



KKU Res.j. 2014; 19(2) : 201-214

<http://resjournal.kku.ac.th>

คุณลักษณะเฉพาะของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด Drying Characteristics of Longan Flesh by Infrared Radiation

สุนทร สืบคำ^{1,2*} ธนสิริ วังศ์ศิริอำนวย^{1,2} สุจิตรา รตนะมโน^{1,2} ระวิน สืบคำ³
(Sunate Surbkar)^{1,2*} (Thanasit Wongsiriamnuay)^{1,2} (Sujitra Ratanamarno)^{1,2} (Rawin Surbkar)³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

²ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

³อาจารย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

*Corresponding author, e-mail: sunate@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดจากฮีเตอร์แบบหลอดคู่ความยาวใช้งาน 300 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร ขนาด 500 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีชนิดวางในแนวนอนแบบหลอดคู่ ขนาด 125 x 45 x 315 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด ซึ่งแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นช่วงไกล (FIR) อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 ไมโครเมตร โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเนื้อลำไยกับผิวของฮีเตอร์อินฟราเรดคงที่ 25 เซนติเมตร การศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.เซนติเมตร⁻² และความเร็วอากาศเหนือวัสดุที่กำลังอบแห้ง 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 เมตร.วินาที⁻¹ ที่มีต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพันธุ์คือเกรด A (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27-28 มม.) จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 ฐานเปียก (w.b.) เหลือไม่เกินร้อยละ 18 w.b. ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพข. 136/2546 ส่วนอัตราการอบแห้งถูกนำไปกำหนดแบบจำลองเอมพิริคัลการอบแห้ง ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดในช่วง 0.521-0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² ทำให้เวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง ในขณะที่ความเร็วอากาศในช่วง 0.7-1.0 เมตร.วินาที⁻¹ มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยในทิศทางตรงกันข้าม ค่าความสว่างและค่าสีรวมของเนื้อลำไยแห้งมีค่าสูงสุดที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² โดยค่าความสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศ มุมเจดสีบ่งว่าเนื้อลำไยมีสีน้ำตาลอ่อน จึงสามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งเนื้อลำไยด้วยความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² และความเร็วอากาศ 0.7 เมตร.วินาที⁻¹ โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบางของ Page สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ใกล้เคียงที่สุด

Abstract

This study was conducted to determine drying characteristics of longan flesh by infrared radiation (IR) using twin IR heaters having a radiated length of 300 mm and 17 mm in diameter with 500 Watt for each heater. These twin IR heaters were placed in a parabolic sheath. Using two parabolic sheaths, IR radiated in a range of 3–8 micrometer falling in the far infrared radiation (FIR). The distance from IR heater to a longan surface was fixed at 25 mm. In the present study, the effects of IR intensities, 0.521, 0.625 and 0.729 W.cm⁻² and air velocities blew over the sample surface of material being dried, 0.4, 0.7 and 1.0 m.s⁻¹ on moisture loss and dried longan flesh qualities were investigated.

A-grade longans cv. *E-dor* (approximately 27–28 mm diameter) were used in this study. The longan flesh with the initial moisture content of 80 % w.b to be dried to final moisture content of 18% w.b. according to Thai Community Product Standard number 136/2546. Drying rates were used to determine an appropriate empirical longan flesh drying model. It was found that the use of infrared intensities of 0.521-0.625 W.cm⁻² led to shorten the drying time and consequently lower the specific energy consumption while the use of air velocities of 0.7-1.0 m.s⁻¹ inversely affected. The dried longan flesh gave the higher values of lightness and total color difference when using the infrared intensity of 0.625 W.cm⁻², the lightness was directly affected by the air velocities. The hue angle identified the yellowish brown of dried longan flesh. From the findings, we could draw the drying conditions of flesh longan with infrared radiation as infrared intensity of 0.625 W.cm⁻² and air velocity of 0.7 m.s⁻¹. The Page Model described the moisture loss within acceptable ranges.

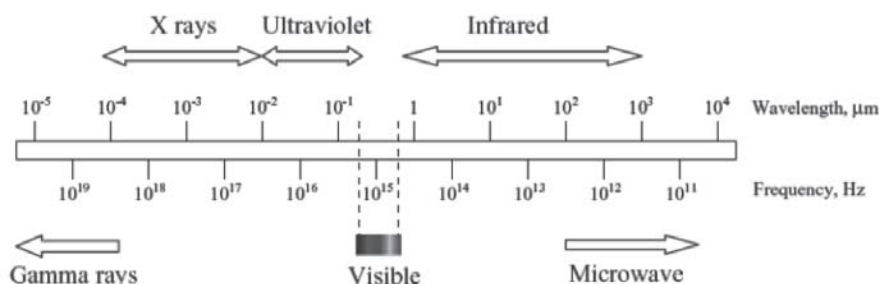
คำสำคัญ: แบบจำลองการอบแห้ง การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ลำไย

Keywords: Drying Model, Infrared drying, Longan

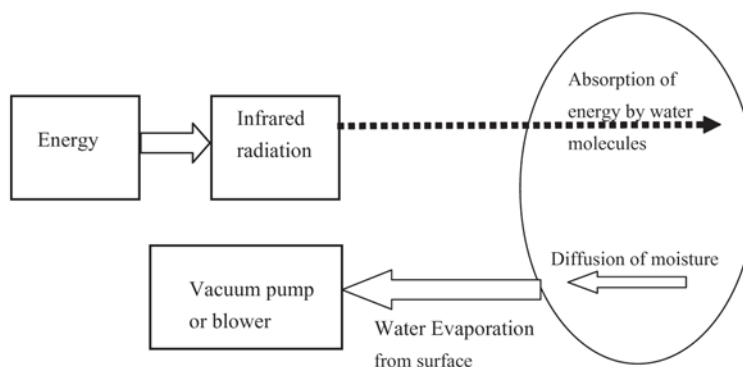
1. บทนำ

รังสีอินฟราเรด (infrared radiation, IR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 1000 ไมโครเมตร (รูปที่ 1) แบ่งย่อยเป็น 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ (near infrared, NIR) มีช่วงความยาวคลื่น 0.75–1.4 ไมโครเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการอบวัสดุหนากว่าวัสดุชั้นบาง รังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (middle infrared, mid-IR) ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 1.4–3.0 ไมโครเมตร และรังสีอินฟราเรดช่วงไกล (far infrared, FIR) มีช่วงความยาวคลื่น 3.0–1000 ไมโครเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการอบวัสดุชั้นบาง ๆ (1, 2) จะเห็นได้ว่ารังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่ำ และระดับความถี่สูงกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ส่งผลให้มีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำเพียงไม่เกิน 10 มิลลิเมตร (3) ดังนั้น รังสีอินฟราเรดจึงเหมาะกับการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยมีการทำงานคือรังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุต้นและเกิดความร้อนขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในตัวของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (4, 5) ดังแสดงกลไกในการถ่ายเทความร้อนและมวลในรูปที่ 2 ซึ่งอาศัยรังสีอินฟราเรด

เป็นแหล่งความร้อนด้วยการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำมากกว่าการพา (6) และอาศัยลมเป็นตัวพาไอน้ำที่ระเหยแล้วออกจากห้องอบ จึงทำให้วัสดุที่กำลังอบอยู่แห้งทั้งภายในและภายนอกในเวลาเกือบเท่ากัน นั่นคือกระจายความร้อนภายในชิ้นวัสดุเป็นไปได้อย่างทั่วถึง ถ่ายเทความร้อนได้เร็วและมีประสิทธิภาพ ลดระยะเวลาการอบแห้งและประหยัดพลังงานถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน (2) และแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมีลักษณะความร้อนสูงทำให้เครื่องอบมีขนาดเล็กกะทัดรัด ช่วยลดต้นทุนในการสร้างเครื่อง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบพาความร้อนแบบอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม (1,3,7) ด้วยคุณสมบัติของการเกิดความร้อนที่ผิวของอาหารอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของอาหาร เช่น ทำให้ผิวของอาหารมีสีเข้มขึ้น หรือมีกลิ่นหอม จึงนิยมนำมาใช้ในการลดความชื้นอาหารที่ต้องการให้มีความชื้นต่ำ มีความหนาไม่มากนัก และต้องการการเปลี่ยนแปลงของสี เช่น การลดความชื้นเมล็ดกาแฟผงโกโก้ ใบชา ซึ่งผลพลอยได้ก็คือช่วยให้สีของผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (24)



รูปที่ 2 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (26)

ความน่าสนใจในการให้ความร้อนที่ผิวด้วยรังสีอินฟราเรด จึงมีนักวิจัยหลายคนได้พยายามศึกษาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดกับพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อที่ระยะ 15-25 เซนติเมตร (10) เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ระยะ 3.6 เซนติเมตร (11) ใบหอมสดสับที่ระยะ 10 เซนติเมตร (5, 12) การอบแห้งเนื้อที่ระยะ 15 เซนติเมตร (7, 13) และเนื้อลำไยกับระยะ 25 เซนติเมตร (14) นอกจากนี้ยังมี (4) ที่ศึกษาพบว่าการอบแห้งพริกขี้หนูด้วยรังสีอินฟราเรดควรใช้ความหนาแน่นของรังสี 500 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาทีหรือน้อยกว่า (15) พบว่า การอบแห้งหอมหั่นแฉ้งด้วยรังสีอินฟราเรดเกิดอยู่ในระยะการอบแห้งลดลง โดยที่แบบจำลอง Page สามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งได้ดีที่สุด (16) ศึกษาการแช่ชิ้นมันฝรั่งและสับปะรดก่อนอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

อย่างไรก็ตามยังไม่มีมีการรายงานคุณลักษณะของการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด การลดความชื้นผลผลิตเกษตรในช่วงอัตราการทำแห้งแบบลดลง มีการควบคุมโดยกลไกการแพร่ของน้ำและ/หรือไอน้ำ แบบจำลอง Newton, Herderson and Pabis, Page และ Modified Page เป็นแบบจำลองการทำแห้งแบบชั้นบางที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงศึกษาการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีลมเป็นตัวกลางในการพาไอน้ำออกจากห้องอบแห้ง เพื่อศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้ง โดยคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบสภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดในระบบอุตสาหกรรม (17) หรือนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งระบบอื่น ๆ ต่อไป

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง

Model name	Model	Reference
Newton or Exponential	$MR = \exp(-kt)$	(15, 19, 20, 21)
Herderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(15, 19, 21, 22)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(15, 19, 20, 21)
Modified Page	$MR = \exp[-(kt)^n]$	(15, 19, 21)

เมื่อ k, n, a, b คือค่าคงที่การอบแห้งในแบบจำลอง ส่วน t คือ เวลาในการอบแห้ง

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_i, M, M_e คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุลตามลำดับ

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาการอบแห้งวัตถุทางการเกษตรจำพวกผักและผลไม้ มักนิยมใช้แบบจำลองเอมพิริคัล (empirical model) อาทิ แบบจำลอง Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page (ตารางที่ 1)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าการลดลงไคสแควร์ (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (15,19,20,21) ค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยยังมีค่าเข้าใกล้ 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 มากแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE น้อย โดยสมการแสดงการคำนวณหาพารามิเตอร์ดังกล่าวมีดังนี้

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n MR_{i,exp} \times MR_{i,pre}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n MR_{i,exp}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n MR_{i,pre}^2 \right)}} \right]^2 \quad (2)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,pre})^2}{N - n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,pre})^2}{N}} \quad (4)$$

เมื่อค่า $MR_{i,exp}$ และ $MR_{i,pre}$ เป็นค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการทำนาย ตามลำดับ ค่า N และ n เป็นจำนวนค่าสังเกต และจำนวนค่าคงที่ในแบบจำลอง ตามลำดับ

2.5 พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งเนื้อลำไย

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) นิยมใช้เป็นค่าบ่งบอกสมรรถนะเครื่องอบแห้ง เนื่องจากน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุอบแห้งแตกต่างกัน ค่านี้หาได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยต่อปริมาณของน้ำที่ระเหยซึ่งหาได้จาก (23)

$$SEC = \frac{Q}{m_{w,evap}} \quad (5)$$

เมื่อ SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (จูล.กรัม⁻¹)

Q = พลังงานความร้อนรวมที่ใช้ในขบวนการอบแห้ง (จูล)

$m_{w,evap}$ = ปริมาณความชื้นที่ระเหย (กรัม)

2.6 การวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อลำไยแห้ง

นำเนื้อลำไยอบแห้งไปตรวจวัดปริมาณความชื้นโดยใช้เครื่องวัดความชื้นของอาหาร (ยี่ห้อ A&D รุ่น AD-4714) ด้วยอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 99 นาที วัดค่าแอกทีวิตี้ (water activity, a_w , ยี่ห้อ Aqua Lab

รุ่น Series 3TE) และค่า CIE-L*a*b* ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE plus) ค่าสีสามค่าที่ได้จะถูกนำไปคำนวณค่าสีรวม ($\Delta E^*_{ab} = ((\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2)^{1/2}$) และมุมเฉดสี (hue angle, $h^* = \text{Arctan } b^*/a^*$) ซึ่งเป็นการแปลงค่าของ a^* และ b^* ให้อยู่ในรูปแบบเชิงมุม โดยที่ (24, 25)

$h^* = 0$ องศา แสดงว่า วัตถุมีสีสีแดง

$h^* = 90$ องศา แสดงว่า วัตถุมีสีเหลือง

$h^* = 180$ องศา แสดงว่า วัตถุมีสีเขียว

$h^* = 270$ องศา แสดงว่า วัตถุมีสีน้ำเงิน

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ความชื้นสมดุลของเนื้อลำไย

การหาความชื้นสมดุลทำได้โดยปล่อยให้เนื้อลำไยสมดุลกับสภาวะการอบแห้งต่าง ๆ จนกระทั่งน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลง จากนั้นนำเนื้อลำไยแห้งไปตรวจวัดหาความชื้นสมดุลมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีความสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงเส้น (linear regression) กับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด (IR) และความเร็วของอากาศ (v) ดังสมการ

$$M_e = 18.375 - 26.656 \times IR + 8.704v$$

โดยมี $R^2_{adj} = 0.808$ (6)

ตารางที่ 2 ความชื้นสมดุลของเนื้อลำไย (%w.b.) ที่สภาวะการอบแห้งต่าง ๆ

IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)		
	0.4	0.7	1.0
0.521	7.5	10.1	14.2
0.625	5.1	7.2	10.9
0.729	3.7	4.7	6.8

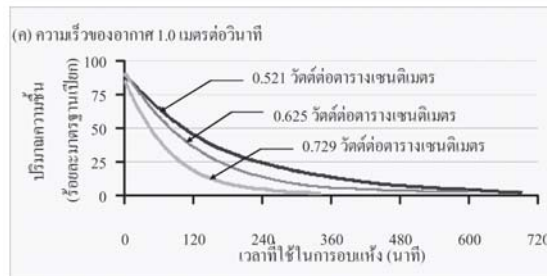
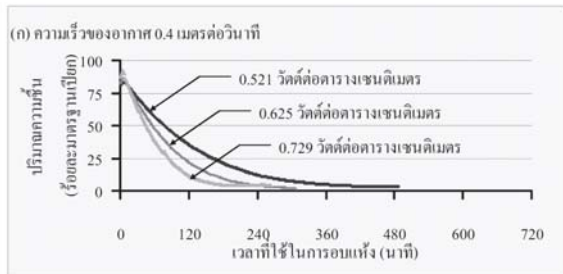
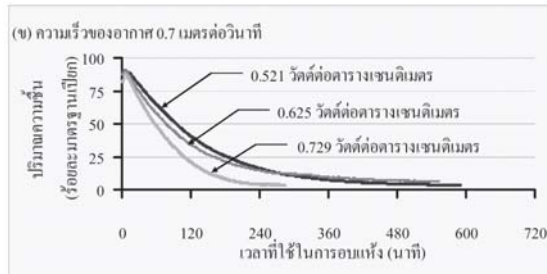
3.2 คุณลักษณะของการอบแห้งเนื้อลำไย

การอบแห้งเนื้อลำไยจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 81 w.b. เหลือไม่เกินร้อยละ 18 w.b. ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 136/2546 (26) แสดงกราฟการอบแห้งในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วต่าง ๆ ซึ่งว่าความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าลดลงแบบ

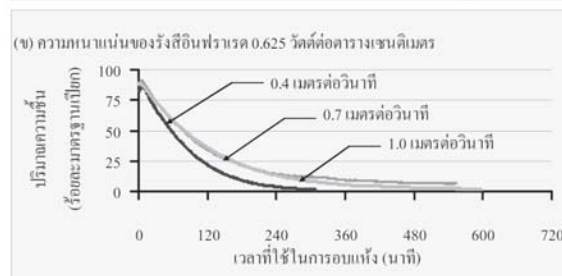
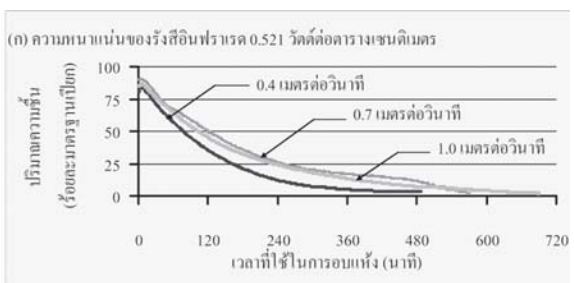
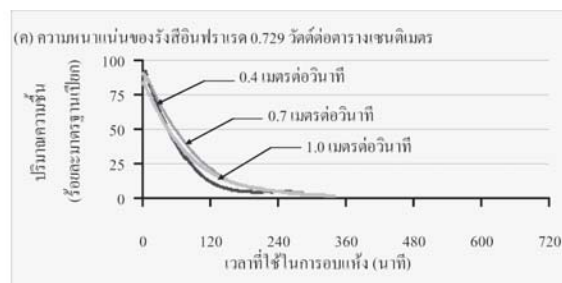
เอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดในระดับที่สูงกว่าทำให้ความชื้นเนื้อลำไยลดลงมากกว่าในทุกระดับความเร็วอากาศ โดยที่ความหนาแน่นรังสีอินฟราเรด 0.729 วัตต์.เซนติเมตร⁻² มีผลทำให้ความชื้นของเนื้อลำไยลดลงเร็วที่สุด เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนอาศัยหลักการของการแผ่รังสี โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นรังสีอินฟราเรดจึงถูกส่งไปยังเนื้อลำไยโดยตรง โดยมีหลอดอินฟราเรดเป็นตัวกำเนิดความร้อนและอาศัยลมเป็นตัวพาไอน้ำที่ระเหยแล้วออกสู่ระบบ ผลการศึกษาในตารางที่ 3 ซึ่งว่าการใช้ความเร็วอากาศ 0.4 เมตร.วินาที⁻¹ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นรังสีอินฟราเรดจาก 0.521 วัตต์.เซนติเมตร⁻² เป็น 0.625 และ 0.729 วัตต์.เซนติเมตร⁻² จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงร้อยละ 50 และ 62 ตามลำดับ และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 16 และ 27 ตามลำดับ ส่วนการใช้ความเร็วอากาศ 0.7 เมตร.วินาที⁻¹ จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงร้อยละ 23 และ 62 ตามลำดับ และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 24 และ 52 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ความเร็วอากาศ 1.0 เมตร.วินาที⁻¹ ในทุกระดับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด จะทำให้เวลาในการอบแห้งยาวนานออกไป ส่งผลให้ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่จะใช้ในการระเหยความชื้นออกจากเนื้อลำไยสูญเสียออกนอกระบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (27,28) ซึ่งอบแห้งข้าวเปลือกและแผ่นมันฝรั่งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วงไกลพบว่า การเพิ่มความหนาแน่นรังสีอินฟราเรดจาก 0.167 เป็น 0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² และจาก 0.125 เป็น 0.500 วัตต์.เซนติเมตร⁻² ตามลำดับจะลดระยะเวลาในการอบแห้งรูปที่ 5 แสดงกราฟการอบแห้งที่ได้รับอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ ซึ่งให้เห็นว่าความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับกรณีการศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด ตารางที่ 3 ซึ่งว่าการใช้ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.521 วัตต์.เซนติเมตร⁻² เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศจาก 0.4 เมตร.วินาที⁻¹ เป็น 0.7 และ 1.0 เมตร.วินาที⁻¹ จะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงร้อยละ 7 และ 12 ตามลำดับ และความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะลดลงร้อยละ 35 และ 11

ตามลำดับ ส่วนการใช้ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.เซนติเมตร² เวลาในการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 43 และ 83 ตามลำดับ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นร้อยละ 22 และ 55 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.729 วัตต์.เซนติเมตร² เวลาในการอบแห้งมีค่าต่ำสุดและใกล้เคียงกันเมื่อความเร็วอากาศ อยู่ในช่วง 0.4-0.7 เมตร.วินาที⁻¹ แต่หากเพิ่มความเร็วอากาศเป็น 1.0 เมตร.วินาที⁻¹ เวลาในการอบแห้งจะเพิ่ม

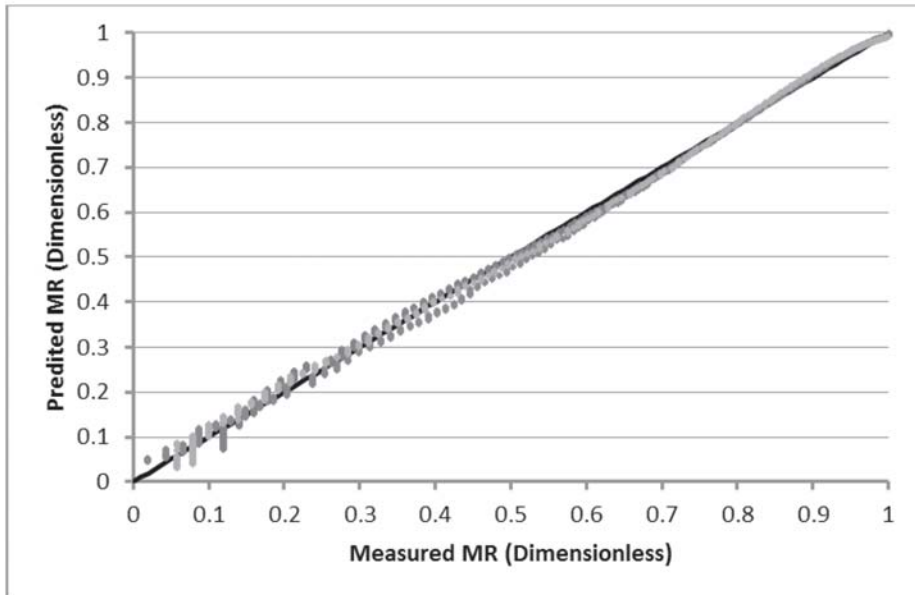
ขึ้นเกือบ 2 เท่า เนื่องจากความร้อนสูญเสียออกนอกระบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (29) ที่ศึกษาการอบแห้งชิ้นแอปเปิ้ลด้วยรังสีอินฟราเรดพบว่า การเพิ่มความเร็วอากาศ จาก 0.5 เป็น 1.5 เมตร.วินาที⁻¹ จะเพิ่มระยะเวลาในการอบแห้งถึงร้อยละ 45-55 และงานวิจัยของ (7) ที่ศึกษาการอบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรดพบว่า การเพิ่มความเร็วอากาศ จาก 0.1 เป็น 0.9 เมตร.วินาที⁻¹ จะเพิ่มเวลาในการอบแห้งกว่าร้อยละ 146



รูปที่ 4 กราฟการอบแห้งเนื้อลำไยที่ความหนาแน่นรังสีอินฟราเรดต่างๆ สำหรับแต่ละความเร็วอากาศ



รูปที่ 5 กราฟการอบแห้งเนื้อลำไยที่ความเร็วอากาศต่างๆ สำหรับแต่ละความหนาแน่นรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 6 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง Page ที่ระดับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ และ ความเร็วอากาศ 0.4 m/s

ตารางที่ 3 ความชื้นเนื้อลำไยแห้ง ระยะเวลาในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเนื้อลำไย

IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	MC (% wb)		Drying time (min)		SEC (kJ/g water evap)	
0.521	0.4	11.83±0.49	ab	551±159	a	69.93±20.50	abc
0.521	0.7	15.47±2.75	bcd	512±119	a	94.23±31.99	c
0.521	1.0	18.03±2.44	cd	486±122	ab	77.79±14.15	abc
0.625	0.4	19.17±0.35	d	276±27	bc	58.68±13.86	abc
0.625	0.7	10.10±1.80	a	396±138	abc	71.46±24.58	abc
0.625	1.0	14.67±3.56	bc	505±79	ab	90.87±14.68	c
0.729	0.4	10.53±2.15	a	212±48	c	51.39±11.73	ab
0.729	0.7	12.70±2.00	ab	194±24	c	45.48±7.15	a
0.729	1.0	15.73±1.72	bcd	464±224	ab	83.49±18.40	bc

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง และพารามิเตอร์ทางสถิติ

Model name	IR intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	constants; k in min ⁻¹	R ²	Chi-square	RMSE
Newton	0.521	0.4	k=0.0054	0.9712	0.0265	0.0132
		0.7	k=0.0055	0.7446	0.0472	0.0235
		1.0	k=0.0049	0.8640	0.0476	0.0237
	0.625	0.4	k=0.0111	0.8905	0.0651	0.0324
		0.7	k=0.0030	0.9889	0.0019	0.0010
		1.0	k=0.0105	0.7343	0.0866	0.0432
	0.729	0.4	k=0.0127	0.9497	0.0364	0.0181
		0.7	k=0.0116	0.9397	0.0581	0.0289
		1.0	k=0.0120	0.8310	0.0663	0.0331
Henderson & Pabis	0.521	0.4	k=0.0054, a=1.3871	0.9712	0.0090	0.0045
		0.7	k=0.0055, a=1.4538	0.7446	0.0193	0.0096
		1.0	k=0.0049, a=1.6572	0.8640	0.0181	0.0090
	0.625	0.4	k=0.0111, a=1.8458	0.8905	0.0452	0.0224
		0.7	k=0.0030, a=1.0581	0.9889	0.0000	0.0000
		1.0	k=0.0105, a=3.1986	0.7343	0.2552	0.1272
	0.729	0.4	k=0.0127, a=1.4801	0.9479	0.0133	0.0066
		0.7	k=0.0116, a=1.7465	0.9397	0.0330	0.0164
		1.0	k=0.0120, a=1.9165	0.8310	0.0515	0.0256
Page	0.521	0.4	k=0.0001, N=1.7197	0.9911	0.0002	0.0001
		0.7	k=0.0001, N=1.7517	0.9842	0.0016	0.0008
		1.0	k=0.0000, N=1.7379	0.9847	0.0007	0.0004
	0.625	0.4	k=0.0000, N=1.9863	0.9913	0.0003	0.0002
		0.7	k=0.0002, N=1.4407	0.9606	0.0022	0.0011
		1.0	k=0.0000, N=1.9129	0.9824	0.0006	0.0003
	0.729	0.4	k=0.0000, N=2.0513	0.9677	0.0014	0.0007
		0.7	k=0.0000, N=2.1061	0.9865	0.0002	0.0001
		1.0	k=0.0000, N=2.0212	0.9823	0.0004	0.0002
Modified Page	0.521	0.4	k=0.0037, N=1.7500	0.9911	0.0002	0.0001
		0.7	k=0.0036, N=1.7500	0.9842	0.0017	0.0008
		1.0	k=0.0029, N=1.7500	0.9847	0.0008	0.0004
	0.625	0.4	k=0.0057, N=1.7500	0.9913	0.0010	0.0005
		0.7	k=0.0032, N=1.7500	0.9606	0.0068	0.0034
		1.0	k=0.0041, N=1.7500	0.9847	0.0007	0.0003
	0.729	0.4	k=0.0077, N=1.7500	0.9677	0.0021	0.0010
		0.7	k=0.0061, N=1.7500	0.9865	0.0018	0.0009
		1.0	k=0.0060, N=1.7500	0.9823	0.0006	0.0003

ตารางที่ 5 อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วอากาศต่อคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง

IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	MC (% wb)		L*		a*		b*		DE		Hue angle (deg)		a _W	
0.521	0.4	11.83±0.49	ab	30.54±1.35	bc	7.10±2.65	a	18.89±3.74	a	39.68±3.20	a	20.13±3.20	ab	0.465±0.065	a
0.521	0.7	15.47±2.75	bcd	31.18±1.69	bcd	4.10±0.87	a	14.44±1.93	abc	34.34±3.21	ab	15.75±1.41	ab	0.496±0.056	a
0.521	1.0	18.03±2.44	cd	34.25±0.95	e	3.45±2.33	a	14.03±3.59	abc	33.97±3.31	b	12.65±6.29	a	0.543±0.045	a
0.625	0.4	19.17±0.35	d	31.93±0.66	bcd	5.51±2.55	a	16.13±2.73	ab	37.57±3.61	ab	18.47±6.65	ab	0.509±0.068	a
0.625	0.7	10.10±1.80	a	33.54±1.48	de	4.34±1.23	a	15.69±0.92	ab	36.23±0.85	ab	15.38±3.71	ab	0.465±0.040	a
0.625	1.0	14.67±3.56	bc	34.74±1.55	e	3.19±1.55	a	14.89±1.13	ab	36.89±2.28	ab	11.81±4.62	ab	0.494±0.059	a
0.729	0.4	10.53±2.15	a	25.22±2.21	a	7.05±1.31	a	9.83±3.10	c	27.42±3.68	c	36.26±3.50	c	0.444±0.110	a
0.729	0.7	12.70±2.00	ab	29.04±2.45	b	6.32±2.96	a	13.26±2.22	bc	32.30±2.83	bc	25.31±11.90	b	0.473±0.011	a
0.729	1.0	15.73±1.72	bcd	32.15±0.93	cde	5.02±1.41	a	15.26±1.97	ab	35.77±1.93	ab	18.01±2.86	ab	0.456±0.059	a

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่อเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีผลกระทบมากกว่าความเร็วอากาศ โดยหากพิจารณาเฉพาะ 2 พารามิเตอร์นี้ ควรอบแห้งเนื้อลำไยด้วยความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดในช่วง 0.521-0.625 วัตต์.เซนติเมตร² และความเร็วอากาศในช่วง 0.4-0.7 เมตร.วินาที⁻¹

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (nonlinear regression) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เพราะมีค่า R² สูงสุดเท่ากับแบบจำลอง Modified Page โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9606–0.9913 แต่แบบจำลอง Page มีค่า c² ต่ำกว่าจึงเลือกแบบจำลอง Page เพื่อแสดงพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด รูปที่ 6 แสดงความสอดคล้องของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและการทำนายโดยแบบจำลอง Page ที่ความเร็วอากาศ 0.4 เมตร.วินาที⁻¹ ซึ่งชี้ให้เห็น

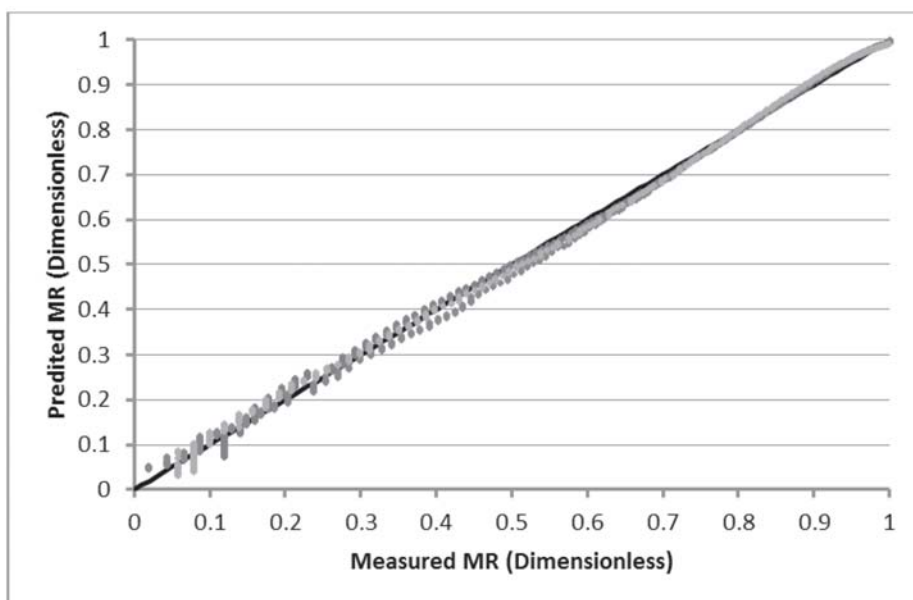
ว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายกระจายอยู่รอบ ๆ เส้นตรงแสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ (13) ศึกษาพบว่าแบบจำลอง Page เหมาะสมกับการอบหม้อหั่วใหญ่หั่นแว่นหนา 6±0.1 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรด และงานวิจัยของ (18) ที่อบแห้งมันเทศหั่นเต๋ขนาด 10, 17.5 และ 25 มิลลิเมตร แบบเยือกแข็งร่วมกับรังสีอินฟราเรด ส่วน (17) พบว่าแบบจำลอง Asymptotic หรือ Logarithmic ($MR = a_0 + a \cdot \exp(-kt)$) เหมาะสมกว่าเมื่ออบแห้งหม้อหั่วใหญ่ หั่นแว่นหนา 6±0.01 มิลลิเมตร ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ในขณะที่ (30) ศึกษาพบว่าแบบจำลอง Midilli et al. ($MR = a \cdot \exp(-kt^N) + b \cdot t$) เหมาะสมกับการอบแครอทหั่นชิ้นหนา 1–2 มิลลิเมตร ด้วยรังสีอินฟราเรดความยาวช่วงคลื่น 2–3.5 ไมโครเมตร ซึ่งจัดเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ถึงช่วงกลาง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้แบบจำลอง Page ซึ่งมีรูปแบบการง่ายกว่าก็สามารถอธิบายพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของเนื้อลำไยได้แล้ว จึงไม่จำเป็นที่จะต้องศึกษาแบบจำลองอื่น ๆ ซึ่งมีระดับความยากและความซับซ้อนมากกว่า

3.4 คุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้ง

ผลการตรวจวัดคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งในสภาวะที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.เซนติเมตร² กับความเร็วของอากาศที่ระดับ 0.4, 0.7 และ 1.0 เมตร.วินาที⁻¹ ชี้ให้เห็น

ว่าความชื้นลำไยแห้งส่วนใหญ่มีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 136/2546 นั่นคือมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 w.b. (22) โดยมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วน้ำของอากาศ (ตารางที่ 3) เนื่องจากความเร็วของอากาศจะเป็นตัวกลางพาความร้อนจากฮีตเตอร์ออกไปกับอากาศชื้น ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน (heat loss) และแปรผกผันกับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด สำหรับค่า a_w (ตารางที่ 5) มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติในทุกสภาวะการอบแห้ง และผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 136/2546 ซึ่งกำหนดว่าผลไม้อบแห้งจะต้องมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตีไม่เกิน 0.75 ส่วนค่าความสว่าง (L^*) มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้น ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าลดลง ยกเว้นที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.729 วัตต์.เซนติเมตร⁻² ซึ่งมีค่า

b^* เพิ่มขึ้น หากความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นจาก 0.521 เป็น 0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² ค่า L^* ของเนื้อลำไยแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นลง ส่วนค่า a^* , b^* , “E*ab (ค่าสีรวม)” และค่าเจดสีมีค่าลดลง แต่หากความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเพิ่มขึ้นจาก 0.625 เป็น 0.729 วัตต์.เซนติเมตร⁻² ค่า L^* ของเนื้อลำไยแห้งมีค่าลดลง เนื่องจากได้รับความร้อนมากเกินไป ทำให้เนื้อลำไยเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง (non-enzymatic browning) ค่าเจดสีมีค่าอยู่ในช่วง 11-36 องศาซึ่งแสดงให้เห็นว่าเนื้อลำไยแห้งมีค่าเข้าใกล้ค่าความเป็นสีแดงมากกว่าสีเหลืองหรือบ่งชี้ถึงวัตถุดิบสีน้ำตาลอ่อนนั่นเอง ผลของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงาน (31) ที่อบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อน 55 องศาเซลเซียสรวมรังสีอินฟราเรด 0.6, 0.9 และ 1.2 วัตต์.เซนติเมตร⁻²



รูปที่ 6 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง Page ที่ระดับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ และ ความเร็วอากาศ 0.4 m/s

การเปรียบเทียบผลการวิจัยนี้กับงานของ (32,33) ซึ่งอบแห้งเนื้อลำไยพันธุ์และขนาดเดียวกันด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ พบว่าค่า L^* , a^* และ b^* มีค่าลดลงเมื่อเนื้อลำไยได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น โดยเนื้อลำไยแห้งที่อบด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ มีค่า L^* อยู่ในช่วง 53.00-56.93 ค่า a^* อยู่ในช่วง 3.79-5.34 และค่า b^* อยู่ในช่วง 14.06-15.52 และสีของเนื้อลำไยแห้งมีสีน้ำตาลเข้ม ทั้งนี้อาจเกิดจากคลื่นไมโครเวฟไปเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำภายในเนื้อลำไยเกิดการหมุนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ผลของการหมุนนี้ทำให้เกิดการเสียดสีของโมเลกุลของน้ำภายในอาหาร สีของเนื้อลำไยแห้งจึงมีสีน้ำตาลเข้มเนื่องจากได้รับความร้อนสูง ในขณะที่การอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดนั้นเนื้อลำไยแห้งจะมีสีน้ำตาลอ่อนออกเหลืองทอง เนื่องจากความร้อนจากรังสีอินฟราเรดเพียงแค่นี้ทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุต้นและเกิดความร้อนขึ้น ทำให้อุณหภูมิภายในตัวของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิววัสดุที่กำลังอบอยู่จึงแห้งทั้งภายในและภายนอกในเวลาเกือบเท่ากัน ด้วยคุณสมบัติของการเกิดความร้อนที่ผิวของอาหารอย่างรวดเร็วนี้เองจึงช่วยให้สีของผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

จึงสรุปได้ว่าหากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสี ควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² และเมื่อพิจารณาร่วมกับเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 0.7 เมตร.วินาที⁻¹ ถึงแม้ความเร็ว 0.4 เมตร.วินาที⁻¹ จะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งมีค่าต่ำกว่ามาก แต่ความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากความดันไอน้ำในเนื้อลำไยกับความดันไอน้ำของอากาศที่ความเร็วดังกล่าวมีค่าสมดุลกัน ทำให้ความชื้นของเนื้อลำไยไม่สามารถลดลงได้ต่ำกว่านี้

4. สรุปผลการทดลอง

อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.เซนติเมตร⁻² และความเร็วอากาศ 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 เมตร.วินาที⁻¹

ต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพันธุ์อีดอเกรด A ซึ่งให้เห็นว่า การเพิ่มความความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดร่วมกับการใช้ความเร็วลมระดับต่ำ ๆ มีผลทำให้ความชื้นของเนื้อลำไยลดลงอย่างรวดเร็วภายในเวลาอันสั้น ส่งผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดมีผลทำให้ค่า L^* , a^* และ b^* มีค่าลดลง มุมเฉดสีบ่งบอกว่าเนื้อลำไยแห้งมีสีน้ำตาลอ่อน หากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสีที่สุดควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.เซนติเมตร⁻² เมื่อพิจารณาร่วมกับเวลาในการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และความชื้นสุดท้ายของเนื้อลำไยก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 0.7 เมตร.วินาที⁻¹ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งชั้นบางของ Page สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งสามารถนำค่าคงที่ที่ได้จากการศึกษานี้ไปใช้ประโยชน์ในการทำนายความชื้นของเนื้อลำไย ณ เวลาการอบแห้งต่าง ๆ ได้ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบระบบควบคุมการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่ประกอบด้วยการตั้งค่าอุณหภูมิในการอบ การตั้งเวลาในการอบ รวมถึงระบบตัดความร้อนเมื่ออุณหภูมิได้ตามที่กำหนด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับ สกว. ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทรัพยากรต่าง ๆ ในการดำเนินงาน และขอขอบคุณนางสาวดวงกมล ฟองสินธุ์ นางสาวเนตรศุภา สีหามารด และนายพัฒนพงษ์ บุญยศักดิ์ไพศาล ที่ช่วยเก็บข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Sakai, N. and T. Hanzawa. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. and Tech.* 5: 357-362.
- (2) Nowak, D. and P. P. Lewicki. 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Sci. and Emerging Tech.* 5: 353-360.
- (3) Hall, C.W. 1962. Theory of infrared drying. *Trans. ASAE* 5: 14-16.
- (4) Farhat, A., S. Kooli, A. Fadhel, Ch. Kerkeni, M. Maalej and A. Belghith. 2000. Drying agricultural products by radiation and convection. Drying agricultural products by radiation and convection. *Proc. Mediterranean Conf. Environ. Solar*, pp.189-194.
- (5) Mongpraneet, S. 2003. Drying characteristics of a far infrared heater combined vacuum operation. Unpub. Ph.D. dissertation. Ehime University, Matsuyama, Japan. pp 106.
- (6) Adonis, M. and M.T.E. Khan. 2004. Combined convective and infrared drying model for food applications. *IEEE AFRICON 2004*: 1049-1052.
- (7) อัมไพศัคดี ทิบุญมา ธนภัทร สุวรรณภูมิ และ สมชาติ โสภณธรรมฤทธิ์. 2549. การอบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรด. *วิศวกรรมสาร มข.* 33(2): 169-180.
- (8) Wadsworth, J. I., L. Velupillai, and L. R. Verma. 1990. Microwave-vacuum drying of parboiled rice. *Trans. ASAE* 33(1): 199-210.
- (9) Krishnamurthy, K., H.K. Khurana, S.J.J. Irudayaraj and A. Demirci. 2008. Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive Reviews in Food Sci. and Food Safety* 7: 1-13.
- (10) Dagerskog, M. 1979. Infra-red radiation for food processing: II. Calculation of heat penetration during infra-red frying of meat products. *LWT* 12: 252-257.
- (11) Hebbar, H. U. and N. K. Rastogi. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47: 1-5.
- (12) Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Far infrared-vacuum and -convection drying of welsh onion. *Trans. ASAE* 45(5): 1529-1555.
- (13) อัมไพศัคดี ทิบุญมา และ ธนภัทร สุวรรณภูมิ. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด. *วิศวกรรมสาร มข.* 34(2): 189-201.
- (14) สุนทร สืบคำ. 2554. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การอบแห้งเนื้อไก่ด้วยรังสีอินฟราเรด. เสนอสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- (15) Sharma, G.P., R.C. Verma and P. Pathare. 2005. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices. *J. Food Eng.* 71: 282-286.
- (16) Tana, M., K.J. Chuab; A.S. Mujumdarb and S.K. Choub. 2001. Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. *Drying Tech.* 19(9): 2193-2207.
- (17) Kemp, I.C., B. Christran Fyhr, S. Laurent, M.A. Roques, C.E. Groenewold, E. Tsotsas, A.A. Sereno, C.B. Bonazzi, J-J. Bimbenet and M. Kind. 2001. Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying Tech.* 19(1): 15-34.
- (18) AOAC. 1995. AOAC Official Method 978.18 (Location no. 42.1.03): Water Activity of canned vegetable. In *Official Methods of Analysis of the Assoc. of Official Analytical Chemists*, 16thed. VA., USA.: AOAC.
- (19) Jain, D. and P.B. Pathare. 2004. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. *Biosystems Eng.* 89: 289-296.

- (20) Lin, Y-P., J-H. Tsen and V. An-Erl King. 2005. Effects of far-infrared radiation on the freeze-drying of sweet potato. *J. Food Eng.* 68: 249-255.
- (21) Waewsak, J., S. Chindaruksa and C. Punlek. 2006. A mathematical modeling study of hot air drying for some agricultural products. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.* 11(1): 14-20.
- (22) Lee, G., W. S. Kang and F. Hsieh. 2004. Thin-layer drying characteristics of chicory root slices. *Trans. ASAE* 45(5): 1619-1624.
- (23) Pakowski, Z. and A.S. Mujumdar. 1995. Basic process calculations in drying. In *Handbook of industrial drying*, 2nd ed., ed. A. S. Mujumdar, ch. 3, 71-111. New York: Marcel Dekker, Inc.
- (24) Shishegarha, F., J. Makhlof and C. Ratti. 2002. Freeze-drying characteristics of strawberry. *Drying Tech.* 20(1): 131-145.
- (25) สืบสกุล จินดาพล อนุรักษ์ ปิตรีกษ์สกุล และกมลทิพย์ สัจจานันตกุล. 2547. การออกแบบการทดลองในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำร้อน. *ว.วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ* 14(4): 45-52.
- (26) สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2546. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลไม้อบแห้ง: มพข.136/2546. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: http://www.nectec.or.th/courseware/siamculture/otop\tis\tcp s136_46.pdf
- (27) Abe, T. and T.M. Afzal. 1997. Thin-layer infrared radiation drying of rough rice. *J. agric. Engng Res.* 67: 289-297.
- (28) Afzal, T.M. and T. Abe. 1999. Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato. *Drying Technology* 17(1&2): 137-155.
- (29) Nowak, D. and P.P. Lewicki. 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 5: 353-360.
- (30) Togrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *J. Food Eng.* 77: 610-619.
- (31) Nathakaranakule, A., P. Jaiboon and S. Soponronnarit. 2010. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit. *J. of Food Engineering* 100: 662-668.
- (32) Achariyaviriya, A., S. Soponronnarit and J. Tiansuwan. 2001. Study of longan flesh drying. *Drying Technology* 19(9): 2315-2329.
- (33) Varith, J., P. Dijknarakul, A. Achariyaviriya and S. Achariyaviriya. 2007. Combined microwaved-hot air drying of peeled pongan. *J. of Food Engineering* 81: 459-468.