

จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

Drying kinetics and Quality of Longan Undergoing Combined Infrared–Convective Drying

ภราดร หนูทอง*, กอดขวัญ นามสงวน, ศิวะ อัจฉริยวิริยะ, และ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

*โทรศัพท์ 081-020-1237, e-mail: pound96@hotmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการอบแห้งที่มีต่อการอบแห้งและคุณภาพของเนื้อลำไย หลังการอบแห้ง โดยทำการอบแห้งลำไยพันธุ์ดอด้วยกำลังอินฟราเรดขนาด 300, 500 และ 700 W, อุณหภูมิลมร้อน 40, 60 และ 80°C และความเร็วม 0.5, 1.0 และ 1.5 m/s อบแห้งจนเหลือความชื้น 20% db พบว่า การอบแห้งลำไยเกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ในช่วง 13.074–64.554 m/h โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่ออุณหภูมิลมร้อนและความเร็วมเพิ่มขึ้น และในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นและค่าคงที่ของการอบแห้งอยู่ในช่วง 1.771×10^{-7} – 14.38×10^{-7} m²/h และ 0.026–0.221 h⁻¹ ตามลำดับ โดยค่าทั้งสองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่อความเร็วมเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์คุณภาพสีในระบบ CIE (L*, a* และ b*) และอัตราการคืนรูปของเนื้อลำไย พบว่า ขนาดกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วมไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง สีและอัตราการคืนรูป อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับเชื่อมั่น 95% โดยค่าสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองจะมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนแต่ค่าความเป็นสีแดงมีค่าต่ำกว่า และมีค่าอัตราการคืนรูปที่ใกล้เคียงกับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ทุกเงื่อนไขการอบแห้ง

Abstract

The objective of this research was to study the effect of drying conditions on the drying characteristics and quality of whole longan undergoing combined infrared–convective drying. Longan of the variety E–dor longans used in this study. The experimental were carried out at the infrared powers of 300, 500 and 700 W, air temperatures of 40, 60 and 80 °C and air velocities of 0.5, 1.0 and 1.5 m/s. The samples were dried until the final moisture content of 20% db. It was found that the infrared-convective drying of longan had taken place in both constant drying rate period and falling drying rate period. In the constant drying rate period, the mass transfer coefficient varied from 13.074 to 64.554 m/h. This value increased when infrared power increased but it decreased the increasing of air velocity and temperature. In drying falling rate period, the moisture diffusion coefficient and the drying constant varied from 1.77×10^{-7} to 14.38×10^{-7} m²/h and 0.026 to 0.221 h⁻¹, respectively. The effective moisture diffusivity and drying constant increased the increasing of infrared power and temperature, but the both values decreased the increasing of air velocity. The color change, in term of CIELAB parameter L*, a* and b*, and rehydration ratio were investigated. The value of L* and b* decreased the increasing of infrared power and temperature, but the L* and b* value increased the increasing of air velocity. The value of a* increased the increasing of temperature, but the infrared power and air velocity did not affect significantly on a* value. Rehydration ratio of dried longan flesh increased as infrared power and air temperature increased while air velocity did not affect significantly on rehydration ratio.

Key words: infrared-convective drying, drying kinetics, qualities

1. บทนำ

ลำไยอบแห้งแบบทั้งลูกและเนาะเป็นสินค้าที่ได้รับความนิยมและมีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด การอบแห้งทั้งสองรูปแบบ จะใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยมีแหล่งกำเนิดความร้อนมาจาก ฟืน หรือ แก๊ส LPG จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนค่อนข้างจะใช้เวลาอบแห้งที่ยาวนานส่งผลให้ต้อง ใช้พลังงานในปริมาณสูง จึงได้มีความพยายาม ศึกษา เพื่อ หาแนวทางการอบแห้งลำไยเพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง ไม่ว่าจะเป็นการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน [1] การใช้คลื่นอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน[2] หรือการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งร่วมกับลมร้อน [3] ส่วนใหญ่วิธีการเหล่านี้มาใช้กับการอบแห้งเนื้อลำไย ส่วนการอบแห้งลำไยทั้งลูกยังไม่มีการศึกษาวิจัยมากนักโดยยังคงใช้เทคนิคแบบเดิมๆ ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานและ ส่งผลให้เกิดการเสียหายของลำไยทั้งการแตกหรือการบวมได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้หาแนวทางการอบแห้งลำไยทั้งลูกเพื่อลดระยะเวลาอบแห้งด้วยการประยุกต์ใช้รังสีอินฟราเรด ร่วมกับลมร้อน

การอบแห้งลำไย ทั้งลูกนิยมอบแห้งด้วย ลมร้อนที่อุณหภูมิ 75–80°C และใช้เวลาอบแห้ง 48–52 h ซึ่งจะให้เนื้อลำไยมีคุณภาพดี โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวมสำหรับการอบแห้งลำไยทั้งลูกด้วยลมร้อน มีค่าอยู่ในช่วง 1.8378×10^{-7} – 1.4656×10^{-6} m²/h[4] สำหรับการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร อื่นๆ ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนนั้นนิยมนำมาอบแห้งกับวัสดุที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาไม่มาก ซึ่งพบว่าสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นรูปแบบสมการอาร์เรเนี่ยสสามารถทำนายการแพร่ความชื้นของเมล็ด มะม่วง หิมพานต์ สำหรับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดได้ดี[5] ในการอบแห้งหอมชอยด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน สมการอบแห้งแบบขั้นบางรูปแบบ Asymptotic หรือ Logarithmic ที่เป็นฟังก์ชันกับ ขนาดกำลังอินฟราเรด ความเร็วลม และอุณหภูมิ และสมการ Modified Page ที่ เป็น

ฟังก์ชันของอุณหภูมิอบแห้ง ความหนาของหอมและความเร็วลมสามารถทำนายการอบแห้งได้ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นอยู่ในช่วง 0.21×10^{-10} – 1.57×10^{-10} m²/s และมีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ในช่วง 5.06–10.63 kJ/mol โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งและกำลังอินฟราเรดทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นลดลง[6,7]

สำหรับคุณภาพสีและอัตราการ การคិនรูปของวัสดุหลังการอบแห้ง เมื่ออบแห้งข้าวเปลือกด้วยอินฟราเรดพบว่าค่า ความเป็นสีเหลืองจะเพิ่มขึ้นเมื่อ เพิ่มขนาดกำลังอินฟราเรด แต่ถ้ากำลังอินฟราเรดสูงเกินไปจะทำให้วัสดุเกิดการไหม้ [8] และการอบแห้งพริกแดง การเพิ่มขนาดกำลังอินฟราเรดและความเร็วลม ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าสีอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอัตราการคិនรูป ของวัสดุ จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดกำลังอินฟราเรดและลดความเร็วลม[9] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรด จะทำให้เกิดการขยายตัวของโครงสร้างภายในวัสดุส่งผลให้สามารถเพิ่มขนาดของรูพรุน เมื่อผ่านกระบวนการดูดน้ำกลับจึงดูดน้ำเข้าสู่วัสดุได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้ากำลังอินฟราเรด สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นที่ผิววัสดุและจะทำให้อัตราการคិនรูปลดลง [10] เห็นได้ว่า การอบแห้งลำไยด้วยลมร้อนจะสิ้นเปลืองทั้งเวลาและพลังงานค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องหาวิธีการอบแห้งลำไยแบบทั้งลูกที่สามารถลดระยะเวลา อีกทั้งลำไยที่ได้ต้องมีคุณภาพที่ใกล้เคียงกับลำไยอบแห้งที่มีขายในท้องตลาด โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขของการอบแห้งที่มีต่อการอบแห้ง คุณภาพทางด้านสีและอัตราการคិនรูปของเนื้อลำไยอบแห้ง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 อุปกรณ์ทดลองและวิธีการ

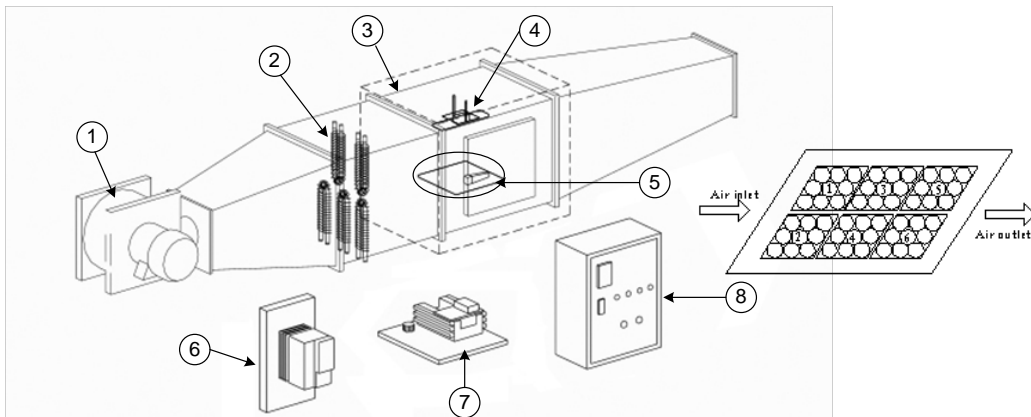
2.1.1 วิธีการทดลอง

การทดลองใช้ลำไยพันธุ์ดอที่มีขายตามท้อง ตลาด โดยคัดเลือกลำไยที่มี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25–30

mm ล้ำไยจะถูกมาบรรจูล้ำสูง และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5°C เพื่อรอการทดลอง

การศึกษานี้ได้ใช้เครื่องแห้งแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีขนาดห้องอบแห้ง 450x450x500 mm ภายในห้องอบแห้งได้ติดตั้งแท่งอินฟราเรดขนาด 210x60 mm กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1 kW สามารถปรับกำลังไฟฟ้า โดยวางขนานกับวัสดุให้มีระยะห่างกับผลิตภัณฑ์ 200 cm ทุกๆ การทดลอง ส่วนของ ลมร้อน จะใช้พัดลมความร้อนขนาด 6 kW เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและควบคุม อุณหภูมิด้วยเทอร์โมสตัส และใช้พัดลมแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหน้าขับด้วยมอเตอร์สามารถปรับความเร็วรอบได้เพื่อขับเคลื่อนอากาศภายในเครื่องอบแห้ง

นำล้ำไยที่เตรียมไว้วางบนถาดจำนวน 6 ตัวอย่างๆ ละ 9 ลูก ในระหว่างอบแห้งทำการบันทึกข้อมูลได้แก่ อุณหภูมิผิวอินฟราเรดด้วย Infrared thermometer อุณหภูมิอากาศเข้า /ออกที่ อุณหภูมิอากาศแวดล้อมด้วยดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์เชื่อมต่อกับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และพร้อมกับบันทึกความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 1 รายละเอียดและส่วนประกอบเครื่องอบแห้ง รังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (1 Blower, 2 Heaters, 3 Dryer, 4 Infrared heaters, 5 Tray, 6 Inverter, 7 Regulator, and 8 Controller)

2.2 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง

การศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของน้ำจะถูกอธิบายในรูปของจลนพลศาสตร์ การอบแห้งล้ำไยด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนจำเป็นต้อง พิจารณา ช่วงอัตราการอบแห้ง โดย ดูจากค่าอัตราส่วนความชื้นและอัตราการการอบแห้ง เทียบ กับเวลา เพื่อใช้แบ่ง ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

อากาศแวดล้อมด้วย Precision measuring instrument ควบคุมไปด้วย ภายในห้องอบแห้ง จะ บันทึกน้ำหนัก อุณหภูมิเนื้อและอุณหภูมิผิว ของตัวอย่าง โดยข้อมูลจะถูกบันทึกทุกๆ 15 นาที นาน 3 h จากนั้นทำการบันทึกทุกๆ 1 h ใน 4 h ถัดมา และทุกๆ 2 h อบแห้งจนตัวอย่างเหลือความชื้น 20% db ทำการอบแห้งที่ขนาดกำลังอินฟราเรดตั้งแต่ 300–700 W อุณหภูมิลมร้อน 40–80°C และความเร็วลม 0.5 1.0 และ 1.5 m/s ตามลำดับ และหาความชื้นของตัวอย่าง โดยวิธีการอบแห้งตัวอย่างด้วยตู้อบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C นาน 72 h

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นของล้ำไย พิจารณาจากสมการ $MR = (M_t - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$ แต่เนื่องจากการอบแห้งด้วยอินฟราเรดสามารถลดความชื้นได้จนล้ำไยมีความชื้นสมดุลที่ต่ำมาก จึงกำหนดให้ $M_{eq} = 0$ [6,7] จะได้

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (1)$$

เพื่อหาค่าความชื้นและเวลาวิกฤติ ที่แบ่งช่วงอัตราการอบแห้งทั้งสองออกจากกัน จากเส้นแนวโน้ม ของอัตราส่วนความชื้น ซึ่ง ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ความชื้นจะลดลงในลักษณะเส้นตรง และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเป็นช่วงท้ายของการอบแห้งที่มี แนวโน้มลักษณะเอ็กโปเนนเชียล จากสมการเส้นตรงที่ได้ นำมาใช้คำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด โดย

ความชื้นและเวลาวิกฤติจะพิจารณาจาก ของเส้นแนว โนม์ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ที่ให้ค่า R^2 สูงสุด

2.2.1 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การพามวล

ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ได้ คำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์การพามวล ที่เกิดจากการถ่ายเทมวล โดยอาศัยความแตกต่างของความดันไอน้ำระเหยเปียก และอากาศรอบๆ ผิวของวัสดุตั้งสมการที่ (2) [13]

$$m_w = h_D A M_w \frac{(P_{v,wb} - P_{v,\infty})}{RT_{abs}} \Delta t \quad (2)$$

2.2.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ได้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลว โดยอาศัยความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้นที่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของ Fick [13] ตั้งสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 D_{eff} M \quad (3)$$

สมมติฐานที่ว่าลำไยเป็นทรงกลม และไม่หดตัวระหว่างการอบแห้งแก้สมการสำหรับวัสดุทรงกลมได้ตั้งสมการ

$$MR = \frac{M}{M_i} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2}\right) \quad (4)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขต คือ

$$M(r, 0) = M_{in} \quad (5)$$

$$M(r, t) = M_{eq} \quad (6)$$

กรณีความชื้นลดลงแบบไม่เป็นเส้นตรง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นของวัสดุ ซึ่งมักเกิดกับที่วัสดุที่มีรูพรุนสูง [14] สามารถคำนวณโดยใช้วิธีการของความชื้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คำนวณจาก ค่าความชื้นของการทดลอง (dMR/dt) และความชื้นทางทฤษฎีที่คำนวณได้จากสมการที่ 7 ในรูปของ Fo (dMR/dFo) ที่เวลาอบแห้งเดียวกัน และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นตั้งสมการ

$$D_{eff} = \frac{(dMR/dt)_{experiment}}{(dMR/dFo)_{theory}} r^2 \quad (7)$$

2.2.3 การวิเคราะห์ค่าคงที่ของการอบแห้ง

ค่าคงที่ของการอบแห้งเป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี มีสมมติฐานว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะ

คงที่โดยแปรผันโดยตรงกับผลต่างของความชื้นของวัสดุ ซึ่งคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน โดยใช้รูปแบบสมการของ Lewis model

$$MR = \frac{M}{M_{in}} = \exp(-k t) \quad (8)$$

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพลำไยหลังการอบแห้ง

2.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางด้านสี

การวัดค่าสีของเนื้อลำไยได้ใช้เครื่องวัดสี รุ่น Color Quest XP Colorimeter โดยพิจารณาด้วยมาตรฐาน CIE อยู่ในรูปของค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ทำการวัดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.3.2 การวิเคราะห์อัตราการการคินตัว

การวิเคราะห์อัตราการดูดน้ำของเนื้อลำไยอบแห้งโดยนำตัวอย่างเนื้อลำไยอบแห้งมาชั่งน้ำหนักและแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90°C นาน 15 นาที นำตัวอย่างที่ผ่านการดูดกลืนน้ำมาชั่งน้ำหนักที่ผิวจนแห้งและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และคำนวณตั้งสมการ

$$RR = \frac{m_f}{m_d} \quad (9)$$

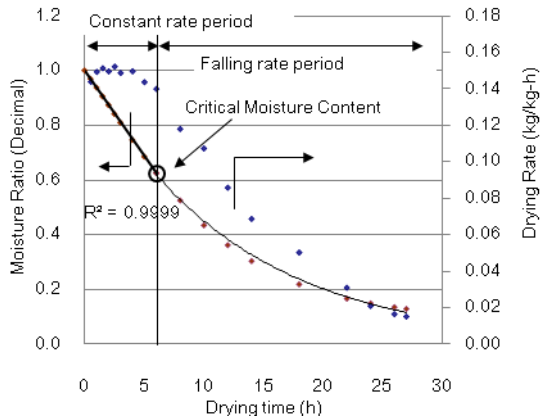
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยใช้วิธีการทดสอบของ Duncan โดยพิจารณาที่ระดับความน่าเชื่อมั่นที่ 95%

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 การแบ่งช่วงอัตราการอบแห้ง

รูปที่ 3 แสดงอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลาอบแห้ง เพื่อ แบ่งช่วงอัตราการอบแห้ง สำหรับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ที่ขนาดกำลังอินฟราเรด 500 W อุณหภูมิลมร้อน 60°C และความเร็วม 1.5 m/s พบว่า การอบแห้งลำไยในช่วงแรกความชื้นจะลดลงในลักษณะเส้นตรง และมีอัตราการระเหยของน้ำค้างที่โดยเกิดขึ้นนาน 6 h จนถึงความชื้น 147% db ซึ่งเป็นค่าความชื้นและเวลาวิกฤติของการอบแห้ง โดยให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.999 จากนั้นความชื้นจะลดลงในลักษณะ เอ็กโปเนนเชียล โดยที่อัตราการอบแห้งจะ ลดลงตลอดเวลา จนถึงสิ้นสุดการอบแห้ง และเมื่อเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการอบแห้งก็

ยังแสดงพฤติกรรมการอบแห้งเช่นเดียวกัน โดยมีค่าความชื้นและเวลาวิกฤติดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 พฤติกรรมการอบแห้งลำไย

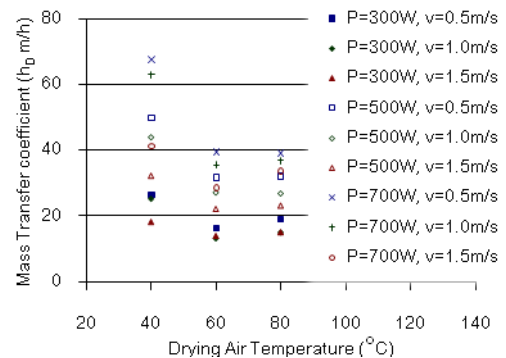
ตารางที่ 1 แสดงค่าความชื้นวิกฤติและเวลาวิกฤติสำหรับหาลอบแห้งลำไยด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน

PIR (W)	T _{di} (°C)	v (m/s)	M _{in} (%db)	MC (%db)	M _f (%db)	t _C (h)	t (h)
300	40	0.5	236.1	165.5	19.5	8	44
		1.0	235.3	157.4	27.1	10	52
		1.5	235.0	178.6	59.5	10	52
	60	0.5	236.6	180.2	24.6	6	37
		1.0	236.1	186.6	17.6	6	48
		1.5	227.8	184.4	42.3	6	50
	80	0.5	231.4	160.3	19.9	4	21
		1.0	227.1	157.9	20.4	5	26
		1.5	233.6	160.4	30.8	6	32
500	40	0.5	246.2	154.3	18.7	5	24
		1.0	237.3	162.6	17.8	5	32
		1.5	234.2	178.0	20.7	6	42
	60	0.5	231.9	140.4	19.0	6	20
		1.0	233.2	134.3	24.6	6	24
		1.5	235.1	147.1	25.1	6	27
	80	0.5	229.8	132.4	21.3	4	14
		1.0	235.9	145.1	22.3	6	16
		1.5	230.7	137.9	19.6	5	22
700	40	0.5	239.6	150.1	19.5	4	20
		1.0	244.2	174.5	19.5	4	22
		1.5	244.0	177.9	26.7	4	30
	60	0.5	231.3	134.9	18.9	5	15
		1.0	239.2	133.0	26.2	5	16
		1.5	230.6	134.0	22.1	5	20
	80	0.5	233.9	157.0	14.2	3	12

1.0	241.1	171.2	17.5	3	14
1.5	225.9	163.7	21.4	3	18

3.2 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การพามวล

รูปที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพามวลที่เกิดขึ้นในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ โดยค่าสัมประสิทธิ์การพามวลมีค่าในช่วง 13.07–67.55 m/h ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้น เพราะสามารถเพิ่มความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างวัสดุกับอากาศส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่มายังผิวได้เพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลจะมีค่าลดลง เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อน และความเร็วลม เพราะเมื่อลมร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำลดลง และหากมีการเพิ่มความเร็วลมด้วย ยิ่งส่งผลให้ความแตกต่างของความดันไอน้ำยิ่งลดลง อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้รูพรุนบริเวณผิววัสดุเกิดการหดตัว

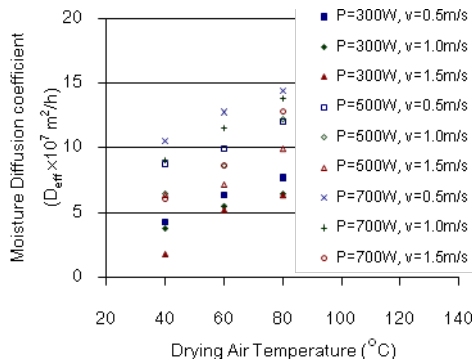


รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การพามวลของการอบแห้งลำไย

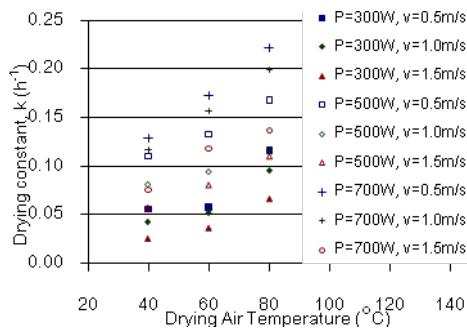
3.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและค่าคงที่ของการอบแห้ง

รูปที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (ก) และค่าคงที่ของการอบแห้ง (ข) โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและค่าคงที่ของการอบแห้ง มีค่าในช่วง $1.77 \times 10^{-6} - 15.82 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ และ $0.026 - 0.221 \text{ h}^{-1}$ ตามลำดับ ค่าทั้งสองจะสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนเนื่องจากอินฟราเรดสามารถเพิ่มความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างวัสดุและอากาศ ทำให้ความชื้นสามารถแพร่ออกมาได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน การเพิ่มกำลังอินฟราเรด และอุณหภูมิลมร้อนเป็นการ

เพิ่ม ความแตกต่างของความดันไอน้ำ จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและค่าคงที่ของการอบแห้งเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเร็วลม เพิ่มขึ้นเป็นการลดความแตกต่างของความดันไอน้ำ ซึ่ง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและค่าคงที่ของการอบแห้งลดลง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นโดยรวม (ก) และค่าคงที่ของการอบแห้ง (ข) ของการอบแห้งลำไย

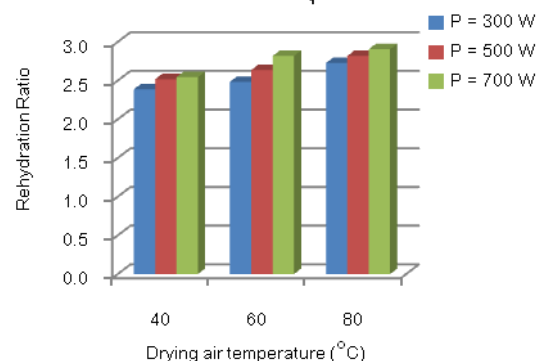
3.4 คุณภาพของลำไยหลังการอบแห้ง

คุณภาพ ทางด้านสี และอัตราการคืนรูปของเนื้อลำไยพิจารณาที่ความชื้นประมาณ 20% db โดยค่าสีเริ่มต้นของเนื้อลำไยสด ได้แก่ ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดงและสีเหลืองเท่ากับ 43.27 ± 2.46 , 1.22 ± 0.67 และ 15.33 ± 1.47 ตามลำดับ

จากการอบแห้งคุณภาพสีของเนื้อลำไย พบว่า จะมีค่าความสว่างเท่ากับ 27.55–41.65 ค่าความเป็นสีแดง 9.15–15.83 และค่าความเป็นสีเหลือง 18.23–40.86 โดยค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่ค่าความเป็นสีแดงต่ำกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากการอบแห้งวิธีนี้

สามารถเพิ่มอุณหภูมิเนื้อลำไย ได้สูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ขนาดกำลังอินฟราเรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยไม่มากนัก ที่ขนาดกำลังอินฟราเรดสูงๆ จะให้ค่าความสว่างลดลงส่งผลให้ลำไยอบแห้งมีเนื้อค่อนข้างคล้ำดังตารางที่ 2 ส่วนอุณหภูมิร้อนจะมีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองโดยมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิร้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิร้อนต่างๆ จะมีผลต่อค่าความสว่างและความเป็นสีแดงเพียงเล็กน้อย ดังตารางที่ 3 ส่วนกรณีของความเร็วลมจะมีผลต่อค่าความเป็นสีเหลือง โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น โดยความเร็วลมมีผลต่อค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงไม่มากนัก ดังตารางที่ 4

ค่าอัตราการคืนรูปของเนื้อลำไย ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.89–3.29 แสดงดังตารางที่ 2–4 โดยมีค่าใกล้เคียงกับลำไยอบแห้งด้วยลมร้อนตามท้องตลาด (สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และความเร็วลม 0.7 m/s โดยมีค่าอัตราการคืนรูปกับ 2.70 ± 0.21) จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความน่าเชื่อมั่นที่ 95% พบว่า ขนาดกำลังอินฟราเรด อุณหภูมิร้อนและความเร็วลมไม่มีผลต่ออัตราการคืนรูปอย่างมีนัยสำคัญ โดยรังสีอินฟราเรดและอุณหภูมิร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการคืนรูปเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของกำลังอินฟราเรดที่จะทำให้โครงสร้างภายในวัสดุ ส่งผลให้รูพรุนเกิดการขยายตัว ซึ่งเกิดจากการดันตัวของความดันภายในวัสดุที่พยายามดันตัวออกมา[11,13] แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิร้อนและกำลังอินฟราเรดสูงขึ้นไป จะทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างของวัสดุ



รูปที่ 6 ค่าอัตราการคืนรูปของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งที่ความเร็วลม 1.0 m/s

ตารางที่ 2 อิทธิพลของกำลังอินฟราเรดที่มีต่อคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งที่ $T=40^{\circ}\text{C}$ และ $v=1.0$ m/s

กำลังอินฟราเรด (W)	Rehydration Ratio (RR)	Brightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)
300	2.39±0.51 ^a	35.35±6.27 ^a	12.91±4.95 ^b	39.12±5.51 ^c
500	2.52±0.51 ^a	36.14±6.48 ^a	14.09±4.56 ^b	35.51±9.05 ^b
700	2.55±0.17 ^a	35.16±5.48 ^a	11.29±2.32 ^a	25.72±9.43 ^a

a, b, c อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

ตารางที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิความร้อนที่มีต่อคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งที่ $P_{IR}=300$ W และ $v=1.0$ m/s

อุณหภูมิร้อน ($^{\circ}\text{C}$)	Rehydration Ratio (RR)	Brightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)
40	2.39±0.51 ^a	35.35±6.27 ^b	12.91±4.95 ^a	39.12±5.51 ^d
60	2.48±0.16 ^a	33.71±4.39 ^b	14.09±2.72 ^{bc}	35.91±7.64 ^c
80	2.73±0.12 ^a	37.36±2.93 ^c	14.74±2.11 ^c	28.73±5.37 ^b
80*	2.70±0.21 ^a	18.27±4.14 ^a	17.53±2.74 ^d	22.57±5.03 ^a

a, b, c, d อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

* ผลของคุณภาพของเนื้อลำไยสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ความเร็วลม 0.7 m/s

ตารางที่ 4 อิทธิพลของความเร็วลมที่มีต่อคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้ง ที่ $P=300$ W และ $T_{d1}=40^{\circ}\text{C}$

ความเร็วลม (m/s)	Rehydration Ratio (RR)	Brightness (L*)	Redness (a*)	Yellowness (b*)
0.5	2.64±0.36 ^a	33.27±5.67 ^a	12.49±3.19 ^a	25.48±8.19 ^a
1.0	2.52±0.51 ^a	36.14±6.48 ^b	14.09±4.56 ^b	35.51±9.05 ^b
1.5	2.46±0.47 ^a	37.22±4.91 ^b	13.86±4.20 ^{ab}	38.68±7.78 ^c

a, b, c อักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95%

4 สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งลำไยทั้งลูก ด้วยอินฟราเรดร่วมกับลมร้อนปรากฏช่วงอัตราการอบแห้งคือช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ค่าสัมประสิทธิ์การพามวลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดกำลังอินฟราเรดเพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิร้อนและความเร็วร้อนเพิ่มขึ้น และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นและค่าคงที่ของการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิร้อนเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์คุณภาพเนื้อลำไย พบว่า เมื่อกำลังอินฟราเรดและอุณหภูมิร้อนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองลดลง แต่กำลังอินฟราเรดไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงอย่างมี

นัยสำคัญ และเมื่ออุณหภูมิร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น และเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงอย่างมีนัยสำคัญ และจากการพิจารณาอัตราการคืนรูปพบว่า กำลังอินฟราเรด อุณหภูมิร้อนและความเร็วลม ไม่มีผลต่ออัตราการคืนรูปอย่างมีนัยสำคัญ

สัญลักษณ์

A	พื้นที่รับความร้อน (m^2)
D_{eff}	สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/h)
Fo	Fourier number, $Fo = D_{\text{eff}} t/r^2$
MC	ความชื้นวิกฤติ (%db)
M_f	ความชื้นสุดท้าย (%db)
M_{in}	ความชื้นเริ่มต้น (%db)

M_w	มวลโมเลกุล (kg/kmol)
P_{IR}	กำลังอินฟราเรด (W)
$P_{V,wb}$	ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวของวัสดุ (kPa)
$P_{V,\infty}$	ความดันไอน้ำในอากาศ (kPa)
R	ค่าคงของก๊าซ มีค่า 8.314 kJ/kmol-K
T_{abs}	อุณหภูมิสัมบูรณ์ของลมร้อน (K)
a^*	ค่าความเป็นสีแดง
b^*	ค่าความเป็นสีเหลือง
h_D	ค่าสัมประสิทธิ์การพามวล (m/h)
k	ค่าคงที่ของการอบแห้ง (h^{-1})
L^*	ค่าความสว่าง
m_d	น้ำหนักของเนื้อลำไยก่อนผ่านกระบวนการคั่ว
m_f	น้ำหนักของเนื้อลำไยหลังผ่านกระบวนการคั่ว
m_v	มวลไอน้ำ (kg)
r	รัศมีของวัสดุ (m)
t	เวลาอบแห้ง (h)
t_C	เวลาวิกฤติ (h)
v	ความเร็วลม (m/s)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนอุปกรณ์และทุนสำหรับการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Varith, J., Dijkanarukkul, P., Achariyaviriya, A., Achariyaviriya S. (2007). Combined microwave-hot air drying of peeled longan, Journal of Food Engineering Vol. 81, pp. 459–468.

[2] นริศ พัวพันวิวัฒน์, ภราดร หนูทอง, กอดขวัญ นามสงวน, ศิระ อัจฉริยวิริยะ และอารีย์ อัจฉริยวิริยะ , (2551). จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน , เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, 15–17 ตุลาคม 2551, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

[3] ปิยะวรรณ มาศิริ และ ยวนารี นามสงวน. (2550). อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อลำไยแบบคว้านเมล็ดออกภายใต้การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดและลมร้อน, วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, ปีที่ 38 ฉบับที่ 5 (พิเศษ), หน้า 375 - 378

[4] Achariyaviriya, A., Soponronnarit, S. and Tiansuwan, J. (2001). Study of Longan Flesh Drying. Drying Technology, Vol. 19, pp.2315-2329.

[5] Hebbar, H.U., and Rastogi, N.K., (2001). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel, Journal of Food Engineering, Vol.47, pp.1–5.

[6] Jain, D. and Pathare, P.B. (2004). Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices, Biosystems Engineering, Vol.89, pp.289-296.

[7] Pathare, P.B. and Sharma, G.P. (2006). Effective moisture diffusivity of onion slices undergoing infrared convective drying, Biosystems Engineering, Vol. 93, pp. 285–291.

[8] Das, I., Das, S.K. and Satish Bal, S. (2004). Specific energy and quality aspects of infrared (IR) dried parboiled rice, Journal of Food Engineering, Vol. 62, pp. 9–14.

[9] Nasiroglu, S. and Kocabiyik, H. (2009). Thin-layer infrared radiation drying of red pepper slices, Journal of Food Process Engineering, Vol.32, pp.1–16.

[10] Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. Journal of Food Engineering, Vol.55, pp.147–156.

[11] Sharma, G.P., Verma, R.C. and Pathare, P.B. (2005). Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices, Journal of Food Engineering, Vol. 71, pp. 282–286.

[12] Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W., and Hall, C.W. (1992). Drying and storage of grains and oilseeds, AVI, USA, pp. 206–215.

[13] Thuwapanichayanan, R., Prachyawarakorn, S. and Soponronnarit, S. (2008). Drying characteristics and quality of banana foam mat, Journal of Food Engineering, Vol. 86, pp.573–583.