไมโครเวฟคงที่และต่อเนื่องตลอดกระบวนการอบแห้ง เพราะว่าควบคุมการทำงานง่าย แต่เทคนิคนี้มีข้อจำกัดเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟที่ระดับสูง เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุสูงเกินไป ทำให้ผลิตภัณฑ์อบแห้งไหม้ [7]

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดนี้สามารถปรับปรุงได้โดยประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิคการอบแห้งแบบกำหนดการทำงานเป็นช่วงหรือเทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ การอบแห้งแบบกำหนดการทำงานเป็นช่วงสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งได้ เนื่องจากในระหว่างช่วงที่เครื่องอบแห้งหยุดการทำงาน ความชื้นภายในวัสดุจะแพร่ไปสู่บริเวณผิวของวัสดุ และเมื่อมีการอบแห้งต่อไปความชื้นจะระเหยได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูง ประสิทธิภาพพลังงานสูง ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบกำหนดการทำงานคงที่และต่อเนื่อง [4, 8] เนื่องจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า [9] ในขณะที่การใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟอาศัยหลักการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟให้เหมาะสมกับการอบแห้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิของวัสดุไม่ให้สูงเกินไปจนทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย เทคนิคนี้ใช้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับสูงสุดในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอบแห้ง เนื่องจากช่วงนี้วัสดุมีความชื้นสูงทำให้สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มากและความชื้นจะเหยออกจากวัสดุได้มาก หลังจากนั้นจึงปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟลงตามความเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการทำให้วัสดุมีความร้อนเกิน [10] ดังนั้นวิธีนี้จึงใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ประสิทธิภาพพลังงานสูง และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน [11]

จากข้อดีดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนในด้านจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่น คุณภาพของทุเรียนแผ่นอบแห้งทางด้านสีและเนื้อสัมผัส และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

## วัตถุดิบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

### 1. วัตถุดิบ

ทุเรียนดิบพันธุ์หมอนทองจากตลาดไท จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้อยู่ระหว่าง 14-16 $^{o}$Brix นำผลทุเรียนดิบแกะเปลือกเหลือเฉพาะเนื้อและเอาเมล็ดออกแล้วล้างน้ำให้สะอาด จากนั้นหั่นเป็นแผ่นบางให้ได้ความหนา 1.5 mm โดยทุเรียนแผ่นดิบมีความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 197.7-236.6 ฐานแห้ง และอบจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง ความชื้นเริ่มต้นและความชื้นสุดท้ายวิเคราะห์ตามวิธี AOAC (1995) 934.06 [12] การอบแห้งตัวอย่างแต่ละครั้งใช้น้ำหนักประมาณ 61 กรัม

สำหรับอัตราส่วนความชื้นของทุเรียนแผ่น (Moisture ratio; *MR*) หาได้จากสมการ (1)

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

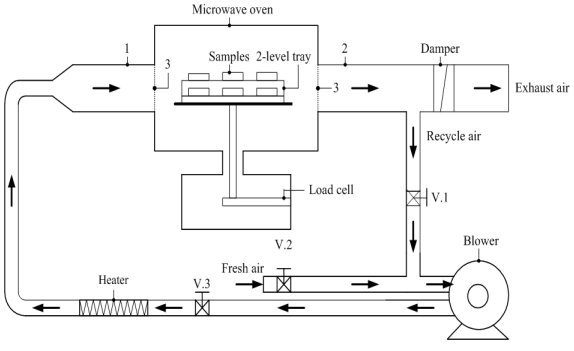
เมื่อ $M_t$ คือ ความชื้นของทุเรียนที่เวลาใด ๆ, kg/kg (ฐานแห้ง)

$M_o$ คือ ความชื้นเริ่มต้นของทุเรียน, kg/kg (ฐานแห้ง)

$M_e$ คือ ความชื้นสมดุลของทุเรียน, kg/kg (ฐานแห้ง) โดยสมมุติให้มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เนื่องจากมีค่าน้อยมาก [13-14]

## 2. อุปกรณ์

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยประกอบด้วยเตาอบไมโครเวฟ (LG Model MS2427BM, Thailand) ที่ผ่านการดัดแปลง กำลังไมโครเวฟเอาท์พุตสูงสุด 800 W ความถี่คลื่นไมโครเวฟ 2,450 MHz และขนาดความจุ 24 ลิตร เครื่องเป่าลม (LDL Model RT 2005, Taiwan) ติดตั้งร่วมกับมอเตอร์ขนาด 0.4 kW และเครื่องผลิตความร้อนขนาด 1 kW




**ภาพที่ 1** เครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 1-ตำแหน่งวัดอุณหภูมิอากาศทางเข้าห้องอบแห้ง 2-ตำแหน่งวัดอุณหภูมิอากาศทางออกห้องอบแห้ง 3-ตะแกรงเหล็กป้องกันคลื่นไมโครเวฟรั่วไหลออกสู่ภายนอก

## 3. วิธีการทดลอง

ก่อนเริ่มต้นการอบแห้งทุกครั้งต้องเปิดเครื่องอบแห้งแบบไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนเพื่ออุ่นอากาศให้ร้อนจนกระทั่งได้อุณหภูมิตามที่กำหนด จากนั้นนำทุเรียนแผ่นดิบที่เตรียมไว้วางเรียงกันไม่ให้ซ้อนทับกันบนถาดแบบสองชั้นซึ่งวางอยู่ภายในห้องอบแห้ง การอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟใช้เงื่อนไขการทดลองที่กำลังไมโครเวฟ 600 700 และ 800 W เป็นเวลา 1 นาที ตามด้วยไมโครเวฟ 400 W เป็นเวลา 3 นาที แล้วตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 250 W อบจนกระทั่งตัวอย่างเหลือความชื้นสุดท้ายร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง โดยอบร่วมกับลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 65 °C ความเร็วลมร้อน 0.3 m/s และใช้อากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 80 อุณหภูมิอากาศอบแห้งปรับตั้งที่ 65 °C โดยใช้ระบบการควบคุมแบบ PID มีความถูกต้อง ±1 °C สำหรับกรณีการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบแห้ง ความเร็วลม และอากาศหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่เดียวกันกับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิอากาศที่บริเวณทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด k และบันทึกลงในเครื่องบันทึก (Supcon, Model R3000, China) อุณหภูมิของวัสดุวัดโดยใช้ fiber optic thermometer (Omega, Model FOB104, Omega Engineering, Canada) มีความถูกต้อง ±0.8 °C น้ำหนักของวัสดุในขณะอบแห้งวัดโดยใช้ Load cell ติดตั้งร่วมกับ Weighing indicator (AD-4329, Korea) มีความถูกต้อง ±1 กรัม โดยบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ความสิ้นเปลืองพลังงานของกระบวนการอบแห้งวัดโดยใช้ Watt-hour meter (Mitsubishi, MF-33E, Thailand)

## 4. การทดสอบคุณภาพด้านสี

สีของทุเรียนแผ่นหลังผ่านการอบแห้งวัดโดยใช้เครื่อง Spectrophotometer (Hunter Lab, Color Flex, UK) และใช้ระบบสีเป็นแบบ CIE L*, a* and b* โดยค่า

L* คือ ความสว่างของวัตถุ (0 ดำ, 100 ขาว) a* คือ ค่าสีแดง/เขียว (+ แดง, - เขียว) และค่า b* คือ ค่าสีเหลือง/น้ำเงิน (+ เหลือง, - น้ำเงิน) ก่อนการวัดสีของตัวอย่างอบแห้งต้องสอบเทียบกับแผ่นสีมาตรฐานทั้งแผ่นสีดำและแผ่นสีขาว

**5. การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส**

สมบัติเนื้อสัมผัสของทุเรียนแผ่นอบแห้งในงานวิจัยนี้พิจารณาจากค่าความแข็งและค่าความกรอบทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture analyzer (Stable Micro System, Model TA.XT.Plus, Surrey, UK) โดยใช้หัวกดชนิดทรงกลมขนาด 5 mm กำหนดให้ความเร็วก่อนกด 10 mm/mm และกดลงบนตัวอย่างด้วยความเร็ว 30 mm/mm ความแข็งของทุเรียนแผ่นอบแห้งได้จากค่าแรงสูงสุด ส่วนความกรอบพิจารณาจากค่าความชันเริ่มต้นและค่าจำนวนยอด โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้เริ่มนับจำนวนยอดตั้งแต่แรง 10 g ขึ้นไป ในแต่ละเงื่อนไขการทดลองใช้ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ 15 ชิ้น

**6. การทดสอบคุณภาพทางด้านวอเตอร์แอคทิวิตี**

ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของทุเรียนแผ่นอบแห้งทดสอบโดยใช้เครื่องวอเตอร์แอคทิวิตี (Novasina, Model LabMaster-aw, Switzerland) โดยก่อนการทดสอบต้องปรับเทียบเครื่องวอเตอร์แอคทิวิตีด้วยสารละลายเกลือมาตรฐานที่มีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีตั้งแต่ 0.529, 0.330 และ 0.113 ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 °C

**7. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ**

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption : SEC) เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพพลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยค่า SEC สามารถคำนวณได้จากสมการ (2)

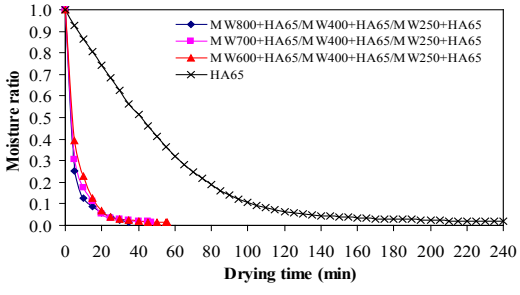
$$SEC = \frac{\text{Total energy consumption of drying process (kJ)}}{\text{Total amount of lost water from durian chips (kg)}} \quad (2)$$

## ผลการทดลองและวิจารณ์

**1. จลนพลศาสตร์ของทุเรียนแผ่นอบแห้ง**

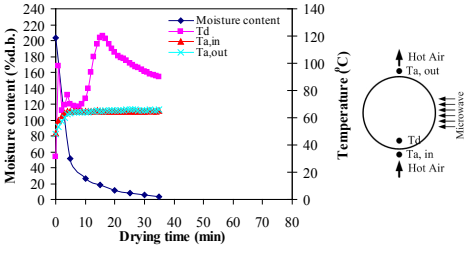
จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดกำลังไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อน แสดงในภาพที่ 2 พบว่า ทุกเงื่อนไขการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุแล้วกำเนิดความร้อนอย่างรวดเร็ว เกิดความดันไอภายในชิ้นวัสดุ ทำให้ความชื้นระเหยออกจากชิ้นวัสดุอย่างรวดเร็ว [15]

ในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟที่ช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ ทำให้อัตราการอบแห้งของทุเรียนแผ่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟสูง เนื้อทุเรียนแผ่นได้รับพลังงานไมโครเวฟมาก ทำให้วัสดุมีอุณหภูมิสูงกว่าการอบแห้งที่กำลังไมโครเวฟที่ต่ำกว่า ทำให้อัตราการถ่ายเทมวลดีขึ้น ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อย [2]

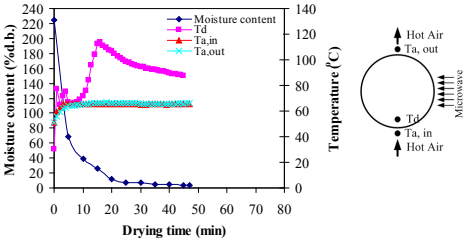



**ภาพที่ 2** อัตราการอบแห้งของทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อน [MW คือ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ 250, 400, 600, 700, 800 คือ กำลังไมโครเวฟ (W) HA คือ การอบแห้งด้วยลมร้อน 65 คือ อุณหภูมิลมร้อน (°C) + คือ การร่วม/คือ ตามด้วย]

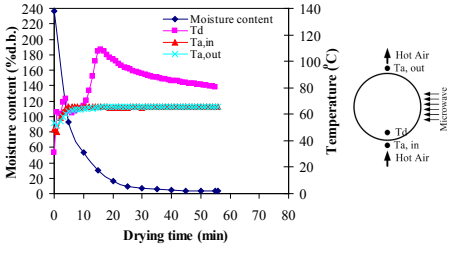
ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงดังภาพที่ 3 – 6 พบว่า อุณหภูมิของทุเรียนแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ในช่วงแรกของการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟ อุณหภูมิของตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากวัสดุมีความชื้นสูง ทำให้สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้มาก หลังจากนั้นอุณหภูมิของตัวอย่างจะลดลงเล็กน้อยเมื่อกำลังไมโครเวฟและความชื้นของตัวอย่างลดลง [16] ทำให้การดูดซับพลังงานไมโครเวฟลดลงในระหว่างช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อย่างไรก็ตามความแปรปรวนของอุณหภูมิของวัสดุในช่วงแรกของการอบแห้ง เนื่องจากอัตราการถ่ายเทมวลภายในเนื้อทุเรียนแผ่นมาที่ผิวมีค่ามากกว่าอัตราการระเหยน้ำจากผิวทุเรียนด้วยอากาศร้อน ดังนั้นจะมีน้ำสะสมที่ผิวทุเรียนในช่วงแรกมาก การระเหยน้ำจากผิวทุเรียนในช่วงนี้จึงเป็นการระบายความร้อนออกจากผิวทุเรียนเปียก ทำให้อุณหภูมิเนื้อทุเรียนลดลงใกล้กับอุณหภูมิลมร้อน



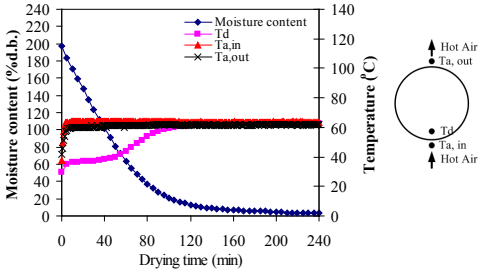

**ภาพที่ 3** การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของทุเรียนแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่ 800 W เป็นเวลา 1 min ตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 400 W เป็นเวลา 3 min และตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 250 W ร่วมกับอุณหภูมิลมร้อน 65°C [$T_{a,in}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้ง $T_{a,out}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออกห้องอบแห้ง $T_d$ คือ อุณหภูมิของทุเรียนแผ่น]




**ภาพที่ 4** การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของทุเรียนแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่ 700 W เป็นเวลา 1 min ตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 400 W เป็นเวลา 3 min และตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 250 W ร่วมกับอุณหภูมิลมร้อน 65°C [$T_{a,in}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้ง $T_{a,out}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออกห้องอบแห้ง $T_d$ คือ อุณหภูมิของทุเรียนแผ่น]




**ภาพที่ 5** การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของทุเรียนแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่ 600 W เป็นเวลา 1 min ตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 400 W เป็นเวลา 3 min และตามด้วยกำลังไมโครเวฟ 250 W ร่วมกับอุณหภูมิลมร้อน 65°C [$T_{a,in}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้ง $T_{a,out}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออกห้องอบแห้ง $T_d$ คือ อุณหภูมิของทุเรียนแผ่น]




**ภาพที่ 6** การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิของทุเรียนแผ่นในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อน 65°C [$T_{a,in}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้ง $T_{a,out}$ คือ อุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออกห้องอบแห้ง $T_d$ คือ อุณหภูมิของทุเรียนแผ่น]

**2. สีของทุเรียนแผ่นอบแห้ง**

สีของทุเรียนแผ่นหลังผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดกำลังไมโครเวฟและการอบแห้งด้วยลมร้อนแสดงในตารางที่ 1 พบว่า สีของทุเรียนแผ่นหลังผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีความสว่างและมีค่าสีเขียว (-a*) มากกว่า แต่มีค่าสีเหลือง (+b*) น้อยกว่าทุเรียนแผ่นหลังการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งนาน ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องมากกว่า ดังนั้นทุเรียนแผ่นอบแห้งจึงมีสีคล้ำกว่า ในขณะที่การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟในช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งไม่ส่งผลต่อค่าสีของทุเรียนแผ่นอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อทุเรียนแผ่นอบแห้งไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบทุเรียนแผ่นอบแห้งกับผลิตภัณฑ์ทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้า พบว่า ทุเรียนแผ่นอบแห้งมีค่าความสว่างมากกว่า แต่มีค่าสีเขียวและค่าสีเหลืองต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้า

**3. เนื้อสัมผัสของทุเรียนแผ่นอบแห้ง**

เนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอคทิวิตีของทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ทุเรียนแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีค่าความแข็งต่ำกว่า แต่มีค่าความชันเริ่มต้นและค่าจำนวนยอดมากกว่าทุเรียนแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน อาจเป็นเพราะว่าโครงสร้างภายในวัสดุเกิดเป็นรูพรุนในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟที่ช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟไม่ส่งผลต่อสมบัติเนื้อสัมผัสของทุเรียนแผ่นอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นเพราะว่าใช้เวลาในการอบแห้งไม่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามทุเรียนแผ่นที่ผ่านการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลด ระดับกำลังไมโครเวฟมีค่าความกรอบต่ำกว่า แต่มีค่าความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้า ในขณะที่ทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อนมีค่าความแข็งมากกว่า แต่ค่าความกรอบต่ำกว่าทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้า นอกจากนี้ยังพบว่าทุเรียนแผ่นอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองและทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้ามีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำกว่า 0.4 ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2317-2549 [17] แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้

**4. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ**

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง แสดงในตารางที่ 3 พบว่า วิธีการอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งทั้งในส่วนของการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ในขณะที่การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟที่ช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะทั้งการใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าลดลง อย่างไรก็ตามความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในส่วนของการใช้พลังงานความร้อนสามารถลดลงได้หากมีการประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียน

**ตารางที่ 1** สีของทุเรียนแผ่นอบแห้ง

| Drying method | L* | a* | b* | Drying time (min) |
|---|---|---|---|---|
| MW800/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 80.14±1.45$^{c}$ | -3.04±0.44$^{c}$ | 24.20±2.00$^{a}$ | 35 |
| MW700/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 80.28±1.20$^{c}$ | -3.38±0.54$^{bc}$ | 24.12±3.09$^{a}$ | 47 |
| MW600/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 80.36±1.19$^{c}$ | -3.55±0.24$^{b}$ | 23.63±1.61$^{a}$ | 56 |
| HA65 | 74.46±1.94$^{b}$ | -2.19±0.15$^{d}$ | 28.25±1.99$^{b}$ | 240 |
| Commercial fried durian chip | 62.74±1.52$^{a}$ | -6.42±0.97$^{a}$ | 40.25±1.83$^{c}$ | - |

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

**ตารางที่ 2** เนื้อสัมผัสและวอเตอร์แอคทิวิตีของทุเรียนแผ่นอบแห้ง

| Drying method | Hardness (N) | Number of peaks | Initial slope (N/mm) | Water activity |
|---|---|---|---|---|
| MW800/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 5.49±1.14$^{a}$ | 6.40±0.63$^{bc}$ | 24.92±2.04$^{c}$ | 0.339±0.002$^{ab}$ |
| MW700/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 5.85±1.07$^{a}$ | 5.93±1.38$^{b}$ | 22.97±2.38$^{b}$ | 0.380±0.004$^{d}$ |
| MW600/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 6.23±1.46$^{a}$ | 5.40±1.51$^{b}$ | 21.98±1.71$^{b}$ | 0.370±0.001$^{c}$ |
| HA65 | 8.13±0.82$^{b}$ | 3.63±1.21$^{a}$ | 11.27±2.83$^{a}$ | 0.334±0.005$^{a}$ |
| Commercial fried durian chip | 6.25±1.27$^{a}$ | 7.20±1.32$^{c}$ | 28.40±2.95$^{d}$ | 0.343±0.006$^{b}$ |

ตัวอักษรยกที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความซื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

*ทุเรียนแผ่นอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 3.5 ฐานแห้ง

**ตารางที่ 3** ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้ง

| Drying method | Drying time (min) | Water evaporated (kg) | SEC (MJ/kg water evaporated) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Blower | Heater | Microwave | Total | |
| | | | | | | Heat | Electricity |
| MW800/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 35 | 0.0405 | 6.79 | 21.33 | 22.22 | 21.33 | 29.01 |
| MW700/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 47 | 0.0419 | 8.82 | 28.35 | 25.78 | 28.35 | 34.59 |
| MW600/HA65+MW400/HA65+MW250/HA65 | 56 | 0.0430 | 10.24 | 31.81 | 30.14 | 31.81 | 40.38 |
| HA65 | 240 | 0.0400 | 46.80 | 144.00 | - | 144.00 | 46.80 |

## สรุป

ผลการศึกษาการอบแห้งทุเรียนแผ่นด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน พบว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีอัตราการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า และส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะรวมต่ำกว่าอีกด้วย ในขณะที่การเพิ่มกำลังไมโครเวฟที่ช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของกระบวนการอบแห้งลดลง ทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคการปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟมีค่าความสว่าง ค่าสีเขียว และค่าความกรอบมากกว่า แต่มีค่าสีเหลืองและค่าความแข็งต่ำกว่าทุเรียนแผ่นอบแห้งด้วยลมร้อน และยังมีค่าความสว่างมากกว่า แต่มีค่าสีเขียว ค่าสีเหลือง และความกรอบต่ำกว่า แต่ค่าความแข็งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับทุเรียนแผ่นทอดกรอบจากการค้า ในขณะที่การเพิ่มระดับกำลังไมโครเวฟที่ช่วงแรกของกระบวนการอบแห้งไม่ส่งผลต่อคุณภาพของทุเรียนแผ่นอบแห้งทางด้านสี และเนื้อสัมผัส

สำหรับเงื่อนไขที่แนะนำในการผลิตทุเรียนแผ่นอบแห้งไขมันต่ำเพื่อสุขภาพคือ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อนโดยใช้เทคนิคปรับลดระดับกำลังไมโครเวฟที่ 800 W เป็นเวลา 1 นาที ตามด้วย 400 W เป็นเวลา 3 นาที แล้วตามด้วย 250 W ร่วมกับลมร้อน 65 $^{o}$C เนื่องจากให้ความกรอบสูงสุด ในขณะที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

อย่างไรก็ตามคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านสีอาจปรับปรุงเพิ่มเติมได้โดยการใช้สารป้องกันการเกิดสีน้ำตาลในตัวอย่างก่อนอบแห้ง ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานในเทอมของพลังงานความร้อนสามารถลดลงได้อีกหากประยุกต์ใช้พลังงานหมุนเวียน

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประเทศไทย

## เอกสารอ้างอิง

1. Jamradloedluk J, Natharkaranakule A, Soponronnarit S, Prachayarawarakorn S. Influences of drying medium and temperature on drying kinetics and quality attributes of durian chip. Journal of Food Engineering. 2007; 104: 114-122.
2. Bai-Ngew S, Therdthai N, Dhamvithee P. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. Journal of Food Engineering. 2011; 104: 114-122.
3. Raikham C, Prachayawarakorn S, Nathakaranakule A, Soponronnarit S. Optimum conditions of fluidized bed puffing for producing crispy banana. Drying Technology. 2013; 31: 726-739.
4. Zhao D, An K, Ding S, Liu L, Xu Z, Wang Z. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: drying kinetics and physical quality. Food Bioprocess Technology. 2014; 7: 2308-2318.
5. Giri SK, Prasad S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. Journal of Food Engineering. 2007; 78: 512-521.
6. Alibas I. Microwave, air and combined microwave-air drying parameters of pumpkin slices. LWT-Food Science and Technology. 2007; 40: 1445-1451.
7. Ahrné LM, Pereira NR, Staack N, Floberg P. Microwave convective drying of plant foods at constant and variable microwave power. Drying Technology. 2007; 25: 1149-1153.

8. Soysal Y, Ayhan Z, EŞtŨrk O, Arıkan MF. Intermittent microwave-convective drying of red pepper: drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. Biosystems Engineering. 2009; 103: 455-463.
9. Jangam SV. An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. Drying Technology. 2011; 29: 1343-1357.
10. Mousa N, Farid M. Microwave vacuum drying of banana slices. Drying Technology. 2002; 20: 2055-2066.
11. Varith J, Dijkanarukkul P, Achariyaviriya A, Achariyaviriya S. Combined microwave-hot air drying of peeled longan. Journal of Food Engineering. 2007; 81: 459-468.
12. Association of Official Analytical Chemists Official Methods of Analysis of the AOAC International. 16th ed. Gaithersburg, MD: [n.p.]; 1995.
13. Maskan M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. Journal of Food Engineering. 2000; 44: 71-78.
14. Alibas I. Characteristics of chard leaves during microwave, convective, and combined microwave-convective drying. Drying Technology. 2006; 24: 1425-1435.
15. Clary CD, Mejia-Meza E, Wang S, Oliveira FAR. Improving grape quality using microwave vacuum drying associated with temperature control. Journal of Food Science. 2007; 72: E23-E28.
16. Vongpradubchai S, Rattanadecho P. Microwave and hot air drying of wood using a rectangular waveguide. Drying Technology. 2011; 29: 451-460.
17. Thai Industrial Standards Institute. TISI Standards (TIS 2317-2549), Durian Chips. Bangkok: Ministry of Industry; 2006.