
การอบแห้งขนุนด้วยพลังงานความร้อนร่วมของรังสีอินฟราเรด/ไมโครเวฟ และลมร้อน : จลนพลศาสตร์
คุณภาพและการทดสอบประสาทสัมผัส

Combined Infrared/Microwave and Hot Air Drying for Jackfruit: Kinetics,
Quality and Sensory Analysis

สุภวรรณ ฐิระวณิชกุล¹, สากีนา ลาแมปะ², ยุตธนา ฐิระวณิชกุล^{3*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, ^{1,3}สถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

^{2,3}ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลาสมาและพลังงาน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Supawan Tirawanichakul¹, Sakena Lamaepae², Yutthana Tirawanichakul^{3*}

^{1,3}Energy Technology Research Center (ETRC)

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering Prince of Songkla University.

^{2,3}Plasma and Energy Technology Research Laboratory, Department of Physics, Faculty of Science,
Prince of Songkla University.

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปัจจัยของสภาวะในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์ และคุณภาพของขนุนแห้งสายพันธุ์ทองประเสริฐ ด้วยสภาวะการทดลองอบแห้งที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข ได้แก่ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดและลมร้อน การอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วย ไมโครเวฟและลมร้อน และสุดท้ายคือการอบแห้งด้วยลมร้อนอย่างเดียว โดยในทุกการทดลองที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดจะใช้กำลังเท่ากับ 1,000 W และกำลังของไมโครเวฟที่ 90 W (โดยใช้เวลาอบแห้ง 3 นาที) สำหรับกรณีที่ใช้ลมร้อนจะใช้ความเร็วของอากาศเท่ากับ 1.1 m/s และทุกเงื่อนไขของการอบแห้ง จะทดลองอบแห้งขนุนในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C โดยมีค่าความชื้นเริ่มต้นของขนุนอยู่ในช่วง 300-400% dry-basis (d.b.) และอบแห้งจนค่าความชื้นสุดท้ายของขนุนอยู่ในช่วง 12-19% dry-basis จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งขนุนขึ้นกับอุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่าง สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางของขนุน พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งขนุนแบบชั้นบางโดยใช้สมการแบบ Logarithmic, Approximation of Diffusion และ Modified Page สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนได้เป็นอย่างดี ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแหล่งพลังงานที่ใช้ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่นๆ นอกจากนี้ พบว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำที่สูงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่ากรณีการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ การหดตัว สี และความยอมรับในการบริโภค พบว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำสูงขึ้น ค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงสีรวม (ΔE^*) เพิ่มขึ้น ในทางตรงข้าม พบว่า ค่าความเป็นสีแดง (a*) และการหดตัวมีค่าลดลง นอกจากนี้ การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการชิมและความยอมรับได้ในการบริโภคในแต่ละสภาวะอบแห้ง พบว่าขนุนอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิต่ำ (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และร้อยละของการหดตัวของผลิตภัณฑ์

คำสำคัญ : จลนพลศาสตร์ การแผ่รังสีอินฟราเรด ขนุน ไมโครเวฟ คุณภาพ

*Corresponding author. E-mail: yutthana.t@psu.ac.th

The main objective of this research was to study effect of drying conditions on kinetics and quality of Thong-Prasert jackfruit. Four different drying conditions were carried on using Infrared (IR) drying, combined infrared and hot air (HA) drying, two-stage drying with microwave (MW) and HA and finally, HA heating. Power of IR radiation for all drying conditions was fixed at 1,000 W and power for MW radiation was fixed at 90 W (by operating period of 3 min). The hot air velocity for all experiment was fixed at 1.1 m/s. All drying conditions was run under the conditions of drying temperature between 40 and 60°C. The initial moisture content was in range between 300 and 400% dry-basis (d.b.). After drying the final moisture content of dried jackfruit was varied between 12 and 19% dry-basis. The results stated that drying rate of sample relatively depend on drying temperature compared to initial moisture content of sample. For determination of thin-layer drying kinetics, results showed that using Logarithmic, Approximation of Diffusion and Modified Page model have a good relation to the experimental drying results using IR, Combined IR-HA and two stages of MW-HA drying, respectively. For evaluating of heat sources of drying, the results showed that IR drying rate is higher than drying with IR-HA, HA and MW-HA heat sources. Moreover, the specific energy consumption for drying with high temperature was relatively low correlated to short period of drying and drying rate. Finally, quality analysis of dried jackfruit showed that percentage of shrinkage, lightness (L^*), yellowness value (b^*) and the total color difference (ΔE^*) increased with increase of drying temperature. In the other hand side, the redness value and percentage of shrinkage slightly decreased when drying temperature increased. Moreover, the sensory evaluation and total acceptability of dried jackfruit in each drying condition was insignificantly different and was not affected by drying temperature ($p < 0.05$).

Keyword : Drying kinetics, Infrared radiation, Jackfruit, Microwave, quality

บทนำ

ขนุน (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) เป็นผลไม้ที่มีผลผลิตออกตลอดปี ปลูกง่าย เติบโตเร็ว นิยมรับประทานโดยทั่วไป เนื้อขนุนเป็นผลไม้ที่ให้พลังงานสูงเพราะมีคาร์โบไฮเดรตและน้ำตาล ในปริมาณสูง และยังประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ หลายชนิด เช่น แคลเซียม วิตามินซี วิตามินเอ วิตามินบี 1 และ วิตามินบี 2 เป็นต้น (ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ, 2544) อย่างไรก็ตาม ขนุนสุกไม่สามารถเก็บได้เป็นระยะเวลานาน เพราะขนุนจะเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวผลขนุน จึงเป็นเรื่องสำคัญ ซึ่งการอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นของ วัสดุอาหาร ธัญพืช และผลไม้ที่น่าสนใจ เพราะนอกจากสามารถนำมาใช้ในการถนอมวัสดุแล้ว ยังช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถนำผลิตภัณฑ์ มาจัดจำหน่ายในช่วงที่มีราคาดี แม้ว่าเทคโนโลยีการอบแห้งไม่ลับ ซับซ้อน แต่การวางแผนการดำเนินการอบแห้งภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องศึกษา ซึ่งรวมไปถึงการพิจารณา เลือกใช้พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, 2540) เช่น การอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่างๆ ได้แก่ ลมร้อน รังสีอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละแหล่งพลังงาน ความร้อนมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน ในปัจจุบันการอบแห้ง โดยอาศัยการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ลดความชื้น ของวัสดุ เริ่มมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในงานวิศวกรรมอาหาร (ศิริประภา คลังทอง และศิริวิไล อนุกุลประชา, 2546; Alibas *et al.*, 2007; Tirawanichakul *et al.*, 2008; Kathiravan *et al.*, 2008; Nathakaranakule *et al.*, 2010). การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรด เป็นการแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่าน ความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดจากแหล่งพลังงานความร้อนมาตก กระทบลงบนผิวของวัสดุ แล้วรังสีทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุ ทำให้ พลังงานส่วนหนึ่งของการแผ่รังสีถูกวัสดุดูดกลืนเอาไว้ และทำให้ โมเลกุลของวัสดุเกิดการสั่นสะเทือนแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนขึ้นในวัสดุ ดังนั้นน้ำที่อยู่ในโมเลกุลก็จะได้รับความร้อน และ เกิดการแพร่ไปยังบริเวณผิวของวัสดุ ช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี (Tulasidas *et al.*, 1995; Sharma *et al.*, 2005; Soponronnarit *et al.*, 2006; Varith *et al.*, 2007; Kathiravan *et al.*, 2008; Nathakaranakule *et al.*, 2010) นอกจากนี้มีการอบแห้งด้วยเทคนิคความดันต่ำกว่าบรรยากาศที่สามารถอบแห้งได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ (Artnaseaw *et al.*, 2010) การอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟ เป็นเทคนิคการอบแห้งที่มัก จะใช้ร่วมกับการพาความร้อน แบบอื่นๆ (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์,

2540; Alibas *et al.*, 2007) การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟ ในการอบแห้งมีประโยชน์หลายประการ ทั้งการลดระยะเวลาการ อบแห้ง การกระจายพลังงานในเนื้อวัสดุเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอทั้งด้านความชื้น สี และคุณภาพ ลดการสูญเสียของส่วนประกอบที่ละลายน้ำในวัสดุ และช่วยในการ ประหยัดพลังงาน (ศิริประภา คลังทอง และศิริวิไล อนุกุลประชา, 2546)

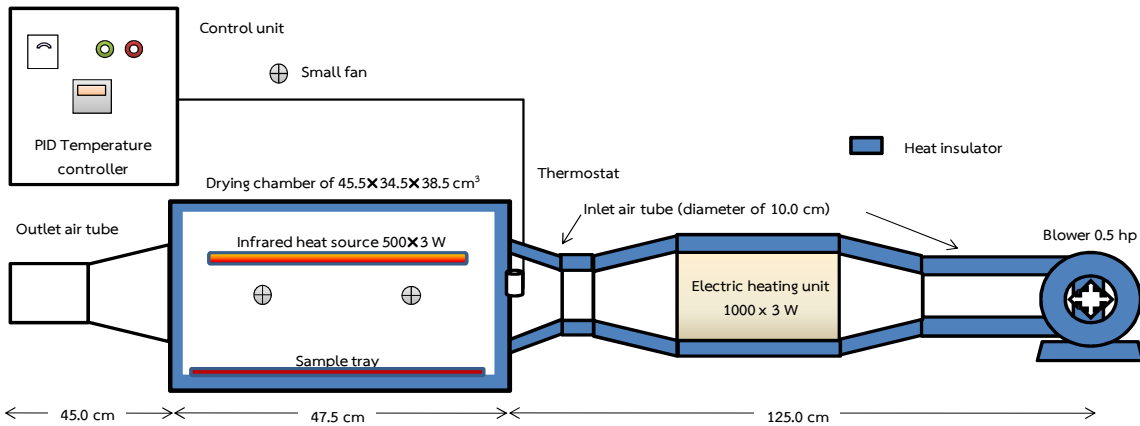
ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาปัจจัยของ สภาวะในการอบแห้งต่อจลนพลศาสตร์ และคุณภาพภายหลัง การอบแห้งของขนุน คุณภาพที่ศึกษาได้แก่ การหดตัว สี การทดสอบทางประสาทสัมผัส และความชื้นเปลือกพลังงาน จำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง โดยมีเป้าหมายของงานวิจัย คือ ได้ ผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งที่มีความชื้นร้อยละ 12-19 มาตรฐานแห้ง มีสีเหลืองสวยงาม ไม่ไหม้หรือแห้งชืด และไม่แตกหักงอ และ เมื่อทดสอบประสาทสัมผัสแล้วอยู่ในเกณฑ์ที่ความยอมรับได้ในการบริโภค ไม่ควรต่ำกว่าระดับชอบปานกลาง

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

วัสดุและอุปกรณ์

เนื้อขนุนพันธุ์ทองประเสริฐ ซึ่งจากห้างสรรพสินค้าใน อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา นำมาหั่นชิ้นตามขวาง หยาบชิ้นละ ประมาณ 2.5 ± 0.5 mm และส่มตัวอย่างขนุนไปหาค่าความชื้น เริ่มต้นตามมาตรฐาน AOAC (AOAC, 1995)

เครื่องอบแห้งแบบพลังงานผสมผสานสามารถดำเนินการ อบแห้งได้ 3 แบบ ได้แก่ การอบแห้งด้วยลมร้อน รังสีอินฟราเรด และรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน แสดงดังภาพที่ 1 ห้องอบแห้ง ขนาด $61 \times 48 \times 53$ cm³ ภายในห้องอบแห้งมีหลอดรังสีอินฟราเรด ขนาด 500 W 3 หลอด ถาดที่ใช้ในการอบแห้งมีขนาด 41.5×47.5 cm² สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน จะใช้ลดลดความร้อนไฟฟ้า ขนาด $1,000 \times 3$ W เพื่ออุ่นอากาศให้ร้อนก่อนเข้าห้องอบแห้ง และเป่าเข้าห้องอบแห้งด้วยพัดลมใบพัดโค้งหน้า ขนาด 200 W 0.5 แรงม้า (DAICHI Co. Ltd.) และค่าพลังงานไฟฟ้าจะบันทึก จากวัดต์ฮาวมิเตอร์ (MITSUBISHI Co. Ltd.) ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง ต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง อุณหภูมิแวดล้อม และ อุณหภูมิกระแสเป่าของอากาศแวดล้อม โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ต่อไปยังเครื่องบันทึกสัญญาณเวลา (Data logger) ซึ่งมีค่าความละเอียด $\pm 0.5^\circ\text{C}$ เครื่องไมโครเวฟ (LG Co. Ltd. Model MS 2127 CW) ขนาดความจุ 21 L ใช้กำลังไฟฟ้าขาเข้า (ขาออก) เท่ากับ 1,200 (800) W ตามลำดับ โดยห้องอบแห้งมีขนาด



ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบถาดพลังงานความร้อนผสมผสาน [PSU-IRD1]

(กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ 45.5×34.5×38.5 cm³ สำหรับมวลของวัสดุ เครื่องชั่งน้ำหนัก (ยี่ห้อ Sartorius) ค่าความละเอียด ± 0.01 g

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนและสถานะในการอบแห้งขนุน

1) ขั้นตอน และสถานะการทดลอง แสดงในรูปแผนภาพ ภาพที่ 2

2) ทำการบันทึก น้ำหนักของขนุนกับเวลา อุณหภูมิที่ ตำแหน่งต่างๆ ภายในตู้อบแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะแห้ง-เปียก (เก็บข้อมูลทุก 15 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บข้อมูลทุก 30 นาที จนสิ้นสุดการทดลอง) การชั่งน้ำหนักของตัวอย่างขนุน จะนำออกมาจากห้องอบแห้งมาชั่งทั้งถาดอบแห้งโดยขั้นตอน การนำมาชั่งและเก็บเข้าตู้อบใช้เวลาไม่เกิน 30 วินาที

จลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้น

การคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้น ของขนุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$MR = \text{Moisture ratio} = (M_t - M_{eq}) / (M_i - M_{eq}) \quad (1)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, M_i คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (% dry-basis), M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุ (% dry-basis) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (% dry-basis)

การคำนวณหาอัตราการอบแห้ง ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพเครื่องอบแห้ง

จากข้อมูลผลการทดลอง ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ระยะเวลาอบแห้ง ปริมาณความชื้นที่นำออกจากเนื้อวัสดุ สามารถ คำนวณหาอัตราการอบแห้งของขนุนได้ โดยเป็นอัตราส่วนของ ปริมาณความชื้นที่นำออกจากเนื้อวัสดุต่อระยะเวลาอบแห้ง (สมการที่ (2)) ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในหน่วยเมกะจูลต่อกิโลกรัมของน้ำที่ระเหย (MJ /kg of water evaporated)

ที่ใช้ในการอบแห้งขนุน คำนวณตามสมการที่ (3) และการวิเคราะห์ ประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งจากอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (Specific moisture extraction rate, SMER) ตามสมการที่ (4) (Tirawanichakul et al., 2008) ดังนี้

$$\text{Drying rate} = (M_i - M_f) W_d / t \quad (2)$$

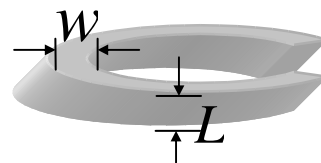
$$\text{SEC} = 3.6 E_p / (M_i - M_f) W_d \quad (3)$$

$$\text{SMER} = (M_i - M_f) W_d / E_p \quad (4)$$

โดยที่ M_i , M_f คือ ความชื้นเริ่มต้นและสุดท้ายของวัสดุ (% dry-basis), W_d คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg), t คือ ระยะเวลาในการอบแห้ง (h), E_p คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ (kW-h) และ 3.6 คือ ตัวเลข แปลงหน่วยของพลังงาน (MJ/kg of water evaporated) (1 kW-h = 3,600 kW-s หรือ 3,600 kJ)

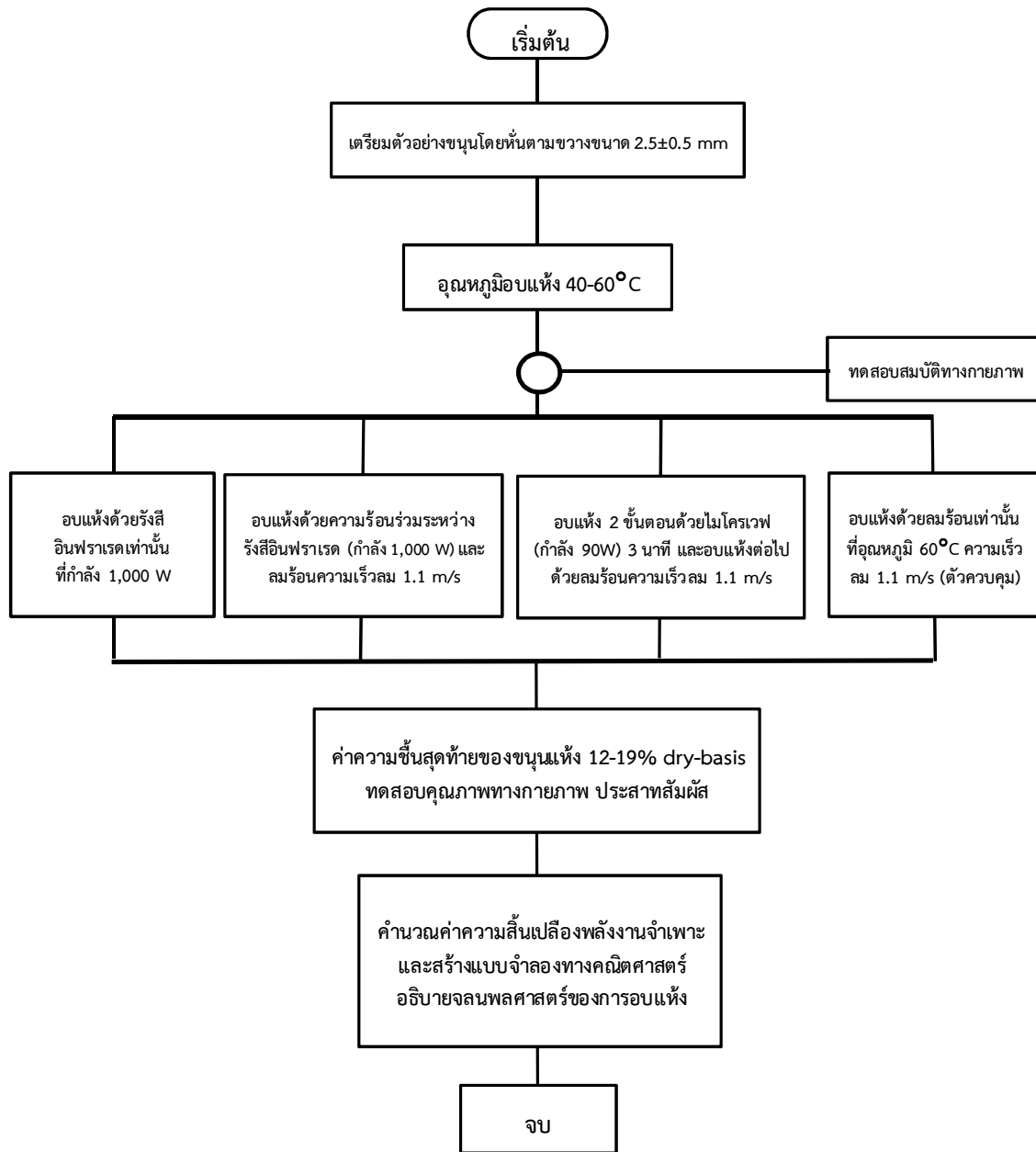
การวิเคราะห์คุณภาพขนุนหลังการอบแห้ง

ก. การทดสอบการหดตัว : วัดการหดตัวของขนุนอบแห้ง ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยทำการวัดด้านความกว้าง (W) และความหนา (L) อย่างน้อย 5 ตำแหน่งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง และสุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้น ตัวอย่างตำแหน่งการวัดบนชิ้นขนุน แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความกว้างและความหนาของชิ้นขนุนแผ่นบาง

ข. การทดสอบคุณภาพด้านสี : ทำการวัดสีขนุนอบแห้ง ด้วยเครื่องวัดสีอาหาร Hunter Lab รุ่น Color Flex ค่าสีที่วัดได้ ใช้หน่วยระบบสี CIE (L*, a* และ b*) โดยค่าสีของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 2 แผนภาพการดำเนินการทดลองอบแห้งขึ้นขนุนสดภายใต้เงื่อนไขอบแห้งต่างๆ

ขนุนอบแห้งแสดงในเทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* โดยที่ค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ค่าความเป็นสีแดง (Redness, a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness, b^*) โดยค่าบวกลบหมายถึงความสว่าง มีสีแดงและมีความเป็นสีเหลือง ตามลำดับ ขณะที่ค่า L^* , a^* และ b^* มีค่าลบ หมายถึง ค่าความมืด มีความเป็นสีเขียว และมีความเป็นสีน้ำเงิน ตามลำดับ (ภคินัย ทองทีอัมพร, 2550) สำหรับการหาค่า L^* , a^* และ b^* ของขนุนอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง จะทำการวัดสีตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

ค. การทดสอบทางประสาทสัมผัส : การประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบตามสเกลฮีโดนิค (Hedonic scale) ตั้งแต่ค่า 1 ถึง 9 คะแนน (1 หมายถึง ความไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึง ความชอบมากที่สุด) โดยการทดสอบด้วยประสาทสัมผัสนี้ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน 25-30 คน และเลือกลักษณะเฉพาะที่ใช้ประเมินได้แก่ สี กลิ่น ความหวาน เนื้อสัมผัส และการยอมรับได้โดยรวมของขนุนอบแห้ง จากนั้นนำข้อมูลลักษณะเฉพาะที่ได้มา

ความสัมพันธ์ของข้อมูลลักษณะเฉพาะกับเงื่อนไขต่างๆ ในการอบแห้งด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

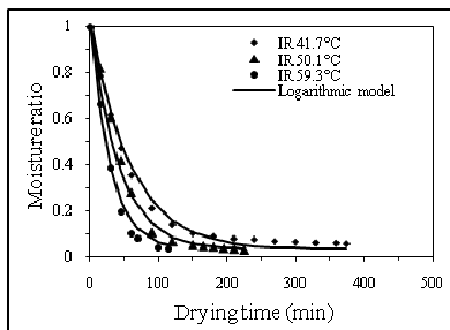
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จลนพลศาสตร์การอบแห้งขนุน

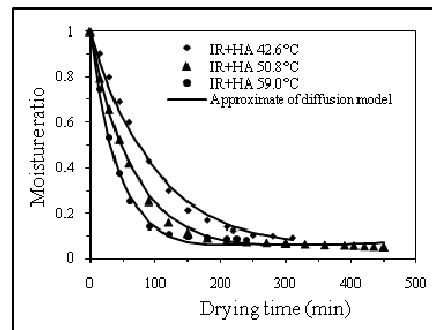
ภาพที่ 4 แสดงอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงระยะเวลาอบแห้ง ที่สภาวะต่างๆ พบว่า การอบแห้งขนุนเป็นการอบแห้งแบบอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น กล่าวคือ ปริมาณความชื้นในเนื้อขนุนมีการถ่ายเทออกจากเนื้อขนุนอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงต้นของการทดลอง ทำให้อัตราการอบแห้งไม่คงที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยสมการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัล (ภาพที่ 4) จากกราฟรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งนั้น อัตราส่วนความชื้นในเนื้อขนุนจะลดลงอย่างรวดเร็ว (เนื่องจากขนุนมีความชื้นสูง) ทำให้การถ่ายเทมวลของน้ำจากภายในเนื้อขนุนไปยังผิวหน้าเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว และเมื่อระยะเวลาอบแห้งยาวนานขึ้น ความชื้นบริเวณผิวและภายใน

ของเนื้อขนุนจะมีความชื้นต่ำลง อัตราการถ่ายเทมวลของน้ำจากเนื้อขนุนไปยังผิวหน้าจะลดลงอย่างช้า ๆ ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยการอบแห้งวัสดุอาหารและผลไม้ทั้งหลายๆ งานวิจัยที่ผ่านมา (จารุวรรณ กุลวิศวะ และคณะ, 2550; สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2540; Achaviriya & Soponronnarit, 1990; Tirawanichakul & Tirawanichakul, 2008; Tirawanichakul *et al.*, 2008) กล่าวคือ อัตราการลดลงของความชื้นในช่วงเวลาอบแห้ง จะมีความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้นกับเวลาอบแห้ง และสามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียล

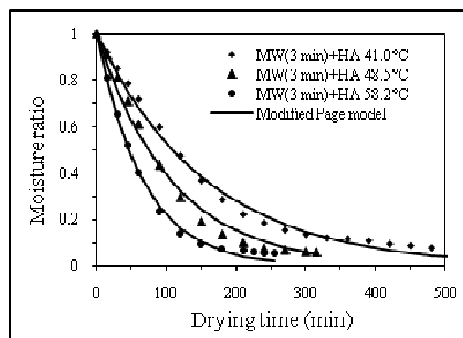
จากการเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยสภาวะการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิ 40-60°C ทั้งกรณีการอบแห้งแบบ 1 ขั้นตอน และแบบ 2 ขั้นตอน (ไมโครเวฟ 90 W, 3 min และอบแห้งต่อด้วยลมร้อน) ทุกสภาวะการทดลอง พบว่าปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง และการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นระยะเวลาในการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้งสูงจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งในช่วงอุณหภูมิต่ำในทุกแหล่งพลังงานความร้อน (ภาพที่ 4)



(ก) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดอย่างเดี่ยว

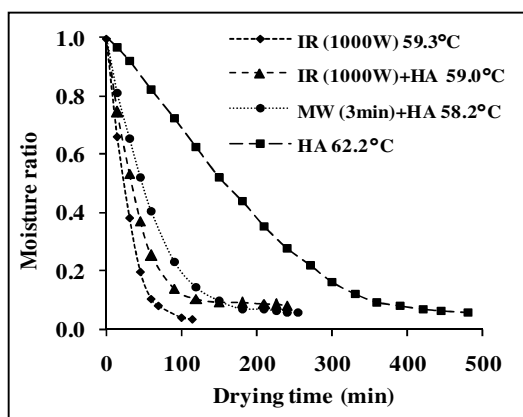


(ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน



(ค) อบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (90 W, 3 min) และลมร้อน

ภาพที่ 4 อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นของขนุนที่อุณหภูมิอบแห้งและแหล่งความร้อนต่างๆ อุณหภูมิอบแห้ง 41.0-59.3°C ความชื้นเริ่มต้นของขนุน อยู่ในช่วง 304.6-346.6% dry-basis และ ความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 13.4-25.4% dry-basis [(ก) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดอย่างเดี่ยว (ข) อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน และ (ค) อบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (90 W, 3 min) และอบแห้งด้วยลมร้อนที่ความเร็วเท่ากับ 1.1 m/s



ภาพที่ 5 ภาพเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของขนุนระหว่างการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนหลายแบบที่อุณหภูมิอบแห้งประมาณ $60.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ ความชื้นเริ่มต้น 309.0-375.9% dry-basis และความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 20.5-23.9% dry-basis

จากภาพที่ 5 แสดงปัจจัยของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งขนุน ในช่วงอุณหภูมิอบแห้ง $58.2-62.2^\circ\text{C}$ เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความชื้น กับระยะเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานต่างๆ พบว่า การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว จะมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด ส่วนการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนที่ความเร็วลมเท่ากับ 1.1 m/s และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนที่ความเร็วลมเท่ากับ 1.1 m/s จะมีอัตราการอบแห้งใกล้เคียงกัน ขณะที่อัตราการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียวจะมีค่าต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบที่ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากัน การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียวจะสามารถลดความชื้นของวัสดุลงได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานอื่น มีสาเหตุมาจากการแผ่รังสีความร้อนของรังสีอินฟราเรดสามารถส่งผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุได้มากกว่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งก็เกิดปรากฏการณ์นี้เช่นเดียวกับการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไมโครเวฟ หรือการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแหล่งพลังงานความร้อนรูปแบบอื่น และการอบแห้งแบบเป็นขั้นตอนโดยมีการใช้แหล่งพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 5 นั้น เมื่อพิจารณาการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยแหล่งพลังงานความร้อนคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยการพาความร้อนของลมร้อนเท่านั้น จะพบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนที่อุณหภูมิ $60.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน

เพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เดียวกับการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด อย่างไรก็ตาม พบว่า การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดมีระยะเวลาสั้นกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างอินฟราเรดและลมร้อน และพลังงานความร้อนสองขั้นตอนด้วยไมโครเวฟและลมร้อน ซึ่งน่าจะเกิดจากปัจจัยของการกระจายของลมร้อนในห้องอบแห้งไม่ดีพอ เนื่องจากตำแหน่งของท่อลมร้อนที่เข้าสู่ห้องอบแห้งที่กลางห้อง อยู่ในแนวระดับเดียวกับท่อทางออกของลมร้อนและห้องอบแห้งมีความยาวสั้นเพียง 47.5 cm ทำให้กระแสลมร้อนไหลออกไปจำนวนหนึ่งก่อนที่จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับขนุนสดได้ดีเพียงพอ

สำหรับในการทดลองนี้การอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนนั้น ดังกราฟในภาพที่ 5 นี้ ได้เลือกใช้ระยะเวลาในการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สั้นเพียง 3 นาที เนื่องจากสีของเนื้อขนุนแห้งจะเหลืองเข้มมากเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการอบแห้งหากเทียบกับขนุนอบแห้งและขนุนทอดที่มีชายแข็งพาดิซย เหล่านี้เป็นปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความยอมรับได้ของผลิตภัณฑ์ขนุน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงจำกัดในช่วงเวลาและค่ากำลังงานและอุณหภูมิอบแห้งเป็นประเด็นสำคัญก่อน และจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไปการอบแห้งให้ได้เนื้อขนุนที่มีคุณภาพและมีการยอมรับได้จากผู้บริโภค

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

จากผลการทดลองจลนพลศาสตร์ ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา สามารถนำมาหาค่าคงตัวของสมการเอมพิริคัล แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่า R^2 และ RMSE จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากตารางที่ 1 พบว่าสมการอบแห้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic, สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรดได้ดี ขณะที่สมการอบแห้งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Approximation of Diffusion สามารถทำนายผลการทดลองการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนได้ดี และสมการอบแห้งขั้นบางของ Modified Page ก็สามารถใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนได้ดี ตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าสูงสุดและ RMSE ที่มีค่าต่ำสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการนั้นๆ ทำนายผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการทดลองและมีค่าความแตกต่างจากผลการทดลองน้อยเพียงใด ตามลำดับ รายละเอียดของผลการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองอบแห้งขนุนที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4(ก) 4(ข) และ 4(ค) โดยใช้แหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรด พลังงานความร้อนร่วมรังสีอินฟราเรดและ

ลมร้อน และพลังงานความร้อนร่วมแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน ตามลำดับ งานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Tirawanichakul & Tirawanichakul,1994; Yaldiz *et al.*, 2001; Sharma *et al.*,2005)

ในขั้นตอนต่อไปในการวิจัย จะนำสมการอบแห้งตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมทั้ง 3 สมการนี้ไปใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์และคำนวณค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขนุนได้ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 ค่าคงตัวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล อุณหภูมิอบแห้ง 40-60°C

Energy Source	Constant of model	R ²	RMSE
Page model $MR = \exp(-kt^n)$			
IR (1,000W)	$k=0.018\exp(0.114/T)$, $n=1.056$	0.9415	0.0751
IR (1,000W) + HA	$k=0.024\exp(0.117/T)$, $n=0.862$	0.9355	0.0772
MW (3 min) + HA	$k=0.001\exp(0.144/T)$, $n=0.997$	0.9211	0.0910
Approximation of Diffusion model $MR = [\exp(-kt)] + (1-a)[\exp(-bt)]$			
IR (1,000W)	$k = 6.043\exp(43.029/T)$, $a=-0.080$, $b=0.004$	0.9426	0.0743
IR (1,000W) + HA	$k = 2.505 \times 10^5 \exp(250470.758/T)$, $a=0.976$, $b=-0.153$	0.9956	0.0201
MW (3 min) + HA	$k = 4.731\exp(156.250/T)$, $a=-0.020$, $b=0.002$	0.9219	0.0901
Henderson and Pabis model $MR = a[\exp(-kt)]$			
IR (1,000W)	$k = 1.134 \times 10^4 \exp(35350.288/T)$, $a=1.015$	0.9847	0.0383
IR (1,000W) + HA	$k = 1.265 \times 10^5 \exp(43130.086/T)$, $a=1.005$	0.9853	0.0368
MW (3 min) + HA	$k = 0.010\exp(0.101/T)$, $a=1.011$	0.9212	0.0900
Logarithmic model $MR = a[\exp(-kt)] + c$			
IR (1,000W)	$k = 9.017 \times 10^3 \exp(34484.345/T)$, $a=0.995$, $c=0.032$	0.9882	0.0337
IR (1,000W) + HA	$k = 0.020\exp(544.797/T)$, $a=0.946$, $b=0.065$	0.9444	0.0716
MW (3 min) + HA	$k = 0.017\exp(1021.829/T)$, $a=0.960.829$, $b=0.072$	0.9193	0.0860
Modified Page model $MR = \exp(-kt)^n$			
IR (1,000W)	$k = 110.812\exp(-35650.852/T)$, $n = 112.581$	0.9845	0.0386
IR (1,000W) + HA	$k = 9.417\exp(-24723.467/T)$, $n = 13.832$	0.9753	0.0477
MW (3 min) + HA	$k = 1.846\exp(-16592.527/T)$, $n = 2.462$	0.9653	0.0601

Note: RMSE (Root Mean Square Error) was defined as $RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{exp,i} - x_{cal,i})^2 \right]^{1/2}$ where $X_{exp,i}$ and $X_{ca,i}$ was experimental data and predicted data, respectively.

อัตราการอบแห้ง และความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง

ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะและอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งขนุนที่สภาวะการทดลองต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิการอบแห้งเพิ่มขึ้น อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น และระยะเวลาในการอบแห้งจะน้อยลง ส่งผลให้

ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งขนุนมีแนวโน้มลดลง และค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และพบว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเพียงอย่างเดียว ที่อุณหภูมิอบแห้ง 59.3°C กำลังของรังสีอินฟราเรดเท่ากับ 1,000 W ระยะเวลาในการอบแห้ง 115 min สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน การอบแห้งแบบ

2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว และสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้เท่ากับ 52.08% 54.90% และ 76.04% ตามลำดับ และลด

การสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งได้ถึง 97.78%, 98.04% และ 98.25% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 อัตราการอบแห้งเฉลี่ย ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะในการอบแห้งขนุนที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Drying temperature (°C)	Drying time (min)	Initial (Final) moisture content (% dry-basis)	Drying rate (kg/h)	Specific energy consumption (MJ/kg of water evaporated)	Specific moisture extraction rates (kg of water evaporated/kWh)
Infrared Power of 1,000 W					
41.7°C	375	329.41 (19.13)	1.6	0.07	0.51
50.1°C	225	348.62 (11.23)	4.8	0.03	1.20
59.3°C	115	358.36 (12.95)	7.0	0.01	2.67
Infrared Power of 1,000 W + Hot Air					
42.6°C	310	304.61 (25.37)	N/A	N/A	N/A
50.8°C	250	345.35 (15.68)	1.9	0.73	0.05
59.0°C	240	308.95 (13.35)	2.9	0.45	0.08
Two Stages Drying : Microwave Power of 90 W (3 min) + Hot Air					
41.0°C	510	346.99 (19.83)	1.7	0.78	0.05
48.5°C	315	331.48 (21.80)	2.4	0.55	0.07
58.2°C	255	334.61 (19.10)	2.6	0.51	0.07
Hot air					
62.2°C	480	375.87 (23.92)	2.0	0.57	0.06

Note: N/A mean not available because the dried jackfruit had high final moisture content and was infected by microorganism during storage

คุณภาพและการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์

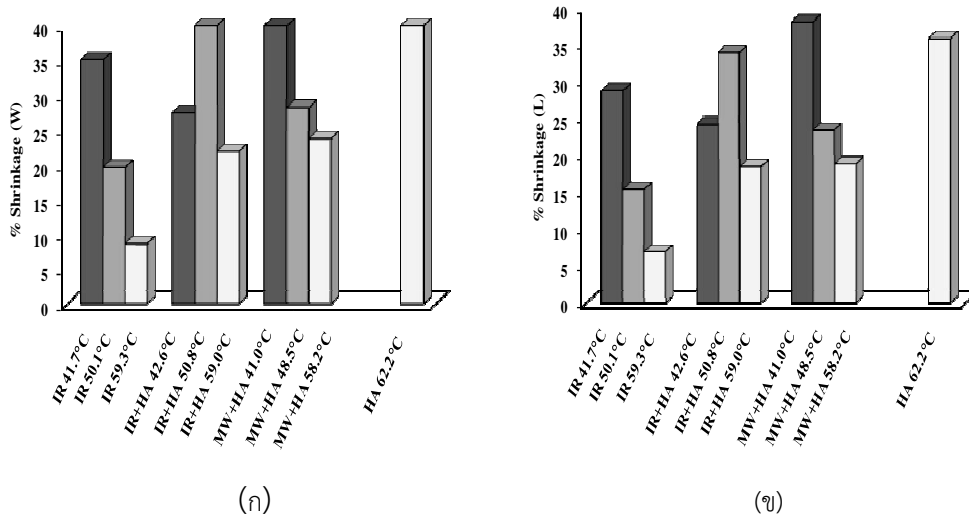
ผลการทดสอบการหดตัว

ภาพที่ 6 (ก) และ (ข) แสดงการหดตัวของขนุนหลังการอบแห้ง ทางด้านความกว้าง และความหนา การหดตัวของขนุนเกิดจากการได้รับความร้อนจากแหล่งพลังงานความร้อน ส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในเซลล์ในเนื้อขนุนมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเกิดความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอกเซลล์ จึงมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจากภายในเนื้อขนุนไปยังอากาศแวดล้อมในห้องอบแห้ง ทำให้เซลล์ภายในเนื้อขนุนมีปริมาตรลดลงและเกิดการหดตัวขึ้น รวมทั้งเกิดการเปลี่ยนของสภาพความยืดหยุ่น หรือ

การสูญเสียโครงสร้างในเนื้อขนุน ที่อุณหภูมิอบแห้งต่ำๆ การเกิดการระเหยของน้ำจากภายในเนื้อขนุนไปยังอากาศอบแห้งรอบๆ เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างช้าๆ พบว่า จะทำให้ขนุนเกิดการหดตัวสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง หรือกล่าวได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง ให้ค่าร้อยละการหดตัวมีค่าลดลง สาเหตุเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ผิวภายนอกของขนุนจะเกิดเป็นโซนแข็งอย่างรวดเร็วเนื่องจากน้ำตาลในเนื้อขนุนจับตัวเป็นคาราเมลและแข็งตัว ทำให้ยึดตัวและคงสภาพของโครงสร้างส่งผลต่อเนื้อขนุน ทำให้เนื้อขนุนมีการหดตัวได้น้อย ปรากฏการณ์เช่นนี้สามารถเกิดขึ้นกับผลไม้อื่นๆ ที่มีน้ำตาลและแป้งในปริมาณสูง

(จารุวรรณ กุลวิศ และคณะ, 2550) จากการทดลองพบว่า ขนุนอบแห้งมีการหดตัวทางด้านความกว้างมากกว่าทางด้านความหนา

เนื่องจากด้านความกว้างมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับความร้อนมากกว่าทางด้านความหนาของเนื้อขนุน



ภาพที่ 6 ร้อยละของการหดตัวของขนุนภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนต่างๆ

(ก) ร้อยละการหดตัวของขนุนหลังการอบแห้งทางด้านความกว้าง (W) และ

(ข) ร้อยละการหดตัวของขนุนหลังการอบแห้งทางด้านความหนา (L)

คุณภาพทางกายภาพของขนุน: สี

ผลการวัดสีของขนุน แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่าสีของผลิตภัณฑ์ขนุนภายหลังการอบแห้งที่สภาวะการทดลองต่างๆ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าสีของขนุนอบแห้งที่เลือกใช้แหล่งพลังงานต่างๆ พบว่า ปัจจัยหลักที่ผลต่อสีของขนุนคืออุณหภูมิที่ใช้อบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานความร้อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดต่ำลง ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงสีรวมในรูปของ ΔE^* มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ปัจจัยของแหล่งพลังงานความร้อนไม่ส่งผลต่อสีของของขนุนอบแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้ง

ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของการชิมและการรับรู้รสชาติของผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้ง ได้แก่ สี กลิ่น ความหวาน เนื้อสัมผัส และความยอมรับได้ในการบริโภค พบว่า ผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งเป็นที่ยอมรับในการบริโภคในทุกสภาวะการทดลอง และมีแนวโน้มความชอบในระดับปานกลาง โดยการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน มีระดับความชอบทั้ง สี กลิ่น ความหวาน เนื้อสัมผัส และความยอมรับในการบริโภคโดยรวมของขนุนอบแห้ง

สูงกว่าขนุนอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งอื่นๆ ขณะที่ปัจจัยของอุณหภูมิในการอบแห้งไม่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขึ้นไป ($p < 0.05$) และเมื่อพิจารณาร้อยละของการหดตัวของขนุนที่อบแห้งด้วยแหล่งพลังงานต่างๆ เปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน แม้ว่า มีร้อยละของการหดตัวที่แตกต่างกันพอสมควร แต่ไม่สอดคล้องกันกับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ค่าสี กลิ่น ความหวาน เนื้อสัมผัส และความยอมรับได้ในการบริโภคในเชิงของประสาทสัมผัส เพราะประสาทสัมผัสของผู้ชิมที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ ไม่เกี่ยวข้องกับการหดตัว อย่างไรก็ตามก็ตีคะแนนความยอมรับได้ของผู้บริโภคของทุกผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ซึ่งกล่าวได้ว่า ผู้ทดสอบด้านการชิมให้การยอมรับขนุนอบแห้งได้ทุกแหล่งพลังงานความร้อน

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลอง สรุปได้ดังนี้ พบว่า การอบแห้งขนุนเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงและการเลือกใช้อุณหภูมิอบแห้งที่สูงไม่เกิน 60°C สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้ง ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งลดลงและไม่ส่งผลต่อค่าสีของขนุนอบแห้งมากเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงกว่า

ตารางที่ 3 ค่าสีของผลิตภัณฑ์ขนุนที่สภาวะการทดลองต่างๆ

Drying temperature (°C)	Color of products			
	Lightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)	ΔE*
Infrared Power 1000 W				
41.7°C	57.1±0.52 ^c	16.3±0.34 ^{ef}	51.0±0.68 ^{cd}	78.3±0.88 ^b
50.1°C	54.5±0.03 ^d	17.0±0.21 ^{cd}	47.6±0.81 ^e	74.4±0.49 ^c
59.3°C	57.8±1.68 ^c	15.9±1.63 ^{ef}	50.2±2.06 ^d	78.2±2.11 ^b
Infrared Power 1000 W + Hot Air				
42.6°C	47.2±1.94 ^f	19.6±0.95 ^a	44.7±1.20 ^f	67.9±1.92 ^d
50.8°C	59.4±0.54 ^b	16.7±0.10 ^{cde}	55.2±0.50 ^a	82.5±0.65 ^a
59.0°C	63.7±0.24 ^a	13.0±0.15 ^g	50.7±0.76 ^{cd}	82.5±0.50 ^a
Two Stages Drying : Microwave Power 90 W (3 min) + Hot Air				
41.0°C	52.8±0.89 ^e	16.7±0.06 ^{cde}	45.0±0.73 ^d	74.7±1.10 ^c
48.5°C	53.8±0.44 ^e	17.5±0.20 ^{bc}	52.4±0.15 ^b	77.1±0.35 ^b
58.2°C	60.0±0.34 ^b	15.7±0.10 ^f	54.2±0.68 ^a	82.4±0.65 ^a
Hot air				
62.2°C	53.4±0.68 ^e	18.1±0.20 ^b	52.1±0.29 ^{bc}	76.8±0.61 ^b

Means within the same column with different letters are significantly different at the 95% confidence level.

ซึ่งในการทดลองนี้ทำการอบแห้งขนุนด้วยแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน 3 แหล่ง ได้แก่ รังสีอินฟราเรด (หรือที่เรียกว่ารังสีความร้อน) คลื่นไมโครเวฟและลมร้อนจากขดลวดความร้อนไฟฟ้า สรุปได้ว่า อัตราการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแหล่งเดียวสูงกว่าอัตราการอบแห้งด้วยแหล่งพลังงานความร้อนอื่นๆ ขณะที่แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขนุนในแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งนั้นสามารถสรุปแยกเป็นแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Logarithmic, Approximation of Diffusion และ Modified Page สามารถใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นขณะอบแห้งขนุนด้วยรังสีอินฟราเรด พลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรดกับลมร้อน และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟกับลมร้อนได้ดีที่สุด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาสำหรับผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งในเชิงคุณภาพ สรุปได้ว่า คุณภาพของขนุนอบแห้งด้วยสภาวะอบแห้งที่แตกต่างกันที่ใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงมีค่าความสว่าง (L*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้น ทำให้ภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงสีรวมในรูปของ ΔE* เพิ่มขึ้น แม้ว่าค่าความเป็นสีแดง (a*) จะแปรผกผันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งก็ตาม และเมื่อพิจารณาการหดตัวของผลิตภัณฑ์

ขนุนอบแห้ง พบว่า การหดตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น (จาก 40°C เป็น 50°C และ 60°C ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการแข็งตัวของน้ำตาลในเนื้อผลิตภัณฑ์ขนุน จึงช่วยคงสภาพผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งได้ และในที่สุดท้ายของงานวิจัยนี้คือการทดสอบทางประสาทสัมผัส และความยอมรับได้ในการบริโภคของเนื้อขนุนอบแห้งโดยรวม สรุปได้ว่า สภาวะอบแห้งกรณีใช้รังสีอินฟราเรดหรือรังสีความร้อน และการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นกล่าวโดยสรุปโดยภาพรวมได้ว่า การอบแห้งด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรด สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยพลังงานความร้อนร่วมระหว่างรังสีอินฟราเรด-ลมร้อน และคลื่นไมโครเวฟ-ลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนเพียงอย่างเดียว สำหรับคุณภาพของขนุนอบแห้งสรุปได้ว่า สีของผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งที่ใช้แหล่งพลังงานความร้อนต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขนุนอบแห้งมีสีเหลืองน่ายรับประทาน โดยความชื้นสุดท้ายของขนุนอบแห้งควรอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 12-19 มาตรฐานแห้ง อย่างไรก็ตาม ใช้อุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเนื้อขนุนอบแห้ง

กล่าวคือ ความยอมรับได้ของผู้บริโภคทุกผลิตภัณฑ์ขนุนอบแห้งอยู่ในระดับปานกลาง และประการสุดท้ายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัลของการอบแห้งชิ้นบางของขนุนอบแห้ง สามารถใช้อธิบายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี หากต้องการขยายขนาดของเครื่องอบแห้งเพื่อใช้ในการผลิตขนุนอบแห้งระดับอุตสาหกรรม ควรจะใช้อุณหภูมิในห้องอบแห้งประมาณ 50 ถึง 60°C ซึ่งถ้าต้องการใช้แหล่งพลังงานความร้อนแบบการพาคือใช้ลมร้อน ก็จะต้องให้การกระจายลมร้อนในห้องอบแห้งสม่ำเสมอ แต่หากต้องการอบแห้งขนุนปริมาณมากด้วยแหล่งพลังงานรังสีอินฟราเรดในห้องอบแห้งขนาดใหญ่ จะต้องมีการเพิ่มจำนวนหลอดอินฟราเรดเพื่อการแผ่รังสีจากหลอดอินฟราเรดกระจายอย่างสม่ำเสมอไปยังขนุนในถาดอบแห้ง ซึ่งระยะเวลาในการอบแห้งด้วยวิธีนี้สามารถคงระยะเวลาการอบแห้งได้เท่าเดิมดังเช่นการทดลองอบแห้งในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามในการอบแห้งแบบสองขั้นตอนด้วยคลื่นไมโครเวฟและลมร้อน แม้ว่าจะมีระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่การขยายสเกลของเครื่องไมโครเวฟมีความยุ่งยากกว่าเพราะต้องออกแบบท่อนำคลื่นไมโครเวฟสำหรับห้องอบแห้งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่ออบแห้งขนุนได้ครั้งละปริมาณมาก

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตรและสถานวิจัยเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือและทุนวิจัยเพื่อใช้ในการทำโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

จารุวรรณ กุลวิศวะ, สมเกียรติ ปรัชญาวารกร และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ. (2550). ผลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีต่อสารระเหยง่ายและคุณภาพทางกายภาพในกล้วยแผ่น. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, ฉบับพิเศษ ปีที่ 30* (ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2550).

ดวงจันทร์ เกรียงสุวรรณ. (2544). บทความวิทยุรายการสาระความรู้ทางการเกษตร ประจำวันจันทร์ที่ 19 มีนาคม 2544, เรื่อง “มารู้จักขนุนกันดีกว่า” (ที่มา: http://nates.psu.ac.th/radio/radio_article/radio43-44/43-440025.htm)

ศิริประภา คลังทอง และ ศิริวิไล อนุกุลประชา (2546). การอบแห้งใบหอมสับแบบฟลูอิดไอเซชันร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร, คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต.

สมชาติ โสภณธนฤทธิ. (2540). การอบแห้งเมล็ดถั่วเขียว, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภักนัย ทองท้อมพร. (2550). การมองเห็นและการวัดสี, โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม (ที่มา: http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_2550_Color_Measurement.pdf).

Achaviriya, S., & Soponronnarit, S. (1990). Studies of parameter for the analysis of papaya glaze drying. *Agricultural Science Journal*, 24, 196-207.

Alibas Ozkan, I., Akbudak, B., & Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78, 577-583.

AOAC. 1995. Official Method of Analysis, 16th ed., The Association of Official Analytical Chemists. Inc. Arlington, Virginia, USA.

Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2010). Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli. *Biosystems Engineering*, 105, 130-138.

Kathiravan, K., Harpreet K, K., Soojin, J., Joseph, I., & Ali, D., Eds. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Food Science and Food Safety*.

Nathakaranakul, A., Jaiboon, P., & Soponronnarit, S. (2010). Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *Journal of Food Engineering*, 100(4), 662-668.

Sharma, G. P., Verma, R. C., & Pathare, P. B. (2005). Thin-layer Infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.

Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Jirajindalert, A., & Taechapiroj, C. (2006). Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. *Journal of Food Engineering*, 75, 423-432.

- Tirawanichakul, S., & Tirawanichakul, Y. (1994). Thin layer grain dryer: parameters of thin layer drying for cashew nut. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 16, 92-381.
- Tirawanichakul, Y., & Tirawanichakul, S. (2008). Mathematical model of fixed-bed drying and strategies for crumb rubber producing STR20. *Drying Technology*, 26, 1388-1395.
- Tirawanichakul, S., Na Phatthalung, W., & Tirawanichakul, Y. (2008). Drying strategy of shrimp using hot air convection and hybrid infrared radiation and hot air convection. *Walailak Journal of Science and Technology*, 55, 77-100.
- Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V., & Mujumdar, A. S. (1995). Microwave drying of grapes in a single mode at 2450 MHz-II and energy aspect. *Drying Technology*, 13, 1973-1992.
- Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A., & Achariyaviriya, S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan. *Journal of Food Engineering*, 81, 459-466.
- Yaldiz, O., Ertekin, C. H., & Uzun, I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.