



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสี
อินฟราเรด

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ
(เดิม โหม่งปราณีต)

กรกฎาคม 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ (เดิม โหม่งปราณีต)

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงาน

กองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับ สกว. ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทรัพยากรต่าง ๆ ในการดำเนินงาน และขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิศวกรรมเกษตร และสาขาวิศวกรรมอาหาร ที่ช่วยเก็บข้อมูล

1. นางสาวเพชรสุรางค์ เจริญศิลป์
2. นางสาวศิริพร ปัญญาจักร
3. นางสาวกิงแก้ว อยู่มาก
4. นางสาวอรทัย ชัยศิลป์บุญ
5. นางสาวดวงกมล ฟองสินธุ์
6. นางสาวเนตรผกา สีหาคารถ
7. นายพัฒน์พงษ์ บุญยศศักดิ์ไพศาล
8. นายทินกร หินเดช
9. นายไท ศุภลักษณ์การ
10. นายศรัณย์ ศิริจันทร์ชื่น

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : MRG4780067

ชื่อโครงการ : การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

ชื่อนักวิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ (เดิม โมงปราณีต)

อีเมล : sunate@mju.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กรกฎาคม 2547 ถึง 30 มิถุนายน 2549

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีอากาศเป็นตัวกลางในการพาไอน้ำออกจากห้องอบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยเพื่อกำหนดสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม เพื่อศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้ง โดยคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ผลการศึกษาดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งต่อการออกแบบ และการปฏิบัติงานเกี่ยวกับเครื่องอบ วัสดุทดสอบคือเนื้อลำไยพันธุ์ตอ เกรด A (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 – 28 มม.) ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 มาตรฐานเปียก (w.b) อบแห้งเหลือความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 w.b ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 จัดการทดลองเป็นแบบชั้นบาง ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ๆ ละประมาณ 500 กรัม ผลการศึกษาพบว่า การอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดมีความเป็นไปได้ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเพียง 2 ชั่วโมง 25 นาที คิดเป็นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 21.65 กิโลจูลน์ต่อกรัม น้ำที่ระเหย เมื่ออบในสภาวะที่เหมาะสมพร้อมกับการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ร้อยละ 40 โดยลำไยแสดงระยะการอบแห้ง 2 ระยะ คือ ระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิตเป็นระยะเวลาดำเนิน ๑ และระยะอัตราการอบแห้งลดลง โดยอัตราการอบแห้งจะเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดประมาณ 80 กรัมต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ภายในเวลา 20 นาที การศึกษาลักษณะเฉพาะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดจากฮีเตอร์แบบหลอดคู่ที่มีความยาวใช้งาน 300 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มม. ขนาด 500 วัตต์ พร้อมคอมสเกทอนรังสีชนิดวางในแนวนอนแบบหลอดคู่ ขนาด 125 x 45 x 315 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด ซึ่งแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นช่วงกลาง (MIR) อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 ไมโครเมตร โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเนื้อลำไยกับผิวของฮีเตอร์อินฟราเรด 25 ซม. การศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.ซม⁻² และความเร็วอากาศเหนือวัสดุที่กำลังอบแห้ง 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ พบว่า แบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมการลดความชื้นของเนื้อลำไย หากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสีที่ดีที่สุดควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.ซม⁻² และเมื่อพิจารณาพร้อมกับเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 0.7 ม.วินาที⁻¹ จึงควรมีการศึกษาการนำลมร้อนมาใช้ร่วมกับรังสีอินฟราเรดโดยพิจารณาทั้งระบบตั้งแต่

ระบบการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และควมมีประสิทธิภาพทางด้าน
ค่าใช้จ่าย

คำหลัก : รังสีอินฟราเรด เนื้อลำไย การอบแห้ง

Abstract

Project Code : MRG4780067

Project Title : Infrared Drying of Longan Flesh

Investigator : Assistant Professor Dr.Sunate Surbkar (former Mongpraneet)

E-mail Address : sunate@mju.ac.th

Project Period : 1 July 2004 – 30 June 2006

The major objective of this research was to study the feasibility of drying longan flesh by infrared radiation (IR). The minor objectives were to determine the drying optimum; and to investigate a suitable model for thin layer drying of longan flesh in which the dried longan qualities were taken in to account. These broad results are needed in the design and operation of a dryer. 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. A thin layer drying was done triplicate with an initial weight of longan flesh of approximately 500 g. The results indicated that it was possible to dry longan flesh with IR. When drying at optimum condition with 40% of hot air recovery drying time was 2 hr 25 min, resulted the specific heat consumption of 21.65 kJ per a kilogram of water evaporated. We observed two rate periods when using IR drying on longan flesh, i.e., the warming up existed in the initial period for a short time and falling drying period. The drying rate started from zero and continued to raise to the maximum at 80 grams of evaporated water per a kilogram of longan flesh dry matter within 20 min. A study on drying characteristics of longan flesh was also done 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 following 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. Drying rates were used to determine an appropriate empirical longan flesh drying model considering from the goodness-of-fit between the calculated and experimental moisture ratios; namely the coefficient of determination (R^2), the reduced chi-square (χ^2) and the root mean square error (RMSE). It was found that the Page Model described the

moisture loss within acceptable ranges. We recommended the IR intensity of 0.625 W.cm^{-2} for a better quality in term of color values. When drying time and the specific energy consumption taken into account, we conclude the air velocity of 0.7 m.s^{-1} . However, we recommended the further research topic of the combination between IR and convective drying toward the drying and energy requirements and cost effectiveness.

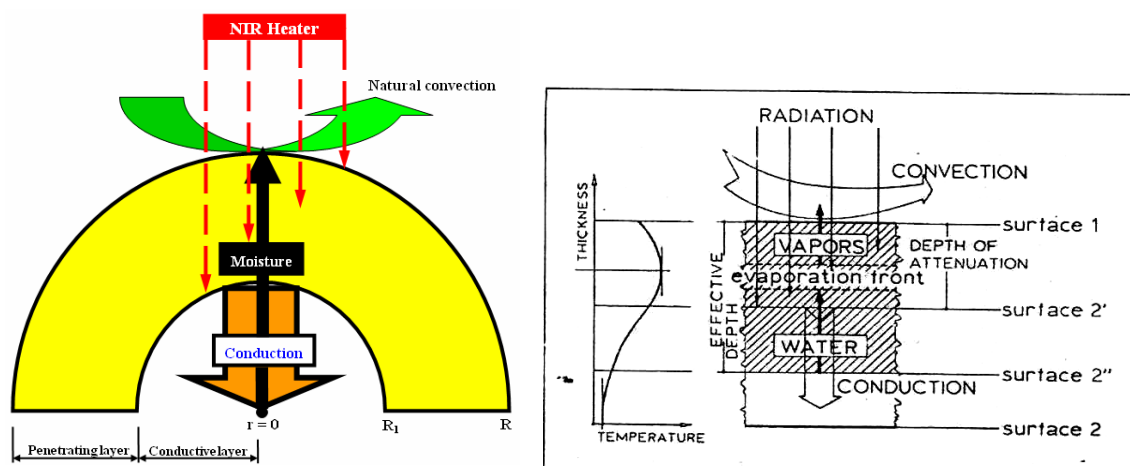
Keywords : Infrared radiation, Longan Flesh, Drying

การศึกษาความเป็นไปได้ในการอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีความสำคัญในเขตภาคเหนือ ปลูกมากในเขตจังหวัดลำพูน เชียงใหม่ และเชียงราย มีพื้นที่เพาะปลูกรวมทั้งสิ้นประมาณ 500,000 ไร่ (จรรยา, 2549) ลำไยจึงเป็นผลไม้ส่งออกสำคัญของไทย และเป็น 1 ใน 4 ของสินค้าดาวรุ่ง (Product champion) ที่รัฐบาลให้การสนับสนุนและส่งเสริมอย่างจริงจัง เป็นพืชส่งออกที่ทำรายได้สูงสุดของประเทศชนิดหนึ่ง การส่งออกอยู่ในรูปลำไยสด 58.73 % ลำไยแช่แข็ง 1.42 % และลำไยอบแห้ง 39.85 % (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2546) จากตัวเลขดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการแปรรูปลำไยเป็นผลิตภัณฑ์โดยวิธีอบแห้ง การอบแห้งผลลำไยสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การอบแห้งผลลำไยทั้งเปลือก และการอบแห้งเนื้อลำไยซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพในการส่งออกไปยังประเทศที่มีรายได้สูงซึ่งต้องการบริโภคสินค้าที่มีคุณภาพสูง

การอบแห้งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิทยาการแบบใหม่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือมนุษย์สร้างขึ้น ช่วงความยาวคลื่นที่นิยมนำมาใช้ในการอบแห้งในปัจจุบันได้แก่ ช่วงความถี่ที่นิยมนำมาใช้ในการอบแห้งคือ ช่วงรังสีอินฟราเรดซึ่งมีความยาวคลื่นช่วง 0.75 – 1000 ไมครอน (μm) คลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ซึ่งมีความยาวคลื่นช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 1 เมตร และคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency, RF) ซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่า 1 เมตร รังสีอินฟราเรดแบ่งย่อยได้ 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ (Near infrared, NIR) ช่วงความยาวคลื่น 0.75 – 1.4 μm รังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle infrared, mid-IR) ช่วงความยาวคลื่น 1.4 – 3.0 μm และรังสีอินฟราเรดช่วงไกล (Far infrared, FIR) ช่วงความยาวคลื่น 3.0 – 1000 μm รังสีอินฟราเรดสามารถสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำ เป็นคลื่นสั้นความถี่สูงเหมาะกับการอบแห้งแบบชั้นบาง หลักการทำงานคือคลื่นจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนขึ้นซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในตัวของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (Hall, 1962; Sakai and Hanzawa, 1994) จึงทำให้วัสดุที่กำลังอบอยู่แห้งทั้งภายในและภายนอกในเวลาเกือบเท่ากัน นั่นคือกระจายความร้อนภายในชิ้นวัสดุเป็นไปได้อย่างทั่วถึง ถ่ายเทความร้อนได้เร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถปรับระดับความยาวคลื่นให้เหมาะกับลักษณะของวัตถุได้ง่าย ใช้เวลาน้อยกว่าความร้อนทั่วไป 1-10 เท่า ขนาดเล็กกว่าเตาอบลมร้อนทั่วไปครึ่งหนึ่งหรือมากกว่านั้น การซ่อมบำรุงทำได้ง่าย ไม่มีฝุ่นละอองเกาะ ไม่มีเปลวไฟปรากฏระหว่างกระบวนการทำงาน และอุปกรณ์มีขนาดเล็ก กะทัดรัด ช่วยลดต้นทุนในการสร้างเครื่อง (อำไพศักดิ์ และคณะ, 2549; Hall, 1962; Sakai and Hanzawa, 1994) แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่อง การทะลุของคลื่นมีค่าต่ำไม่เกิน 10 มม. เท่านั้น (รูปที่ 1) ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการอบแห้งวัสดุที่มีความหนา และหากต้องการประสิทธิภาพสูงควรใช้ร่วมกับการให้ความร้อนระบบอื่น ๆ นอกจากนี้การขยายสเกลให้ใหญ่ขึ้นจากสเกลในระดับห้องปฏิบัติการยังปฏิบัติไม่ได้



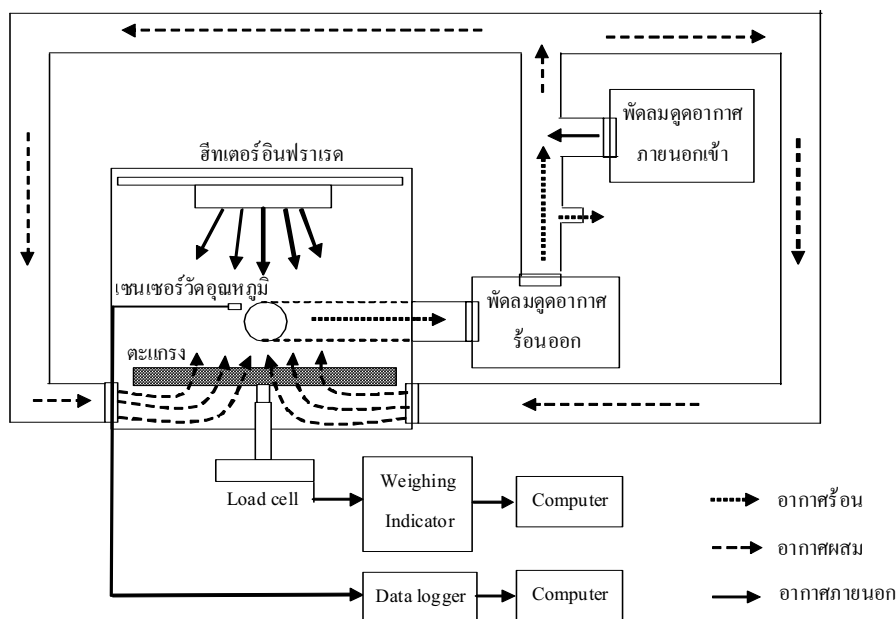
รูปที่ 1 กลไกในการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน (ศักดิ์ชัย และคณะ, 2553)

เครื่องอบแห้งเนื้อลำไยที่เกษตรกรใช้ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ลมร้อนแบบถาด อุปกรณ์กำเนิดลมร้อนมีทั้งใช้ไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และแก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง น้ำมันดีเซลมีปัญหาเรื่องการเผาไหม้ไม่หมด มีกลิ่นน้ำมันติดผลลำไย เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีปัญหาเรื่องการกระจายลมร้อนไม่สม่ำเสมอ จึงต้องหมั่นพลิกกลับเพื่อให้เนื้อลำไยมีความแห้งใกล้เคียงกัน การควบคุมอุณหภูมิลมร้อนให้คงที่ทำได้ยาก และระยะเวลาในการอบแห้งนานมากโดยเฉพาะในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน การนำรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งครั้งแรกเริ่มใช้กับวัสดุที่มีความหนาไม่มากเช่น แผ่นกระดาษ เคลือบสี วัสดุสิ่งทอ เป็นต้น แต่การประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารและไม้ยังไม่ค่อยแพร่หลายนัก อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการเริ่มศึกษาการนำไปใช้กับการอบพืชเมล็ด ผักและผลไม้ เบเกอรี่ เนื้อ ปลา เป็นต้น การศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดน่าจะช่วยลดปัญหาในเรื่องกลิ่นติดผลลำไย การกระจายความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ การพลิกกลับถาดระหว่างการอบแห้ง การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และระยะเวลาในการอบให้สั้นลง ในขณะเดียวกันก็จะช่วยรักษาประสิทธิภาพการอบแห้ง นอกจากนี้ยังจะช่วยลดปัญหามลภาวะจากการเผาไหม้อีกด้วย ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดและกำหนดสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

วิธีการทดลอง

1. ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการที่ออกแบบประกอบด้วย 3 ระบบ คือ ระบบให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ระบบระบายอากาศขึ้นและนำอากาศร้อนขึ้นบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ และอุปกรณ์อื่นๆ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 กลไกการทำงานของชุดทดสอบการอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

1.1 ระบบการให้ความร้อน ประกอบด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดติดตั้งอยู่ตรงกลางห้องอบแห้ง ซึ่งมีมิติภายใน 50 x 50 x 60 ซม.

1.2 ระบบการระบายอากาศและนำอากาศร้อนกลับมาใช้ ประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศเพื่อดูดอากาศร้อนขึ้นภายในห้องอบแห้งออกสู่ภายนอกและนำอากาศผสมกลับมาใช้ใหม่

1.3 อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ตะแกรง (เส้นผ่านศูนย์กลางรูตะแกรง 6 มม.) ขนาด 30 x 30 ซม. เพื่อรองรับเนื้อลำไยขณะอบ โหลดเซล (Load cell) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์บันทึกและแสดงน้ำหนัก (Weighing indicator) เพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแบบต่อเนื่อง เครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในฮีตเตอร์อินฟราเรด ชุดควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของเครื่อง และกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (Kilowatt-hour meter) เพื่อวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยฮีตเตอร์และพัดลมระบายอากาศ

2. ฮีตเตอร์อินฟราเรด

ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ทำจากเซรามิกชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อนดีเยี่ยม แข็งแกร่ง และกระแสไฟฟ้าไม่รั่ว มีความสามารถในการกระจายความร้อนสูงและเร็ว อีกทั้งยังมีความสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดีมาก ชนิดของฮีตเตอร์อินฟราเรดที่เลือกศึกษา ได้แก่

2.1 ฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งมีโพรงช่องว่างภายในเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนแผ่กระจายออกไปด้านหลัง ดังนั้นพลังงานความร้อนทั้งหมดจะกระจายไปด้านเดียว ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการความร้อนสูงและต้องกระจายความร้อนให้ทั่วถึงเท่า ๆ กันบน

พื้นผิววัสดุที่ต้องการอบ การที่พื้นผิวเป็นสีดำก็เพื่อต้องการให้ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) มีค่ามากที่สุด

2.2 ฮีทเตอร์เซรามิกหลอดยาว 30 ซม. ขนาด 400 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีแบบโคมเดี่ยว (1 หลอดต่อ 1 โคม) เพื่อช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรดให้พุ่งไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.3 ฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมพื้นผิวสีขาว ขนาด 2.4 กิโลวัตต์ การที่พื้นผิวเป็นสีขาวเพื่อไม่ให้ตัวฮีทเตอร์ดูดซับรังสีที่สะท้อนกลับ ทำให้เป็นอันตรายต่อตัวฮีทเตอร์

3. ลำโพงที่ใช้ในการทดสอบ

ลำโพงพันธุ์ดอเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ขนาดของผลแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (20.0 – 25.0 มม.) ขนาดกลาง (25.1 – 28.0 มม.) และขนาดใหญ่ (28.1 – 31.0 มม.) ความชื้นเนื้อลำโพงเริ่มต้น 80 % w.b (มาตรฐานเปียก) โดยผลลำโพงซึ่งถูกเอาเปลือกและเมล็ดออกแล้วจะถูกจัดเรียงบนตะแกรงแบบชั้นเดียว (Single layer) ด้วยการคว่ำผลลำโพงลง อบจนมีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 16 % w.b ซึ่งเป็นระดับความชื้นของผลไม้แห้งที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (Venkatachalapathy and Raghavan, 2000) เก็บเนื้อลำโพงแห้งไว้ในถุงพลาสติกที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เพื่อรอการศึกษาคุณภาพต่อไป

4. การวางแผนการทดลอง

การทดลองเป็นแบบปัจจัยเดียว โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยครั้งละปัจจัยเรียงตามลำดับ ได้แก่ ชนิดของฮีทเตอร์อินฟราเรด อุณหภูมิอากาศร้อนในห้องอบแห้งจากรังสีอินฟราเรด ระยะห่างระหว่างผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับเนื้อลำโพง และ ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบ ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แต่ละครั้งใช้ลำโพงสดประมาณ 500 กรัม

5. การวิเคราะห์การอบแห้ง

5.1 เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการจากผลผลิตสดเป็นผลิตภัณฑ์แห้งที่มีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 16 % w.b.

5.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ได้แก่ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการต่อน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปได้ (Pakowski and Mujumdar, 1995)

6. การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อลำโพงแห้ง

6.1 สีของเนื้อลำโพงแห้ง วัดโดยเครื่องมือวัดค่าสีและสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrophotometer, ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE Plus) โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเทียบเท่าแสงกลางวัน D65 มุมฐานการวัดของกล้อง 10 องศา ($10^\circ/D65$) และมุมการวางของแหล่งแสงกับตัวตรวจวัด 45 องศา ($45/0$) ทำการวัดไม่ต่ำกว่า 3 ซ้ำ ๆ ละไม่ต่ำกว่า 3 การอ่านค่า (Readings) แสดงค่าสี L^* , a^* และ b^* ตามระบบการวัดสีของ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยที่ค่า L^* บรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า L^* 100 ซึ่งแสดงถึงสีขาว ไปจนถึง L^* 0 ซึ่งแสดงถึงสีดำ แกน $+a^*$

บรรยายถึงความเป็นสีแดงไปจนถึง $-a^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีเขียว ส่วนแกน $+b^*$ แสดงความเป็นสีเหลืองไปจนถึง $-b^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีน้ำเงิน

6.2 ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Water activity, a_w) วัดโดยใช้เครื่อง a_w Meter (ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น Series 3TE) ซึ่งแสดงค่า a_w ออกมาเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วยโดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่า a_w ขั้นต่ำสุดสำหรับผลไม้แห้งควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.70 (Jayaraman and Das Gupta, 1995) ดังนั้นเนื้อลำไยอบแห้งที่มีค่า a_w ต่ำกว่าค่า a_w ขั้นต่ำสุดจึงปลอดภัยต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ โดยตัวเลขยิ่งสูงผลิตภัณฑ์ยิ่งมีโอกาสมากต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์

6.3 ความเหนียวของผลิตภัณฑ์ วัดโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer, Stable micro systems Texture Analyser รุ่น TA.XT plus, UK, Texture Technologies Inc.) ด้วยการทดสอบการถูกกระทำเชิงกลแบบอัด (Mechanical compression test) ความเร็วของหัวกด 30 มม. ต่อวินาที และความเร็วยกกลับ 20 มม.ต่อวินาที หัวกดเป็นเหล็กสแตนเลสทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมเทียบเท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. บันทึกค่าแรงกดและการเปลี่ยนรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Texture exponent 32 ด้วยอัตราการบันทึก 400 จุดต่อวินาที ค่าความเหนียวแปรผลจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) กับค่าของแรงสูงสุด (Peak force) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวมากพลังงานยังมียังมีค่าสูง (Chuang *et al.*, 1997)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการศึกษาชนิดของฮีทเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 1 ชี้ว่าฮีทเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสีเหลืองจัดรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อลำไย) ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านสีและความเหนียวดีที่สุด โดยใช้เวลาในการสร้างพลังงานความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ 80°C ภายในเวลาสั้นเพียง 10 นาที ฮีทเตอร์อินฟราเรดชนิดหลอดเซรามิกมีการกระจายพลังงานความร้อนไม่สม่ำเสมอ และยังใช้เวลาในการเพิ่มจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ 80°C นานมากกว่า 4 เท่าของฮีทเตอร์แผ่นเซรามิกสีเหลืองจัดรัสพื้นผิวสีดำ ดังนั้นฮีทเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสีเหลืองจัดรัสพื้นผิวสีดำจึงเหมาะสำหรับการอบเนื้อลำไย

ตารางที่ 1 อิทธิพลของชนิดฮีทเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ฮีทเตอร์	เวลา อบแห้ง	พลังงาน จำเพาะ	ค่าสี	a_w	ความ เหนียว
----------	----------------	-------------------	-------	-------	----------------

ชนิด	W/g solid	(min)	(kJ/g)	L*	a*	b*		(N-mm)
I	8.75	158.5	22.005	16.72	3.72	14.2	0.653	7.019
I-I	17.49	163.5	23.145	19.37	2.655	12.645	0.661	7.5405
II	8.75	154.5	22.005	17.19	3.76	10.06	0.677	8.7835
III	26.24	155	22.26	20.2	2.415	9.235	0.6355	6.9945

ชนิด I คือ ฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลืองจตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 1 ตัว

ชนิด I-I คือ ฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลืองจตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว

ชนิด II คือ ฮีทเตอร์เซรามิกหลอดยาว 30 ซม. ขนาด 400 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีแบบโคมเดี่ยว (1 หลอดต่อ 1 โคม) จำนวน 2 ตัว

ชนิด III คือ ฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลืองพื้นผิวสีขาว ขนาด 2.4 กิโลวัตต์

2. ผลการศึกษาอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

ในการศึกษาใช้ฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลืองจตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว การแปรค่าอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งถูกกำหนดจากเซนเซอร์อุณหภูมิชนิด K ที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องอบเหนือผิวของตะแกรงรองรับลำไย 75 มม. และห่างจากผนังห้องอบ 165 มม. ปลายอีกด้านหนึ่งของเซนเซอร์ต่อเข้ากับเครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้ง ผลการศึกษาเบื้องต้นชี้ว่าอุณหภูมิของเนื้อลำไย 80 °C เป็นอุณหภูมิวิกฤต ดังนั้นหากการทดลองใดที่อุณหภูมิเนื้อลำไยสูงกว่า 80 °C อุณหภูมิของอากาศจะถูกลดลงให้เหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต การใช้อุณหภูมิสูงเกินกว่าอุณหภูมิวิกฤต จะทำให้เนื้อลำไยมีผิวแห้งและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล การอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนมากกว่า 80 °C สามารถทำได้หากมีการลดอุณหภูมิอากาศร้อนให้เหลือ 80 °C เท่ากับอุณหภูมิของเนื้อลำไย โดยอุณหภูมิอากาศสามารถเพิ่มได้ตั้งแต่มากกว่า 80 °C จนถึงมากที่สุดในระดับ 120 °C โดยในระดับนี้ระยะเวลาในการอบแห้งสามารถลดลงได้กว่าร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับการอบด้วยอุณหภูมิวิกฤตตลอดเวลา อีกทั้งยังให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านสีดีที่สุดอีกด้วย (ตารางที่ 2) ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ กลุ่มวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยว สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร (นวลศรี, 2552)

ตารางที่ 2 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

อุณหภูมิ อากาศ (°C)	เวลา อบแห้ง (min)	พลังงาน จำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a _w	ความ เหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		

60	268	24.17	18.52	1.28	9.48	0.684	6.2635
80	182.5	22.485	15.315	1.82	9.015	0.675	7.2625
100	163	23.355	19.845	2.94	12.815	0.661	7.8335
120	131	19.655	20.905	4.84	12.755	0.6495	7.853
140	152	22.005	19.695	3.83	12.055	0.602	9.2035

3. ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวฮีตเตอร์อินฟราเรด

ในการทดลองใช้ฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัวและอุณหภูมิอากาศในการอบแห้ง 120 °C และมีการลดอุณหภูมิอากาศร้อนให้เหลือ 80 °C เมื่ออุณหภูมิเนื้อลำไยเท่ากับ 80 °C ตารางที่ 3 ซึ่งการอบแห้งที่ระยะห่างระหว่างผิวของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับเนื้อลำไยเท่ากับ 10 และ 15 เซนติเมตรในแนวตั้งฉาก ใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งยาวนาน เนื่องจากปรากฏการณ์ผิวรอบนอกของวัสดุแข็งตัว (Case hardening) นอกจากนี้เนื้อลำไยอบแห้งยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าสีมาก การอบแห้งที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร ใช้พลังงานในระดับปานกลาง ส่วนในระยะมากกว่าและเท่ากับ 25 เซนติเมตร ใช้พลังงานจำเพาะในการแห้งต่ำที่สุด ด้วยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ในการเลือกใช้งานจริงควรพิจารณาถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่ใช้ในการทำห้องอบแห้งซึ่งมีผลต่อการสะท้อนรังสี ระยะ 25 ซม.จึงเป็นระยะห่างที่น่าจะเหมาะสมที่สุด ส่วนการอบผลผลิตที่มีปริมาณน้ำตาลไม่มากสามารถใช้ระยะห่างแคบ ๆ ได้ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อที่ระยะ 5 – 15 ซม. (อำไพศักดิ์ และธนภัทร, 2550; Dagerskog, 1979) มะม่วงหิมพานต์ที่ระยะ 3.6 ซม. (Hebbbar and Rastogi, 2001) ใบหอมสดหั่นที่ระยะ 10 ซม. (Mongpraneet *et al.*, 2002)

ตารางที่ 3 อิทธิพลของระยะห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวฮีตเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ระยะห่าง (mm)	เวลา อบแห้ง (min)	พลังงาน จำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a_w	ความ เหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
10	187	20.07	15.02	2.505	8.955	0.701	9.012
15	227	25.465	18.655	3.200	9.205	0.546	229.8
20	175	23.41	19.095	1.545	7.910	0.616	10.332
25	156	21.885	18.175	1.980	9.975	0.6655	7.0095
30	142	20.645	19.525	3.605	11.140	0.6855	7.655
35	133	21.33	16.995	1.355	7.310	0.6885	6.076

4. ผลการศึกษาความเร็วของอากาศในตำแหน่งกึ่งกลางตะแกรงรองรับลำไย

ในการทดลองใช้ฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และอุณหภูมิอากาศในการอบแห้ง 120°C และมีการลดอุณหภูมิอากาศร้อนให้เหลือ 80°C เมื่ออุณหภูมิเนื้อลำไยเท่ากับ 80°C ระยะห่างระหว่างผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับเนื้อลำไยเท่ากับ 25 เซนติเมตรในแนวตั้งจาก ตารางที่ 4 ซึ่งเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากอุณหภูมิของผลผลิตลดลงเพราะความร้อนสูญเสียไปกับอากาศจากพัดลม อัตราการอบแห้งจึงลดลง ความสิ้นเปลืองพลังงานต่อน้ำหนักน้ำที่ระเหยมีแนวโน้มต่ำสุดในระดับความเร็ว 0.7 ถึง 1.1 เมตรต่อวินาที แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทุกด้านสำหรับความเร็ว 1.1 เมตรต่อวินาทีที่ดีที่สุด ใกล้เคียงกับผลของ Achariyaviriya *et al.* (2001) ณ ระดับ 0.7 เมตรต่อวินาที ผลการวิจัยของ Karathanos and Belessiotis (1999) ซึ่งอบแห้งผลไม้รสหวานหลายชนิดด้วยลมร้อน ซึ่งว่าความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตควรมีค่า 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ส่วนการอบก็วิด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 1.25 เมตรต่อวินาที (Maskan, 2001)

ตารางที่ 4 อิทธิพลของความเร็วของอากาศเหนือพื้นผิวของเนื้อลำไยที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ความเร็ว อากาศ (m/s)	เวลา อบแห้ง (min)	พลังงาน จำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a_w	ความ เหนียว (N-mm)
			L^*	a^*	b^*		
0.4	184.5	21.83	20.085	1.51	7.615	0.642	9.5845
0.7	153.5	20.77	19.635	1.82	8.625	0.6475	6.514
1.1	145.0	21.645	19.040	4.92	12.845	0.627	7.665
1.5	129.0	21.925	19.065	3.71	11.210	0.6605	5.979
1.8	122.0	23.125	23.335	3.405	12.180	0.664	10.601

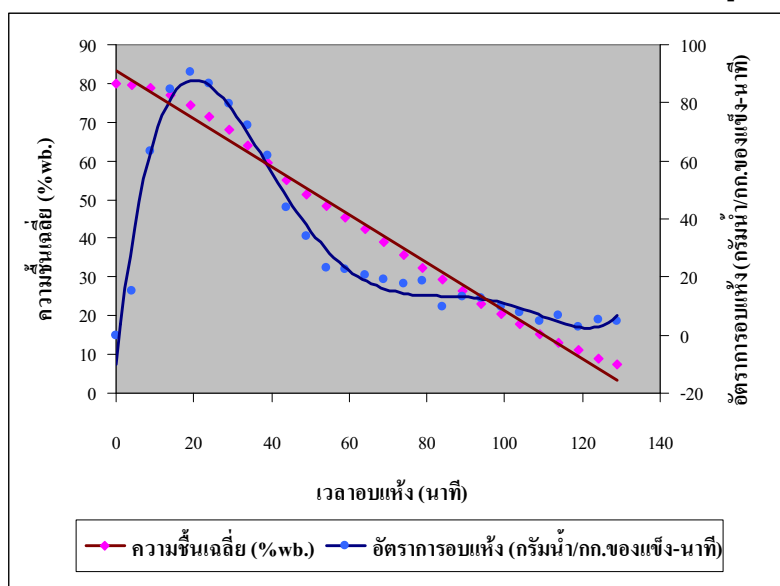
5. สภาวะการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้รังอินฟราเรดเพื่อการอบแห้งเนื้อลำไย ด้วยแผนการทดลองแบบทางเดียว โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยครั้งละปัจจัยเรียงตามลำดับได้แก่ ชนิดของฮีทเตอร์อินฟราเรด อุณหภูมิอากาศร้อนในห้องอบแห้งจากรังอินฟราเรด ระยะห่างระหว่างผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับเนื้อลำไย และ ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบ ที่มีต่อคุณภาพของเนื้อลำไยแห้งได้แก่ ค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ ค่า a_w ค่าความเหนียว เป็นต้น และพลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้ง รวมทั้งปัจจัยเชิงคุณภาพอื่น ๆ ได้แก่ระยะเวลา heating up ของฮีทเตอร์ เป็นต้น พบว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ได้แก่

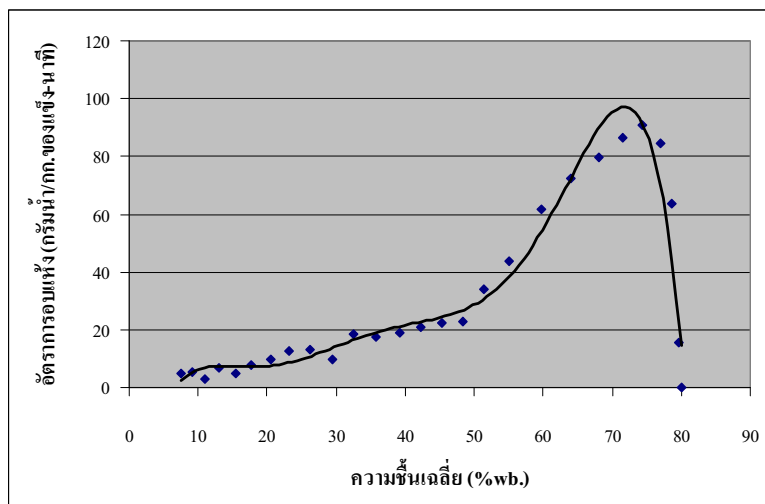
1. ฮีทเตอร์อินฟราเรดชนิดฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัส (120 มม.) พื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว
2. อุณหภูมิอากาศร้อนในห้องอบแห้งจากรังสีอินฟราเรด 120 องศาเซลเซียส แล้วลดอุณหภูมิเหลือ 80 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเนื้อลำไยเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส
3. ระยะห่างระหว่างผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับเนื้อลำไยเท่ากับ 25 เซนติเมตรในแนวตั้งฉาก
4. ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบเท่ากับ 1.1 เมตรต่อวินาที

6. เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

การศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระทำในสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดตามหัวข้อ 5. อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ผลโดยแสดงค่าในหน่วยกรัมของน้ำที่ระเหยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไยต่อหน่วยเวลาการอบแห้ง รูปที่ 3 และ 4 ซึ่งอัตราการอบแห้งเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดภายในเวลา 20 นาที ณ 80 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ซึ่งแสดงถึงระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิต (Warming-up drying period) เนื่องจากเนื้อลำไยมีความชื้นสูงจึงดูดซับรังสีอินฟราเรดได้เร็ว (ตามความเป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริก) ทำให้อุณหภูมิของเนื้อลำไยสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเข้าถึงช่วงอัตราการอบแห้งสูงสุดแล้วอัตราการอบแห้งก็ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period) เนื่องจากลำไยมีปริมาณน้ำลดลงจึงมีความสามารถในการรับรังสีอินฟราเรดได้น้อย อัตราการเคลื่อนย้ายมวลจึงลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) สอดคล้องกับการอบแห้ง peach หั่นเต๋าขนาด 5 ± 0.2 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรด (Wang and Sheng, 2006) การประเมินค่าใช้จ่ายทางด้านการพลังงานเมื่ออบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดในสภาวะที่เหมาะสม พบว่า มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 21.65 กิโลจูลต่อกรัม น้ำระเหย



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของลำไยและอัตราการอบแห้งกับเวลา



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นของลำไย

สรุปผลการศึกษา

1. การอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดมีความเป็นไปได้ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเพียง 2 ชั่วโมง 25 นาที ต่อเนื้อลำไย 500 กรัม เมื่ออบในสภาวะที่เหมาะสมโดยมีการนำอากาศร้อนกลับมาใช้ร้อยละ 40 โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ดี อิทธิพลของเครื่องอบลำไยแบบอินฟราเรดที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยได้แก่

- ชนิดของฮีทเตอร์อินฟราเรด ชนิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบเนื้อลำไยคือฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแห้งของเนื้อลำไย)
- อุณหภูมิอากาศร้อนเหนือพื้นผิวตะแกรงรองรับลำไยในขณะอบ ซึ่งสามารถตั้งได้สูงสุดถึง 120 °C แต่เมื่ออุณหภูมิภายในเนื้อลำไยที่กำลังอบแห้งเข้าอุณหภูมิวิกฤตที่ 80 °C จะต้องลดอุณหภูมิของอากาศลงเหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต
- ระยะห่างระหว่างพื้นผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับพื้นผิวของเนื้อลำไย โดยควรมีระยะห่าง 25 เซนติเมตร เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพื่อความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านการออกแบบเครื่องอบในทางปฏิบัติ
- ความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตที่กำลังอบแห้ง ควรมีค่า 1.1 เมตรต่อวินาที เพื่อที่จะระบายอากาศขึ้นออกจากห้องอบแห้งได้เหมาะสมกับอัตราการอบตลอดระยะเวลาการอบแห้งทั้งกระบวนการ

2. เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิตและระยะอัตราการอบแห้งลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะอัตราการอบแห้งคงที่ โดยอัตราการอบแห้งจะเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดประมาณ 80 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที ภายในเวลา 20 นาที

3. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเมื่ออบที่สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมมีค่า 21.65 กิโลจูลต่อกรัมน้ำที่ระเหย

อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดกับความเร็วลมต่อการอบแห้งเนื้อลำไย

จากผลการศึกษาในปีที่ 1 จึงควรมีการศึกษาการอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด โดยเป็นการศึกษาเชิงลึกในเรื่องปัจจัยซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อการอบแห้งเนื้อลำไย นั่นคือ ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วอากาศเหนือวัสดุที่กำลังอบแห้ง (สุนทร และคณะ, 2548) เพื่อหาแบบจำลองการอบแห้งเนื้อลำไย รวมทั้งศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้โดยใช้ค่าความชื้นสมมูลที่วัดได้จริงจากการทดลองในการวิเคราะห์ข้อมูลแบบจำลองการอบแห้ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้ง โดยคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบสภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดในระบบอุตสาหกรรมต่อไป (Kemp *et al.*, 2001) หรือนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งระบบอื่น ๆ ต่อไป

วิธีการทดลอง

1. วัตถุดิบ

ผลลำไยพันธุ์ดอ เกรด A (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 – 28 มม.) หลังจากแกะเปลือกและเมล็ดออก ต้มล้างน้ำและทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำก่อนนำไปทดลอง โดยมีการหาความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธี AOAC (1995)

2. การปรับปรุงชุดทดสอบการอบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

ชุดทดสอบภายหลังการปรับปรุง (รูปที่ 5) ประกอบด้วยอุปกรณ์ปรับปริมาณอากาศ ชุดควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของเครื่อง มิเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้า ฮีทเตอร์อินฟราเรด ท่อลมออก ชุดพัดลมเป่าอากาศ ท่อลมเข้า ตะแกรงจัดระเบียบอากาศ และตะแกรงรองรับวัสดุทดสอบ ระบบระบายอากาศใช้พัดลมแบบไหลตามแนวแกน (Tube axial fan) ชนิดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 764 วัตต์ (1 กำลังม้า) เป่าลมผ่านท่อลมเข้าและออกที่ด้านข้างของตู้อบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดขนาด 50 x 57 เซนติเมตร (ยาว x สูง) มุมลาดเอียง 6.7 องศา ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 10 องศา เพื่อลดการปั่นป่วนของอากาศ ท่อลมด้านอากาศเข้ามีช่องใส่แผ่นจัดระเบียบอากาศทำด้วยเหล็ก ตะแกรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 6 มิลลิเมตร จำนวน 5 แผ่น เพื่อลดความเร็วและจัดระเบียบการไหลของอากาศ ระบบจ่ายไฟฟ้าให้ฮีทเตอร์ต่อเข้ากับเครื่องปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้สามารถปรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้

การศึกษานี้ไม่สามารถหาฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำได้ จึงใช้ฮีทเตอร์อินฟราเรดแบบหลอดยาวพร้อมโคมสะท้อนรังสีชนิดวางในแนวนอนแบบหลอดคู่ ความยาวใช้งาน 300 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร ขนาด 500 วัตต์ และโคมสะท้อนรังสีแบบหลอดคู่ ขนาด 125 x 45 x 315 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของฮีทเตอร์อินฟราเรดในสภาวะต่าง ๆ ซึ่งอุณหภูมิของฮีทเตอร์อินฟราเรดมีค่าอยู่ในช่วง 105.52 - 248.38 องศาเซลเซียส หรือ 378.52 - 521.38 เคลวิน

เพื่อนำไปคำนวณหาความยาวคลื่นสูงสุด ($\lambda_{\max}$) ดังสมการ (1) จะได้ค่าอยู่ในช่วง 5.56×10^{-6} - 7.65×10^{-6} เมตร แสดงว่าความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรดที่ใช้เป็นอินฟราเรดช่วงไกล (Far infrared, FIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ย่าน 3.00 ถึง 1000 ไมโครเมตร

$$\lambda_{\max} T = b \quad \dots(1)$$

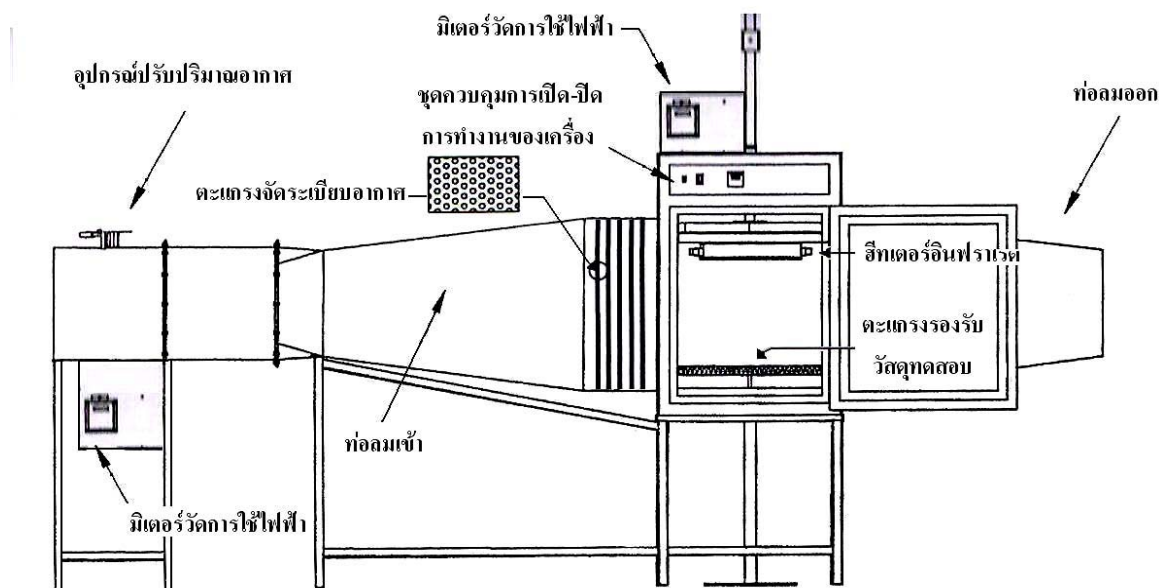
เมื่อ T = อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (เคลวิน)

$\lambda_{\max}$ = ความยาวคลื่นสูงสุด (ไมโครเมตร)

b = ค่าคงที่ของกฎของวีน (Wien constant) มีค่าเท่ากับ 2.898×10^{-3} (เมตร-เคลวิน)

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของฮีตเตอร์อินฟราเรดในสภาวะต่าง ๆ

กำลังของฮีตเตอร์อินฟราเรด (วัตต์)	ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)	อุณหภูมิของฮีตเตอร์อินฟราเรด $\pm$ SD (องศาเซลเซียส)
1250	0.4	113.62 ± 8.8616
	0.7	161.21 ± 1.8290
	1.0	111.56 ± 29.6316
1500	0.4	162.82 ± 80.1672
	0.7	137.07 ± 22.9194
	1.0	105.52 ± 25.3592
1750	0.4	248.38 ± 85.5359
	0.7	197.71 ± 115.4173
	1.0	188.21 ± 54.1839



รูปที่ 5 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด ได้แก่

1. ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด (IR Intensity) สามารถหาได้จากสมการ (2)

$$IR = \frac{W}{A} \quad \dots(2)$$

$$W = IV \quad \dots(3)$$

เมื่อ	IR Intensity	=	ค่าความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)
	W	=	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์อินฟราเรด (วัตต์)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้งซึ่งมีค่าเท่ากับ 2400 ตารางเซนติเมตร
	V	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์อินฟราเรด (โวลต์)
	I	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์อินฟราเรด (แอมแปร์)

ในการศึกษาแปรค่าความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเป็น 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งการแปรค่าความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดในแต่ละระดับนั้น สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้จากเครื่อง Voltage Regulator และวัดหาค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์อินฟราเรดต่อพื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง (2,400 ตารางเซนติเมตร) จึงสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์อินฟราเรดได้จากสมการ (3)

2. ความเร็วของอากาศ อากาศทำหน้าที่เคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากผิวของเนื้อลำไย เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจึงเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากเหนือผิวของเนื้อลำไยได้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันการสูญเสียความร้อนก็มากด้วย จึงควรมีการวัดความเร็วอากาศภายในตู้อบเพื่อตรวจสอบความเร็วของอากาศโดยวัดความเร็วของอากาศเหนือผิวของเนื้อลำไยและควรกำหนดตำแหน่งผิวหน้าของเนื้อลำไยในระนาบเดียวกัน ดังนั้นควรศึกษาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมในการอบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด ซึ่งความเร็วอากาศในการทดสอบนี้ได้กำหนดไว้ 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 เมตรต่อวินาที

3. การวางแผนการทดลอง

ในการทดลองอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด ได้กำหนดเป้าหมายให้ความชื้นของเนื้อลำไยแห้งสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 18 (มาตรฐานเปียก) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพข. 136/2546 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดที่ต้องการศึกษา จึงสามารถออกแบบการทดลองโดยกำหนดระดับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์ต่อตาราง

เซนติเมตร สำหรับความเร็วอากาศได้กำหนดไว้ 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ คิดเป็น 27 หน่วยการทดลอง โดยน้ำหนักของเนื้อลำไยสดเริ่มต้นที่ใช้ในแต่ละหน่วยการทดลอง คือ 500 กรัม การวัดความชื้นจะกระทำ ณ ช่วงเวลาทำการทดลองที่แต่ละหน่วยการทดลองสิ้นสุดลง อย่างไรก็ตามหากหน่วยการทดลองใดได้น้ำหนักสุดท้ายของเนื้อลำไยแห้งใกล้เคียง 100 กรัม จะถือว่าเป็นการสิ้นสุดการทดลอง

4. การวัดค่าความชื้นสมมูลของเนื้อลำไย

จากการศึกษาวิธีหาค่าความชื้นสมมูลเบื้องต้นในการตรวจเอกสาร พบว่าการหาค่าความชื้นสมมูล มี 3 วิธี คือ การทดลอง การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมมูล และวิธีการทางอ้อม ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้วิธีการทดลองโดยนำวัสดุวางในชุดทดสอบการอบแห้งที่สามารถแปรค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอบแห้งลำไย จนกระทั่งน้ำหนักของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงอีกต่อไป จากนั้นนำเนื้อลำไยแห้งมาหาความชื้นสมมูลโดยใช้เครื่องวัดความชื้นของอาหาร (Infrared moisture determination balance) รุ่น AD-4714 อุณหภูมิในการอบ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 99 นาที โดยเครื่องนี้จะแสดงปริมาณความชื้นในรูปของร้อยละมาตรฐานเปียก

5. พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งเนื้อลำไย

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) นิยมใช้เป็นค่าบ่งบอกสมรรถนะเครื่องอบแห้ง เนื่องจากน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุอบแห้งแตกต่างกัน คำนี้นหาได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยต่อปริมาณของน้ำที่ระเหยซึ่งหาได้จากสมการ (Pakowski and Mujumdar, 1995)

$$SEC = \frac{Q}{m_{w, \text{evap}}} \quad \dots(4)$$

เมื่อ SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (W/g)

Q = พลังงานความร้อนรวมที่ใช้ในขบวนการอบแห้ง (W)

$m_{w, \text{evap}}$ = ปริมาณความชื้นที่ระเหย (g)

6. การวัดคุณภาพของลำไยแห้งตามคุณลักษณะทางเคมีและกายภาพ

ค่าที่วัดได้แก่ ค่าปริมาณความชื้น (Moisture content) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุตัวอย่างเมื่อเทียบกับมวล สำหรับการทดลองนี้ได้นำเนื้อลำไยแห้งมาหาความชื้นที่เหลือโดยมีวิธีการหาความชื้นแบบ Oven method ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 136/2546 กำหนดว่าผลไม้อบแห้งจะต้องมีค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) ส่วนการวัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water Activity) และค่าสีดำเนินการเช่นเดียวกับในปีที่ 1 แต่มีการแสดงค่าสีรวม (ΔE^*) และค่า hue angle (h^*) ดังสมการ

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \dots(5)$$

$$h^* = \text{Arc tan} \frac{b^*}{a^*} \quad \dots(6)$$

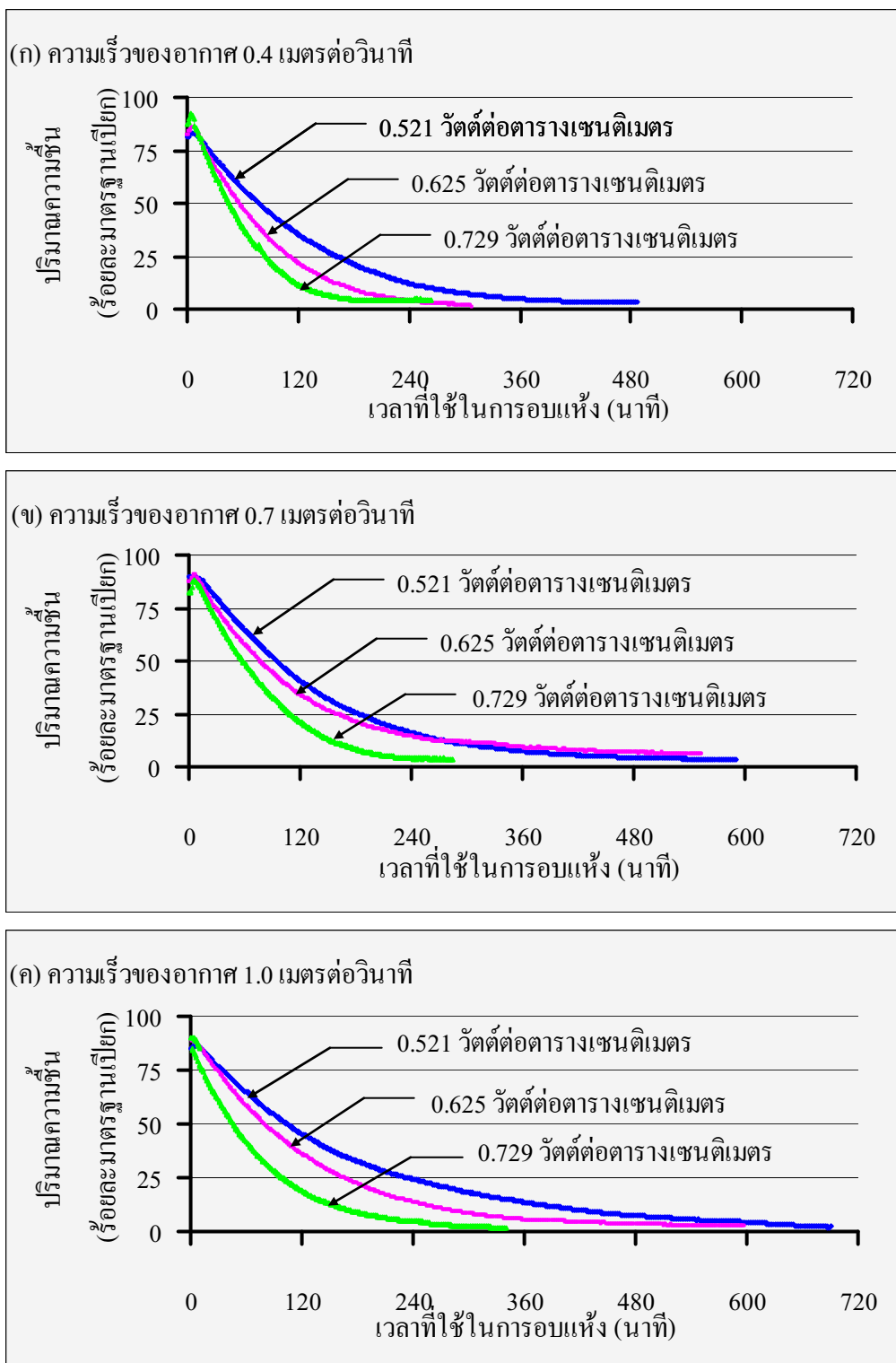
ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดกับความเร็วของอากาศ

เนื่องจากอิทธิพลร่วมของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดกับความเร็วของอากาศ เป็นค่าที่ซับซ้อนจึงแยกอธิบายอิทธิพลของปัจจัยทั้งสองดังกล่าวจากกัน โดยแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

1.1 ผลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด

จากแผนการทดสอบที่กำหนดค่าความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างเนื้อลำไยกับฮีทเตอร์คงที่ที่ 25 เซนติเมตร โดยทดสอบ 3 ซ้ำ รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของลำไยกับเวลาการอบแห้ง ณ ความเร็วของอากาศและความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ โดยรูปที่ 6 (ก) ซึ่งว่าที่ความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ 0.521 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำให้เวลาในการอบแห้งนานกว่า 0.625 และ 0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด เป็นแหล่งให้ความร้อนกับเนื้อลำไย ถ้าความร้อนมากก็จะทำให้น้ำที่อยู่ในเนื้อลำไยเคลื่อนที่มาที่ผิวของเนื้อลำไยเร็วขึ้น และอากาศจะเป็นตัวกลางพาความชื้นที่ผิวของเนื้อลำไยออกไป เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟพบว่าช่วงแรก ปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว และลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อความชื้นในเนื้อลำไยเหลือเพียงเล็กน้อย โดยหากใช้ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดมาก (0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) ปริมาณความชื้นและเวลาการอบแห้งจะลดลงเร็วกว่าความหนาแน่นอื่น ส่วนที่ความเร็ว 0.7 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 6 (ข) นั้น ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเป็น 0.521 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จะลดลงช้ากว่าที่ 0.625 และ 0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ และที่ความเร็ว 1.0 เมตรต่อวินาที ดังรูปที่ 6 (ค) ถ้าความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดมากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะน้อย แสดงว่าความหนาแน่นแปรผกผันกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เนื้อลำไยสดถูกอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 81 มาตรฐานเปียก เหลือไม่เกินร้อยละ 18 w.b ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) กราฟการอบแห้งแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วต่าง ๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าความชื้นของเนื้อลำไยลดลงตามความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นในทุกระดับความเร็ว เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนอาศัยหลักการของการแผ่รังสี โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นรังสีอินฟราเรดจึงถูกส่งไปยังเนื้อลำไยโดยตรง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharma *et al.* (2005) ที่ศึกษาการอบหอมหัวใหญ่หั่นแว่นหนา 6±0.1 มม. ด้วยความเร็วในช่วง 1.0 – 1.5 m/s

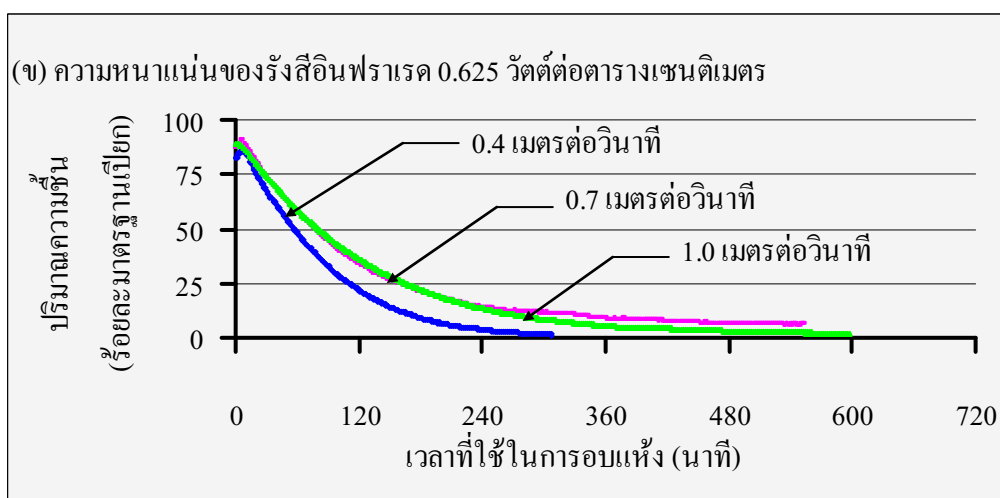
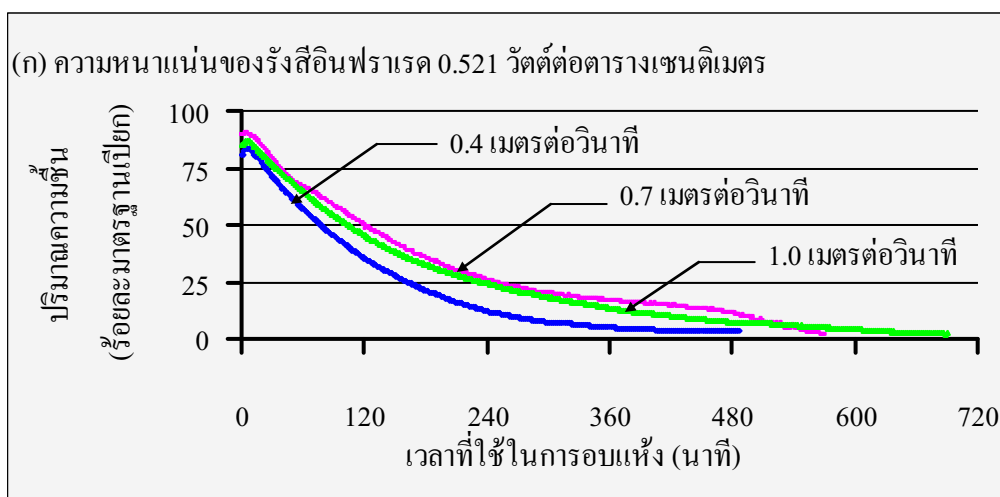


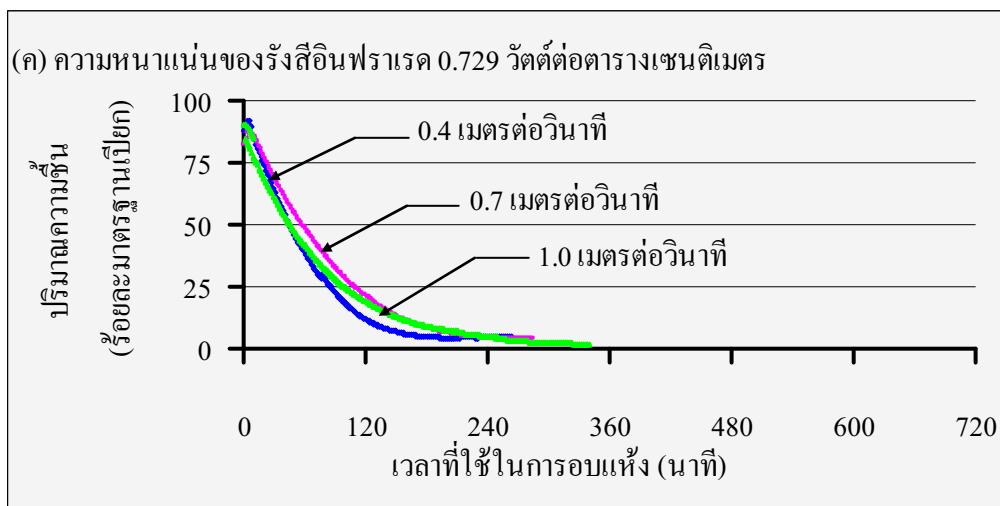
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาที่ความเร็วของอากาศระดับต่าง ๆ

1.2 ผลของความเร็วของอากาศ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของลำไยกับเวลาการอบแห้ง ณ ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วของอากาศต่าง ๆ จากรูปที่ 7 (ก) ชี้ว่าความหนาแน่นของ

รังสีอินฟราเรด 0.521 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตรต่อวินาที ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า 0.7 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วของอากาศเป็นตัวพาความชื้นที่ผิวของเนื้อลำไยออกไป ถ้าความเร็วต่ำ (0.4 เมตรต่อวินาที) ทำให้ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาจากฮีทเตอร์ให้ความร้อนกับเนื้อลำไยโดยตรงจึงทำให้ปริมาณความชื้นและเวลาการอบแห้งลดลงเร็วกว่าความเร็วอื่น เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟพบว่าช่วงแรก ที่ปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเป็น 0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรจะใช้เวลาสั้นกว่า 0.625 และ 0.521 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเป็น 0.625 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 7 (ข) นั้น ความเร็วของอากาศเป็น 1.0 เมตรต่อวินาที ปริมาณความชื้นจะลดลงช้ากว่าที่ ความเร็ว 0.7 และ 0.4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเป็น 0.729 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 7 (ค) ถ้าความเร็วของอากาศมากเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะมากตามไปด้วย แสดงว่าความเร็วของอากาศแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำด้วย (ตารางที่ 6)





รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ

ตารางที่ 6 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	11.8±0.5	551±159	69.93±20.50
0.521	0.7	15.5±2.7	512±119	94.23±31.99
0.521	1	18.0±2.4	486±122	77.79±14.15
0.625	0.4	19.2±0.4	276±27	58.68±13.86
0.625	0.7	10.1±1.8	396±138	71.46±24.58
0.625	1	14.7±3.6	505±79	90.87±14.68
0.729	0.4	10.5±2.2	212±48	51.39±11.73
0.729	0.7	12.7±2.0	194±24	45.48±7.15
0.729	1	15.7±1.7	464±224	83.49±18.40

2. ผลการศึกษาความชื้นสมดุลของเนื้อลำไย

การหาความชื้นสมดุลในสภาวะความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดกับความเร็วของอากาศต่าง ๆ โดยปล่อยให้เนื้อลำไยซึ่งอยู่ในชุดทดสอบการอบแห้งที่สามารถแปรค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการอบแห้งลำไยเข้าสู่สภาวะสมดุลกับสภาวะอากาศโดยรอบเอง แล้วนำไปวัดหาความชื้นสมดุลโดยใช้เครื่องวัดความชื้นแบบอินฟราเรด (Infrared moisture determination balance, ยี่ห้อ AD รุ่น AD-4714) ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 99 นาที โดยมีการสอบเทียบกับตู้อบลมร้อนแบบธรรมชาติ (Natural hot air oven, ยี่ห้อ Memmert รุ่น UFE) ผลความชื้นสมดุลที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 7 โดยมีความสัมพันธ์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) กับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด (IR) และความเร็วของอากาศ (v) ดังสมการ

$$M_e = 18.375 - 26.656 \times IR + 8.704v; R_{adj}^2 = 0.808 \quad \dots(7)$$

ตารางที่ 7 ผลของความชื้นสมดุลของเนื้อลำไยโดยการทดสอบการอบแห้งลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

IR Intensity (วัตต์ต่อตาราง เซนติเมตร)	ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)	ค่าความชื้นสมดุล (ร้อยละมาตรฐานเปียก)			
		ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	เฉลี่ย
0.521	0.4	6.2	10.1	6.9	7.73
	0.7	8.6	12.7	9.1	10.13
	1.0	15.4	16.1	11.2	14.23
0.625	0.4	5.4	6.0	3.8	5.07
	0.7	6.7	7.6	7.3	7.20
	1.0	12.0	10.8	9.9	10.90
0.729	0.4	4.2	2.7	2.0	2.97
	0.7	5.1	4.2	4.9	4.73
	1.0	6.0	6.8	7.6	6.80

3. แบบจำลองอัตราการอบแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไย สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการของอัตราส่วนความชื้นคำนวณจาก

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad \dots(8)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_i , M_t , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุล ตามลำดับ

จากการตรวจสอบวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับการอบแห้งวัตถุดิบทางการเกษตรจำพวกผักและผลไม้ มักนิยมใช้แบบจำลองเอมไพริคอล (Empirical model) อาทิเช่น แบบจำลอง Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง

Model name	Model	Reference
Newton or Exponential	$MR = \exp(-kt)$	Jain and Pathare (2004), Lin <i>et al.</i> (2005), Sharma <i>et al.</i> (2005), Waewsak <i>et al.</i> (2006)
Herderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Jain and Pathare (2004), Lee <i>et al.</i> , 2004; Sharma <i>et al.</i> (2005), Waewsak <i>et al.</i> (2006)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Jain and Pathare (2004), Lin <i>et al.</i> (2005), Sharma <i>et al.</i> (2005), Waewsak <i>et al.</i> (2006)
Modified Page	$MR = \exp[(-kt)^n]$	Jain and Pathare (2004), Sharma <i>et al.</i> (2005), Waewsak <i>et al.</i> (2006)

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

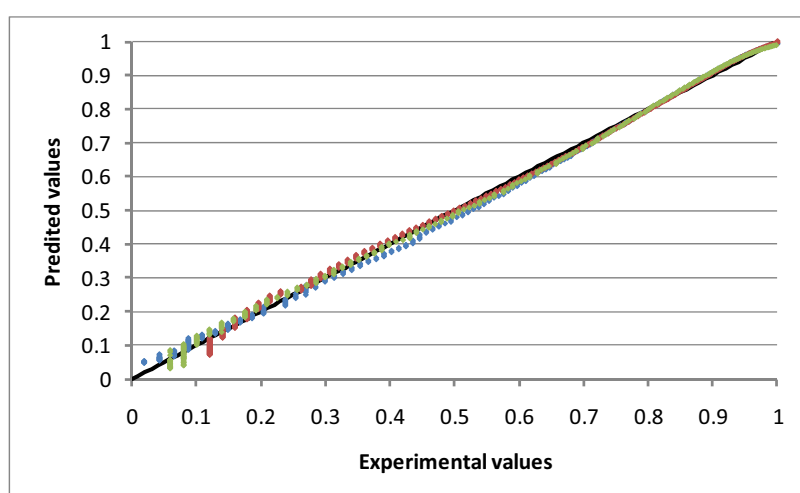
ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อน (Jain and Pathare, 2004; Lin *et al.*, 2005; Sharma *et al.*, 2005; Waewsak *et al.*, 2006) ค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยยังมีค่าเข้า 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 มากแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE น้อย โดยสมการแสดงการคำนวณหาพารามิเตอร์ดังนี้

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,pre})^2}{N - n} \quad \dots(9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,pre})^2}{N}} \quad \dots(10)$$

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

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 9 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เพราะมีค่า R^2 สูงสุดเท่ากับแบบจำลอง Modified Page อยู่ในช่วง 0.9606 – 0.9913 แต่แบบจำลอง Page มีค่า χ^2 ต่ำกว่า จึงเลือกแบบจำลองดังกล่าวเพื่อแสดงพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด รูปที่ 6 แสดงความสอดคล้องของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและการทำนายโดยแบบจำลอง Page ที่ความเร็วอากาศ 0.4 m/s ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายกระจายอยู่รอบ ๆ เส้นตรง แสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharma *et al.* (2005) ศึกษาพบว่าแบบจำลอง Page เหมาะสมกับการอบหอมหัวใหญ่ หั่นแว่นหนา 6 ± 0.1 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรด และงานวิจัยของ Lin *et al.* (2005) ที่อบแห้งมันเทศหั่นเต๋าขนาด 10, 17.5 และ 25 มม. แบบเยือกแข็งร่วมกับรังสีอินฟราเรด ส่วน Jain and Pathare (2004) พบว่าแบบจำลอง Asymptotic หรือ Logarithmic ($MR = a_0 + a \cdot \exp(-kt)$) เหมาะสมกว่าเมื่ออบแห้งหอมหัวใหญ่หั่นแว่นหนา 6 ± 0.01 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ในขณะที่ Togrul (2006) ศึกษาพบว่าแบบจำลอง Midilli *et al.* ($MR = a \cdot \exp(-kt^N) + b \cdot t$) เหมาะสมการอบแครอท หั่นชิ้นหนา 1 – 2 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรดความยาวช่วงคลื่น 2 – 3.5 μm ซึ่งจัดเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ถึงช่วงกลาง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้แบบจำลอง Page ซึ่งมีรูปสมการง่ายกว่าก็สามารถอธิบายพฤติกรรมการถ่ายเทความชื้นของเนื้อลำไยได้แล้ว จึงไม่จำเป็นที่จะต้องศึกษาแบบจำลองอื่น ๆ ซึ่งมีระดับความยาก และความซับซ้อนมากกว่า



รูปที่ 8 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง Page ที่ระดับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ และ ความเร็วอากาศ 0.4 m/s

ตารางที่ 9 ค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 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

4. คุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้ง

ตารางที่ 10 แสดงอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วอากาศต่อคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้งในด้านความชื้น ค่าสี และ ค่า a_w ซึ่งให้เห็นว่า ความชื้นเนื้อลำไยแห้งมีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 โดยมีความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 18 มาตรฐานเปียก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) แต่บางเงื่อนไขการอบแห้งค่าปริมาณความชื้นไม่ผ่านเกณฑ์ ดังนั้นสภาวะนี้ไม่เหมาะสมต่อการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเท่ากัน พบว่าปริมาณความชื้นแปรผันตรงกับความเร็วของอากาศ เนื่องจากความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะเป็นตัวพาความร้อนจากฮีทเตอร์ที่ให้ความร้อนกับเนื้อลำไยออกไป ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) และเมื่อพิจารณาความเร็วของอากาศเท่ากัน พบว่า ปริมาณความชื้นแปรผกผันกับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด

ค่า a_w เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณน้ำอิสระที่อยู่ในเนื้อวัสดุ พบว่ามีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 โดยมีค่าไม่เกิน 0.75 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) และไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ค่าสีเป็นสมบัติเชิงของแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุได้ง่ายที่สุด โดยที่ค่า $L^*-a^*-b^*$ จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ค่า L^* คือ ค่าสีที่บอกถึงความสว่างโดยมีความเป็นสีขาว (มีค่าเป็นหนึ่งร้อย) ไปจนถึงความเป็นสีดำ (มีค่าเป็นศูนย์) พบว่าที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดเท่ากัน ค่า L^* แปรผันตรงกับความเร็วของอากาศ ทำให้เนื้อลำไยมีความสว่าง ไม่คล้ำดำ เนื่องจากความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากเนื้อลำไยเพิ่มขึ้น ทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาการเป็นสีน้ำตาล หากความเร็วของอากาศเท่ากัน ค่า L^* แปรผกผันกับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด เนื่องจากความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นเนื้อลำไยจึงได้รับรังสีมากขึ้นเกิดเป็นความร้อนภายในทำให้สีของเนื้อลำไยเปลี่ยนแปลงไป ค่า a^* คือ ค่าสีที่บอกถึงความแดง (มีค่าเป็นบวก) ไปจนถึงความเป็นสีเขียว (มีค่าเป็นลบ) พบว่า ค่า a^* แปรผกผันกับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วของอากาศ ค่า b^* คือ ค่าสีที่บอกถึงความเหลือง (มีค่าเป็นบวก) ไปจนถึงความเป็นสีน้ำเงิน (มีค่าเป็นลบ) ค่า ΔE^* คือ ค่าสีที่บอกถึงค่าสีรวมของเนื้อลำไย สำหรับค่า hue angle เป็นค่าดัชนีบ่งบอกความเป็นสีน้ำตาล

ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ทำให้ความสว่างของเนื้อลำไยสูงสุดคือ 0.625 W/cm^2 ในทุกระดับความเร็วของอากาศ ส่งผลให้ค่าสีรวมมีค่าสูงสุด ในขณะที่ค่า hue angle ซึ่งแสดงถึงความเป็นสีน้ำตาลไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ จึงสรุปได้ว่าหากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสีดีที่สุดควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 W/cm^2 และเมื่อพิจารณาร่วมกับเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 10 ก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วของอากาศ 0.7 m/s ถึงแม้ว่าที่ความเร็ว 0.4 m/s จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า แต่ความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าสูงเกินระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา

ตารางที่ 10 อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วอากาศต่อคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง

IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	MC (% wb)		L*		a*		b*		↑E	Hue angle		a _W		
0.521	0.4	11.8±0.5	ab	30.54±1.35	^{ad}	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	15.5±2.7	bcd	31.18±1.69	^{abd}	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	18.0±2.4	cd	34.25±0.95	^c	3.45±2.33	^a	14.03±3.59	^{abc}	33.97±3.31	^b	12.65±6.29	^b	0.543±0.045	^a
0.625	0.4	19.2±0.4	d	31.93±0.66	^{abcd}	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	10.1±1.8	^a	33.54±1.48	^{bc}	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	14.7±3.6	bc	34.74±1.55	^c	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	10.5±2.2	^a	25.22±2.21	^e	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	12.7±2.0	ab	29.04±2.45	^d	6.32±2.96	^a	13.26±2.22	^{bc}	32.30±2.83	^{bc}	25.31±11.90	^{bc}	0.473±0.011	^a
0.729	1	15.7±1.7	bcd	32.15±0.9b	^{abc}	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

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สรุปผลการศึกษา

อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์. ซม.⁻² และความเร็วอากาศ 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ ต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพันธุ์ดอกเกรด A ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 – 28 มม. ซึ่งให้เห็นว่าแบบจำลอง Page สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ใกล้เคียงที่สุด หากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสีดีที่สุดควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 W/cm² และเมื่อพิจารณาพร้อมกับเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 0.7 m/s

งานที่ไม่ได้ดำเนินการ

งานที่ไม่ได้ดำเนินการ คือ การเก็บรักษาเนื้อลำไยอบแห้งเบื้องต้น ตามข้อเสนอโครงการซึ่งปรากฏในแผนการดำเนินงานช่วง 6 เดือนที่สี่

สาเหตุ ตัวอย่างเนื้อลำไยที่เก็บไว้เสียหายเนื่องจากตู้เย็นไม่ทำงาน ทำให้ตัวอย่างที่ได้มากจากขั้นตอนในช่วง 6 เดือนที่สามเสียไปทั้งหมด ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดใหม่ เพื่อให้สามารถศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งได้มากยิ่งขึ้น และดำเนินการวิจัยในหัวข้อ เพื่อชดเชยงานที่ไม่ได้ดำเนินการในช่วงเดือนที่สี่ สิ่งที่ได้ดำเนินการมีผลลัพธ์ดังนี้

1. บทความวิจัยในที่ประชุมวิชาการ เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิจากหลอดอินฟราเรดพร้อมคอมสเทชั่นรังสี
2. บทความวิจัยในที่ประชุมวิชาการ เรื่อง การศึกษาจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าสี เนื้อสัมผัส และการหดตัวเชิงปริมาตรของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (ภาษาไทย)
3. บทความวิจัยในที่ประชุมวิชาการ เรื่อง Kinetics of Color changes, Texture and Volume Shrinkage in Longan Flesh during Infrared Drying
4. บทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มข. เรื่อง คุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

บทวิจารณ์

การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด มีข้อได้เปรียบที่ทำให้อุณหภูมิภายในวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว เนื่องจากการแผ่รังสีไปยังวัสดุที่มีความชื้นเป็นองค์ประกอบโดยตรง ทำให้น้ำภายในวัสดุสั่น และเกิดความร้อนภายใน ทำให้ผิวภายนอกวัสดุไม่เหี่ยวแห้ง มีอัตราการอบแห้งสูง นอกจากนี้หลอดอินฟราเรดมี heat flux ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีขนาดเล็ก ทำให้สามารถออกแบบเครื่องอบแห้งให้มีขนาดกะทัดรัด ลดต้นทุนในการสร้างเครื่อง และให้ความร้อนอย่างสม่ำเสมอ และต้องการอากาศหมุนเวียนเพียงเล็กน้อย ทำให้ลดต้นทุนในการซื้อพัดลม และค่าพลังงาน และสามารถนำไปใช้ร่วมกับแหล่งความร้อนอื่น ๆ ได้อย่างง่ายเช่น ลมร้อน ไมโครเวฟ เป็นต้น แต่การนำไปประยุกต์ใช้ควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในช่วงที่ผลผลิตมีความชื้นต่ำ ๆ ซึ่งการระเหยความชื้นออกไปได้อย่างช้า ๆ

หนังสืออ้างอิง

- กรมส่งเสริมการส่งออก. 2546. ตลาดส่งออกลำไยแห้ง 10 ประเทศแรกของไทย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: http://www.dephtai.go.th/Interdata/service_product01/ลำไย1.doc
- จรรยา เงินมูล. 2549. ลดการใช้พลังงานในการอบแห้งลำไย. ว.โลกพลังงาน 9(30): 50-52.
- นวลศรี โชตินันท์. 2552. พัฒนาเครื่องอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเทคโนโลยีการเปลี่ยนอุณหภูมิ. นิตยสารเทคโนโลยี 9(104): 81-83.
- ศักดิ์ชัย ตรดี นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ. 2553. แบบจำลองคุณภาพทางโภชนาการของ ถั่วเหลืองภายใต้การอบแห้งด้วย NIR ร่วมกับฟลูอิดไดซ์เบด. ใน การสัมมนาวิชาการ วิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 1 – 3 กันยายน 2553 โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2546. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลไม้อบแห้ง: มผช. 136/2546. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: http://www.nectec.or.th/courseware/siamculture/otop\tis\tcps136_46.pdf
- สุนทร โหม่งปรัตน์ ทาเกมิ อาเบ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2548. สภาวะการอบแห้งเนื้อ ลำไยที่เหมาะสมด้วยรังสีอินฟราเรด, น.65-70. ใน การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายทอด ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 4, 4-5 กรกฎาคม 2548. โรงแรมโกลเด้นท์ไพน์ รีสอร์ท, เชียงราย.
- อำไพศักดิ์ ทิบุญมา ธนภัทร สุวรรณบุญ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2549. การอบแห้งเนื้อด้วย รังสีอินฟราเรด. วิศวกรรมสาร มช. 33(2): 169-180.
- อำไพศักดิ์ ทิบุญมา และ ธนภัทร สุวรรณบุญ. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลม ร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด. วิศวกรรมสาร มช. 34(2): 189-201.
- Acharyaviriya, A., S. Sopnronnarit and J. Tiansuwan. 2001. Study of Longan Flesh Drying. *Drying Tech.* 19: 2315-2329.
- 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, 16th ed. VA., USA.: AOAC.
- Chuang, H. K., C. Chiu and R. Paniagua. 1997. Avery Adhesive Test yields more performance data than traditional probe. *ADHESIVES AGE*, September: 18-23.
- 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.
- Hall, C.W. 1962. Theory of infrared drying. *Trans. ASAE* 5: 14-16.

- Hebbar, H. U. and N. K. Rastogi. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47: 1-5.
- 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.
- Jayaraman, K. S. and D. K. Das Gupta. 1995. Drying of fruits and vegetables. In *Handbook of industrial drying*, 2nd ed., ed. A. S. Mujumdar, ch. 21, 643-691. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Karathanos, V. T. and V. G. Belessiotis. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J. agric, Engna Res.* 74: 355-361.
- Lee, G., W. S. Kang and F. Hsieh. 2004. Thin-layer drying characteristics of chicory root slices. *Trans. ASAE* 45(5): 1619-1624.
- 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.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits drying hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48: 177-182.
- Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Far infrared-vacuum and -convection drying of welsh onion. *Trans. ASAE* 45(5): 1529-1555.
- 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.
- Sakai, N. and T. Hanzawa. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. & Tech.* 5: 357-362.
- 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.
- Togrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *J. Food Eng.* 77: 610-619.
- Venkatachalapathy, K. and G. S. V. Raghavan. 2000. Microwave drying of whole, sliced and pureed strawberries. *Agric Eng J.* 9(1): 29-39.
- 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.
- Wang, J. and K. Sheng. 2006. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT* 39: 247-255.

Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกอ. และ สกว.

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

- กำลังเขียนบทความเพื่อตีพิมพ์เรื่อง Kinetic of Color changes, Texture and Volume Shrinkage in Longan Flesh during Infrared drying

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงวิชาการ
 - ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด นำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนวิชา วท 341 หลักกระบวนการวิศวกรรมเกษตร ใช้ทำวิจัยต่อยอดเพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ และ นักวิจัยรุ่นใหม่ นอกจากนี้ยังใช้ทำ final year project อีกหลายเรื่อง

3. การนำเสนองานในที่ประชุมวิชาการ

- ภาษาอังกฤษ

- 2008 Kinetic of Color changes, Texture and Volume Shrinkage in Longan Flesh during Infrared drying. Food Innovation Asia Conference 2008 and 10th Agro-industrial Conference: Healthy Food For All. June 12-13, 2008, BITEC, Bangkok, Thailand. [With T. Abe & T. Kiatsirirot]
- 2006 Infrared Drying of Longan Flesh: Thin-layer Drying Model and Temperature Distribution. New Scholar meets TRF Senior Research Scholar Conference. October 12-14, 2006, Regent Cha Am Beach Resort, Phetchaburi, Thailand. [With T. Abe & T. Kiatsirirot]
- 2005 Optimum Strategy of Longan Flesh Drying by Infrared Radiant (Poster Presentation). New Scholar meets TRF Senior Research Scholar Conference. October 13-15, 2005, Regent Cha Am Beach Resort, Phetchaburi, Thailand. [With T. Abe & T. Kiatsirirot]

- ภาษาไทย

- 2008 Kinetic of Color changes, Texture and Volume Shrinkage in Longan Flesh during Infrared drying. 7th Heat and Mass Transfer Conference. March 13-14, 2008, Eurasia Chiang Mai Hotel, Chiang Mai, Thailand. [With T. Abe & T. Kiatsirirot]
- 2006 Optimum Condition of Longan Flesh Drying using Infrared Radiant. 7th Thai Society of Agricultural Engineering Annual Conference. Mahasarakham University, Mahasarakham, Thailand. January 23-24, 2006, [With T. Abe and T. Kiatsirirot]
- 2006 Parameters Affecting the Temperature Distribution from Metal Sheath Radiant Rod with Parabolic Reflector. 8th Agro-Industrial Conference "Food Innovation"

Organized by Food Science and Technology Association of Thailand & Agro-Industry Academic Council Association. BITEC, Bangkok, Thailand. June 15-16, 2006, [With O. Chaisriboon, K. Youmak]

- 2005 Optimum Strategy of Longan Flesh Drying Technique by Infrared Wave. 7th Agro-Industrial Conference “Advancing Food Technology: Bringing Thailand into the World’s Kitchen” Organized by Food Science and Technology Association of Thailand & Agro-Industry Academic Council Association. BITEC, Bangna, Bangkok, Thailand. June 22-24, 2005, [With T. Abe, T. Kiatsirirot]
- 2005 Optimum Strategy of Longan Flesh Drying Technique by Infrared Wave. 4th Heat and Mass Transfer Conference. July 4-5, 2005, Golden Pine Resort, Chiang Rai, Thailand. [With T. Abe, T. Kiatsirirot]

4. บทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ ชื่อ วารสารวิจัย มข.

- 2554 คุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

สภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยที่เหมาะสมด้วยคลื่นอินฟราเรด

OPTIMUM STRATEGY OF LONGAN FLESH DRYING TECHNIQUE BY INFRARED WAVE

สุนทร โม่งปราณีต* Takemi Abe ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ผู้รับผิดชอบบทความ* ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

โทรศัพท์: 0-5387-5570 โทรสาร: 0-5349-8902 E-mail: sunate@mju.ac.th

บทคัดย่อ

เนื้อลำไยสดพันธุ์ดอ จำนวน 500 กรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 80 % w.b. (มาตรฐานเปียก) ถูกทำให้แห้งจนเหลือความชื้น 26 % w.b. เพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรด ผลการศึกษาชี้ว่า ฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อลำไย) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างผิวฮีทเตอร์กับผิวลำไย 25 ซม. สามารถอบแห้งเนื้อลำไยได้ด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 120 °C ในตอนแรกแล้วลดเหลือ 80 °C เท่ากับอุณหภูมิเนื้อลำไยจนกระทั่งสิ้นสุดการอบแห้ง เมื่อความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบคงที่ ณ 1.1 เมตรต่อวินาที คุณลักษณะการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะเวลาให้ความร้อนและระยะการอบแห้งลดลง โดยไม่แสดงระยะการอบแห้งคงที่ การอบแห้งสูงสุดเกิดในนาทีที่ 20 ด้วยอัตรา 80 กรัมน้ำระเหยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที เมื่อคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 2.5 บาท ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลกรัมเนื้อลำไยแห้งมีค่า 53.18 บาท

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรด ลำไย อัตราการอบแห้ง คุณลักษณะการอบแห้ง

Abstract

The 500-gram fresh Longan flesh of Daw variety with 80% wet basis moisture content was dried until the 26 % wet basis moisture content attained. This was to study the optimum drying strategy by infrared wave. The result indicated that two infrared ceramic heaters with a power of 800 watts for each one (17.49 W per a gram of Longan flesh dry matter) which had a distance between their surfaces and material surface of 25 cm could be used for flesh Longan drying with the air temperature of 120 °C at the beginning and 80 °C which was equivalent to the product temperature toward the end of drying. When the air velocity over sample surface kept constantly at 1.1 m/s, the drying characteristic showed 2 drying periods, i.e., the warming-up and the falling rate drying periods, without having a constant drying period. The highest drying rate occurred after 20 minutes with the rate of 80 games of evaporated water per a kilo of Longan flesh dry matter. With an electric charge of 2.5 Baht per unit (kW-hrs), the electric energy consumption cost 53.18 Baht per a kilo of dried Longan flesh.

Keywords: Infrared drying, Longan, Drying rate, Drying characteristic

บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้ส่งออกที่ทำรายได้สูงสุดของประเทศชนิดหนึ่ง การส่งออกอยู่ในรูปลำไยสด 58.73 % ลำไยแช่แข็ง 1.42 % และลำไยอบแห้ง 39.85 % (กรมส่งเสริมการค้าส่งออก, 2546) จากตัวเลขดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการแปรรูปลำไยเป็นผลิตภัณฑ์โดยวิธีอบแห้ง การอบแห้งผลลำไยสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การอบแห้งผลลำไยทั้งเปลือกและการอบแห้งเนื้อลำไย เนื้อลำไยอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพในการส่งออกไปยังประเทศที่มีรายได้สูงซึ่งต้องการบริโภคสินค้าที่มีคุณภาพสูง

เครื่องอบแห้งเนื้อลำไยที่เกษตรกรใช้ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ลมร้อนแบบถาด อุปกรณ์กำเนิดลมร้อนมีทั้งใช้ไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และแก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง น้ำมันดีเซลมีปัญหาเรื่องการเผาไหม้ไม่หมด มีกลิ่นน้ำมันติดผลลำไย เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีปัญหาเรื่องการกระจายลมร้อนไม่สม่ำเสมอ จึงต้องหมุนพลิกกลับเพื่อให้เนื้อลำไยมีความแห้งใกล้เคียงกัน การควบคุมอุณหภูมิลมร้อนให้คงที่ทำได้ยาก และระยะเวลาในการอบแห้งนานมาก โดยเฉพาะในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

การอบแห้งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิทยาการแบบใหม่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือมนุษย์สร้างขึ้น ช่วงความถี่ที่นิยมนำมาใช้ในการอบแห้งคือ ช่วงคลื่นอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ คลื่นอินฟราเรดสามารถสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำ เป็นคลื่นสั้นความถี่สูงเหมาะกับการอบแห้งแบบชั้นบาง หลักการทำงานคือคลื่นจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนในตัววัสดุ (Hall, 1962; Sakai and Hanzawa, 1994) ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดและหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

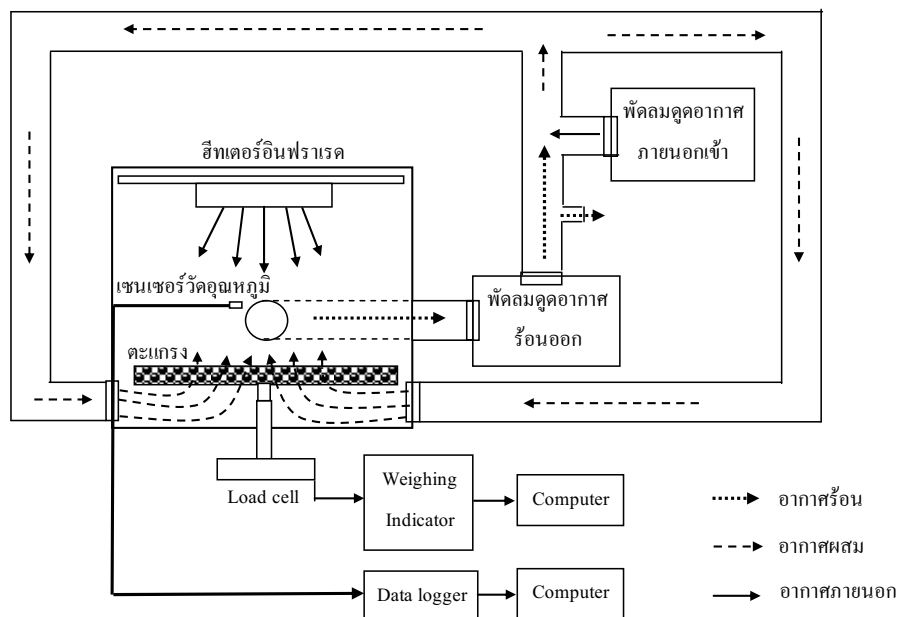
ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ประกอบด้วย 3 ระบบ คือ ระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นอินฟราเรด ระบบระบายอากาศและนำอากาศร้อนขึ้นบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ และอุปกรณ์อื่นๆ (รูปที่ 1)

1. ระบบการให้ความร้อน ประกอบด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดติดตั้งอยู่ตรงกลางห้องอบแห้งซึ่งมีมิติภายใน 50 x 50 x 60 ซม.
2. ระบบการระบายอากาศและนำอากาศร้อนกลับมาใช้ ประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศเพื่อดูดอากาศร้อนขึ้นภายในห้องอบแห้งออกสู่ภายนอกและนำอากาศผสมกลับมาใช้ใหม่
3. อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ตะแกรง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.) ขนาด 30 x 30 ซม. เพื่อรองรับเนื้อลำไยขณะอบ โหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์บันทึกและแสดงน้ำหนัก (Weighing indicator) เพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแบบต่อเนื่อง เครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในฮีตเตอร์ ชุดควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของเครื่อง และกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (Kilowatt-hour meter) เพื่อวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยฮีตเตอร์และพัดลมดูดอากาศ

ฮีตเตอร์อินฟราเรด

ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ทำจากเซรามิกชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อนดีเยี่ยม แข็งแรง และกระแสไฟฟ้าไม่รั่ว มีความสามารถในการกระจายความร้อนสูงและเร็ว อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดีมาก ชนิดของฮีตเตอร์อินฟราเรดที่เลือกศึกษา ได้แก่



รูปที่ 1. กลไกการทำงานของชุดทดสอบการอบเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรด

1. ฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งมีโพรงช่องว่างภายในเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนแผ่กระจายออกไปด้านหลัง ดังนั้นพลังงานความร้อนทั้งหมดจะกระจายไปด้านเดียว ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการความร้อนสูงและต้องกระจายความร้อนให้ทั่วถึงเท่า ๆ กันบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการอบ การที่พื้นผิวเป็นสีดำก็เพื่อต้องการให้ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) มีค่ามากที่สุด

2. ฮีตเตอร์เซรามิกหลอดยาว 30 ซม. ขนาด 40 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีแบบโคมเดี่ยว (1 หลอดต่อ 1 โคม) เพื่อช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรดให้พุ่งไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น

3. ฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมพื้นผิวสีขาว ขนาด 2.4 กิโลวัตต์ การที่พื้นผิวเป็นสีขาวก็จะทำให้ค่าการแผ่รังสีมีค่าน้อยกว่าพื้นผิวสีดำ พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจึงต่ำกว่า

ลำไยที่ใช้ในการทดสอบ

ลำไยพันธุ์คือเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ขนาดของผลแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (20-25 มม.) กลาง (25.1-28 มม.) และใหญ่ (28.1-31 มม.) ความชื้นเนื้อลำไยเริ่มต้น 80 % w.b (มาตรฐานเปียก) โดยผลลำไยซึ่งถูกเอาเปลือกและเมล็ดออกแล้วจะถูกจัดเรียงบนตะแกรงแบบชั้นเดียว (Single layer) ด้วยการคว่ำผลลำไยลง อบจนมีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 26 % w.b ซึ่งเป็นระดับความชื้นของผลไม้แห้งที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (Venkatachalapathy and Raghavan, 2000) เก็บเนื้อลำไยไว้ในถุงพลาสติกในที่ที่มีอุณหภูมิลบ 5 องศาเซลเซียส เพื่อรอการศึกษาคุณภาพต่อไป

การวิเคราะห์การอบแห้ง

1. เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการจากผลผลิตสดเป็นผลิตภัณฑ์แห้งที่มีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 26 % w.b.

2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ได้แก่ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการต่อน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปได้ (Pakowski and Mujumdar, 1995)

การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อลำไยแห้ง

1. สีของเนื้อลำไยแห้ง วัดโดยเครื่องมือวัดค่าสีและสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE Plus โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเทียบเท่าแสงกลางวัน D65 มุมฐานการวัดของกล้อง 10 องศา ($10^\circ/D65$) และมุมการวางของแหล่งแสงกับตัวตรวจวัด 45 องศา ($45/0$) ทำการวัดไม่ต่ำกว่า 3 ซ้ำ ๆ ละไม่ต่ำกว่า 3 การอ่านค่า (Reading) แสดงค่าสี L^* , a^* และ b^* ตามระบบการวัดสีของ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยที่ค่า L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $L^* 100$ ซึ่งแสดงถึงสีขาว ไปจนถึง $L^* 0$ ซึ่งแสดงถึงสีดำ แกน $+a^*$ จะบรรยายถึงความเป็นสีแดงไปจนถึง $-a^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีเขียว ส่วนแกน $+b^*$ จะแสดงความเป็นสีเหลืองไปจนถึง $-b^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีน้ำเงิน
2. ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Water activity, a_w) วัดโดยใช้เครื่อง a_w Meter ซึ่งแสดงค่า a_w ออกมาเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วยโดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่า a_w ขั้นต่ำสุดสำหรับผลไม้แห้งควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.70 (Jayaraman and Das Gupta, 1995) ดังนั้นเนื้อลำไยอบแห้งที่มีค่า a_w ต่ำกว่าค่า a_w ขั้นต่ำสุดจึงปลอดภัยต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ โดยตัวเลขยิ่งสูงผลิตภัณฑ์ยิ่งมีโอกาสมากต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์
3. ความเหนียวของผลิตภัณฑ์ วัดโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น XT plus, TAStable micro systems (KU, Texture Technologies Inc) ด้วยการทดสอบการถูกกระทำเชิงกลแบบอัด (Mechanical compression test) ความเร็วของหัวกด 30 มม.ต่อวินาทีและความเร็วถอยกลับ 20 มม.ต่อวินาที หัวกดเป็นเหล็กสแตนเลสทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมเทียบเท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. บันทึกค่าแรงกดและการเปลี่ยนรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Texture exponent 32 ด้วยอัตราการบันทึก 400 จุดต่อวินาที ค่าความเหนียวแปรผลจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) กับค่าของแรงเริ่มแรกสูงสุด (Initial peak force) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหนียวมากค่าพลังงานยิ่งสูง (Chuang *et al.*, 1997)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษานิคมของฮีเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 1 ซ้ำฮีเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อลำไย) ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านสีและความเหนียวดีที่สุด โดยใช้เวลาในการสร้างพลังงานความร้อนจนอุณหภูมิอากาศร้อนจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ 80°C ภายในเวลาสั้นเพียง 10 นาที ฮีเตอร์อินฟราเรดชนิดหลอดเซรามิกมีการกระจายพลังงานความร้อนไม่สม่ำเสมอ และยังใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ 80°C นานมากกว่า 4 เท่าของแบบแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ดังนั้นฮีเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำจึงเหมาะสำหรับการอบเนื้อลำไย

ตารางที่ 1. อิทธิพลของชนิดฮีเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ฮีเตอร์		เวลาอบ (นาที)	พลังงาน จำเพาะ (kJ/g)	สี			a_w	ความเหนียว (N-mm)
ชนิด	W/g solid			L^*	a^*	b^*		
I	8.75	158.5	22.005	16.72	3.72	14.2	0.653	7.019
I-I	17.49	163.5	23.145	19.37	2.655	12.645	0.661	7.5405
II	8.75	154.5	22.005	17.19	3.76	10.06	0.677	8.7835
III	26.24	155	22.26	20.2	2.415	9.235	0.6355	6.9945

ผลการศึกษาอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

การแปรค่าอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งถูกกำหนดจากเซนเซอร์อุณหภูมิชนิด K ที่ติดตั้งอยู่ในห้องอบเหนือผิวของตะแกรงรองรับลำไย 75 มม. และห่างจากผนังห้องอบ 165 มม. ปลายอีกด้านหนึ่งของเซนเซอร์ต่อเข้ากับเครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงไป ผลการศึกษาเบื้องต้นชี้ว่าอุณหภูมิของเนื้อลำไย 80 °C เป็นอุณหภูมิวิกฤต ดังนั้นหากทริตเมนที่ใดที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C อุณหภูมิของอากาศจะถูกลดลงให้เหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤตเมื่ออุณหภูมิของเนื้อลำไยเข้าสู่ 80 °C

การอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนมากกว่า 80 °C สามารถทำได้หากมีการลดอุณหภูมิอากาศร้อนให้เหลือ 80 °C โดยอุณหภูมิอากาศสามารถเพิ่มได้ตั้งแต่มากกว่า 80 °C จนถึงมากที่สุดในระดับ 120 °C โดยในระดับนี้ระยะเวลาในการอบแห้งสามารถลดลงได้กว่าร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับการอบด้วยอุณหภูมิวิกฤตตลอดเวลา อีกทั้งยังให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านสีที่ดีอีกด้วย (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2. อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

อุณหภูมิอากาศ) °C	เวลาอบแห้ง) นาที(	พลังงานจำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a _w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
60	268	24.17	18.52	1.28	9.48	0.684	6.2635
80	182.5	22.485	15.315	1.82	9.015	0.675	7.2625
100	163	23.355	19.845	2.94	12.815	0.661	7.8335
120	131	19.655	20.905	4.84	12.755	0.6495	7.853
140	152	22.005	19.695	3.83	12.055	0.602	9.2035

ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวฮีตเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 3 ชี้ว่าการอบแห้งที่ระยะห่าง 10 และ 15 เซนติเมตร ใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งยาวนานเนื่องจากปรากฏการณ์ผิวรอบนอกของวัสดุแข็งตัว (Case hardening) การอบแห้งที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร ใช้พลังงานในระดับปานกลาง ส่วนในระยะมากกว่าและเท่ากับ 25 เซนติเมตร ใช้พลังงานในการแห้งต่ำที่สุด ด้วยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดใกล้เคียงกัน แต่ในการเลือกใช้งานจริงควรพิจารณาถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่ใช้ในการทำห้องอบแห้ง ระยะ 25 ซม. จึงเป็นระยะห่างที่น่าจะเหมาะสมที่สุด ส่วนการอบผลผลิตที่มีปริมาณน้ำตาลต่ำสามารถใช้ระยะห่างแคบ ๆ ได้ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อกับระยะ 15-5 ซม. (1979 Dagerskog,) เมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับระยะ 3.6 เซนติเมตร (Hebbbar and Rastogi, 2001) (หรือใบหอมสดสับกับระยะ 10 ซม. (2002, .et al Mongpraneet) .

ตารางที่ 3. อิทธิพลของระยะห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวฮีตเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ระยะห่าง) มม.(	เวลาอบแห้ง) นาที(	พลังงานจำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a _w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		

10	187	20.07	15.02	2.505	8.955	0.701	9.012
15	227	25.465	18.655	3.200	9.205	0.546	8.229
20	175	23.41	19.095	1.545	7.910	0.616	10.332
25	156	21.885	18.175	1.980	9.975	0.6655	7.0095
30	142	20.645	19.525	3.605	11.140	0.6855	7.655
35	133	21.33	16.995	1.355	7.310	0.6885	6.076

ผลการศึกษาความเร็วของอากาศในตำแหน่งกึ่งกลางตะแกรงรองรับลำไย

ตารางที่ 4 ชี้ว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากอุณหภูมิของผลผลิตลดลงเพราะความร้อนสูญเสียไปกับพัดลม อัตราการอบแห้งจึงลดลง แต่ความสิ้นเปลืองพลังงานต่อน้ำหนักน้ำที่ระเหยมีแนวโน้มต่ำสุดในระดับความเร็ว 0.7 ถึง 1.1 เมตรต่อวินาที แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทุกด้านสำหรับความเร็ว 1.1 เมตรต่อวินาทีดีที่สุดใกล้เคียงกับผลของ Achariyaviriya และคณะ (2001) ณ ระดับ 0.7 เมตร/วินาที ผลการวิจัยของ Karathanos และ Belessiotis (1999) ซึ่งใช้การอบแห้งแบบลมร้อนอบผลไม้รสหวานหลายชนิดชี้ว่าความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตควรมีค่า 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ส่วนการอบกึ่งด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 1.25 เมตรต่อวินาที (Maskan, 2001)

ตารางที่ 4.4 อิทธิพลของความเร็วของอากาศเหนือพื้นผิวของเนื้อลำไยที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ความเร็ว อากาศ (s/m)	เวลา อบแห้ง (นาฬิกา)	พลังงาน จำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a_w	ความ เหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
0.4	184.5	21.83	20.085	1.51	7.615	0.642	9.5845
0.7	153.5	20.77	19.635	1.82	8.625	0.6475	6.514
1.1	145.0	21.645	19.040	4.92	12.845	0.627	7.665
1.5	129.0	21.925	19.065	3.71	11.210	0.6605	5.979
1.8	122.0	23.125	23.335	3.405	12.180	0.664	10.601

สภาวะการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

สรุปสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยเครื่องอบอินฟราเรดได้ดังนี้คือ

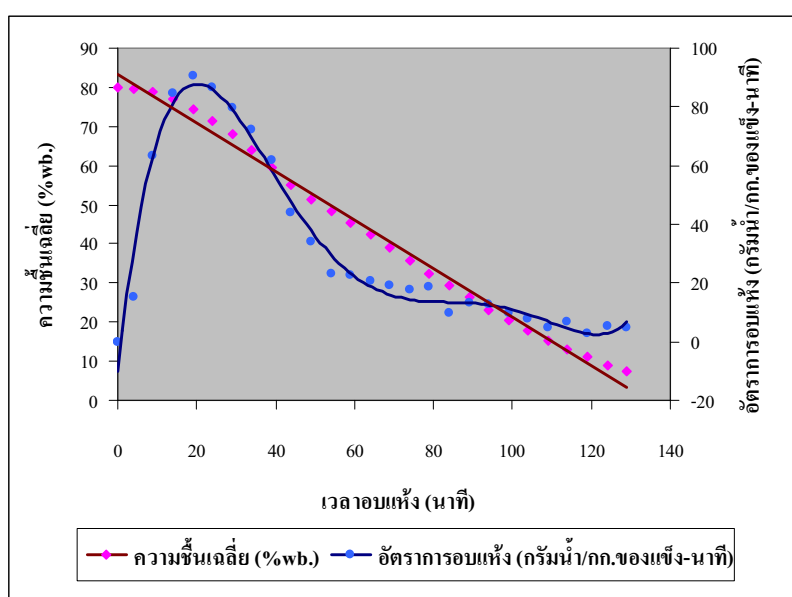
- ฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดฮีตเตอร์เซรามิกสีเหลืองจัตุรัส (120 มม.) พื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว
- อุณหภูมิอากาศร้อน 120 องศาเซลเซียส แล้วลดอุณหภูมิเหลือ 80 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเนื้อลำไยเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส
- ระยะห่างระหว่างผิวฮีตเตอร์ถึงผิวลำไยเท่ากับ 25 ซม.
- ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบเท่ากับ 1.1 เมตรต่อวินาที

เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

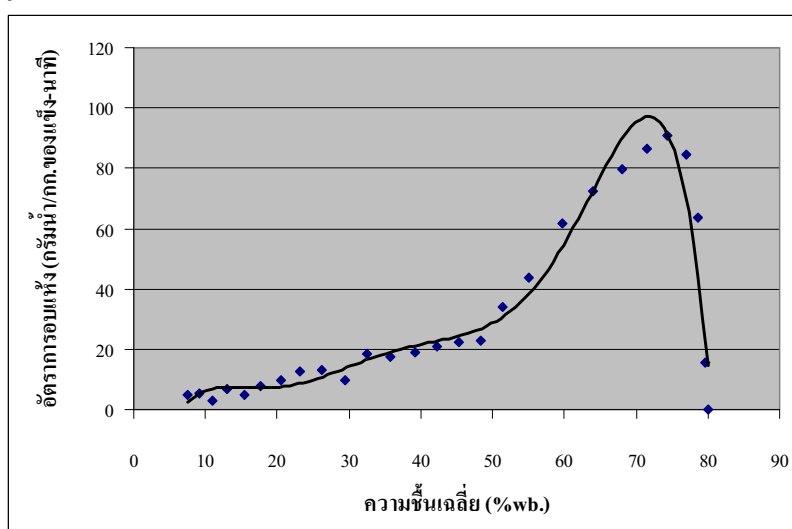
การศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระทำในสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ผลโดยแสดงค่าในหน่วยกรัมของน้ำที่ระเหยต่อกิโลกรัมของแห้งของเนื้อลำไยต่อ

หน่วยเวลาการอบแห้ง รูปที่ 1 และ 2 ซึ่งอัตราการอบแห้งเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดภายในเวลา 20 นาที ณ 80 กรัม น้ำต่อ กิโลกรัม ของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ซึ่งแสดงถึงช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ (Warming-up drying period) เนื่องจากเนื้อลำไยมีความชื้นสูงจึงดูดซับคลื่นอินฟราเรดได้เร็ว (ตามความเป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริก) ทำให้อุณหภูมิของเนื้อลำไยสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งสูงสุดแล้ว อัตราการอบแห้งก็ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period) เนื่องจากลำไยมีปริมาณน้ำลดลงจึงมีความสามารถในการรับคลื่นอินฟราเรดได้ต่ำ อัตราการเคลื่อนย้ายมวลจึงลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) ผลการศึกษานี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการอบแห้งองุ่นด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Tulasidas *et al.*, 1993)

การประเมินค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเมื่ออบแห้งเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดในสภาวะที่เหมาะสม โดยคิดเฉพาะต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียว ชี้ให้เห็นว่า ค่าใช้จ่ายพลังงานต่อกิโลกรัมเนื้อลำไยแห้ง 53.18 บาท เมื่อคิดค่าไฟฟ้าหน่วยละ 2.5 บาท



รูปที่ 1. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของลำไยและอัตราการอบแห้งกับเวลา



รูปที่ 2. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นเฉลี่ยของลำไย

สรุปผลการศึกษา

1. ชนิดของฮีทเตอร์อินฟราเรดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบเนื้อลำไย ควรเป็นฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลือง จัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อลำไย)
2. อุณหภูมิวิกฤตในการอบเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดช้อกได้ด้วยอุณหภูมิของเนื้อลำไยที่ 80°C
3. อุณหภูมิอากาศร้อนเหนือพื้นผิวตะแกรงรองรับลำไยในขณะอบสามารถตั้งได้สูงสุดถึง 120 °C แต่เมื่ออุณหภูมิภายในเนื้อลำไยที่กำลังอบแห้งเข้าสู่อุณหภูมิวิกฤต จะต้องปรับลดอุณหภูมิของอากาศลงเหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต
4. ระยะห่างระหว่างพื้นผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับพื้นผิวของเนื้อลำไยควรมีระยะ 25 ซม.
5. ความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตที่กำลังอบแห้งควรมีค่า 1.1 เมตรต่อวินาที
6. การอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม แสดงอัตราการอบแห้งเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดประมาณ 80 กรัมต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ภายในเวลา 20 นาที เส้นลักษณะเฉพาะการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะการให้ความร้อนเบื้องต้นแล้วสุดและระยะอัตราการอบแห้งลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะอัตราการอบแห้งคงที่
7. การประเมินค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาเฉพาะต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าโดยไม่รวมค่าใช้จ่ายคงที่และค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานอื่น ๆ และคิดค่าไฟฟ้าเฉลี่ยหน่วยละ 2.5 บาท การอบเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดจะมีค่าใช้จ่ายพลังงานต่อกิโลกรัมเนื้อลำไยแห้ง 53.18 บาท

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษากับสกว.

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. 2546. ตลาดส่งออกลำไยแห้ง 10 ประเทศแรกของไทย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก:

http://www.depthai.go.th/Interdata/service_product01/ลำไย1.doc

Acharyaviriyaya, A., S. Sopnronnarit and J. Tiansuwan. 2001. Study of Longan Flesh Drying. *Drying Tech.* 19: 2315-2329.

Chuang, H. K., C. Chiu and R. Paniagua. 1997. Avery Adhesive Test yields more performance data than traditional probe. *ADHESIVES AGE*, September: 18-23.

Dagerskog, M. 1979. Infra-red radiation for food processing: II. Calculation of heat penetration during infra-red frying of meat products. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* 12: 252-257.

Hall, C. W. 1962. Theory of infrared drying. *Trans. ASAE* 5: 14-16.

Hebbbar, H. U. and N. K. Rastogi. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47: 1-5.

- Jayaraman, K. S. and D. K. Das Gupta. 1995. Drying of fruits and vegetables. In *Handbook of industrial drying*, 2nd ed., ed. A. S. Mujumdar, ch. 21, 643-691. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Karathanos, V. T. and V. G. Belessiotis. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J. agric, Engna Res.* 74: 355-361.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits drying hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48: 177-182.
- Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Far infrared-vacuum and -convection drying of welsh onion. *Trans. ASAE* 45(5): 1529-1555.
- 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.
- Sakai, N. and T. Hanzawa. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. & Tech.* 5: 357-362.
- Tulasidas, T. N., G. S. Raghavan and E. R. Norris. 1993. Microwave and convective drying of grapes. *Tran. ASAE* 36(6): 1861-1865.
- Venkatachalapathy, K. and G. S. V. Raghavan. 2000. Microwave drying of whole, sliced and pureed strawberries. *Agric Eng J.* 9(1): 29-39.

สภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยที่เหมาะสมด้วยคลื่นอินฟราเรด

OPTIMUM STRATEGY OF LONGAN FLESH DRYING TECHNIQUE BY INFRARED WAVE

สุนทร โม่งปรานี

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290
โทรศัพท์: 0-5387-5570
โทรสาร: 0-5349-8902
E-mail address: sunate@mju.ac.th

Takemi Abe

Laboratory of Agricultural Process
Engineering
Department of Biomechanical Systems
Faculty of Agriculture, Ehime University
3-5-7 Tarumi, Matsuyama
790-8566, JAPAN

ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ.ห้วยแก้ว อ.เมือง
จ.เชียงใหม่ 50200
โทรศัพท์ 0-5394-4146 ต่อ 943
โทรสาร 0-5394-4145

บทคัดย่อ

เนื้อลำไยสดพันธุ์ดอ จำนวน 500 กรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 80 % w.b. (มาตรฐานเปียก) ถูกทำให้แห้งจนเหลือความชื้น 26 % w.b. เพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรด ผลการศึกษาชี้ว่า ฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อลำไย) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างผิวฮีตเตอร์กับผิวลำไย 25 ซม. สามารถอบแห้งเนื้อลำไยได้ด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 120 °C ในตอนแรก แล้วลดเหลือ 80 °C เท่ากับอุณหภูมิเนื้อลำไยจนกระทั่งสิ้นสุดการอบแห้ง เมื่อความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบคงที่ ณ 1.1 เมตรต่อวินาที คุณลักษณะการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิตและระยะการอบแห้งลดลง โดยไม่แสดงระยะการอบแห้งคงที่ การอบแห้งสูงสุดเกิดในนาทีที่ 20 ด้วยอัตรา 80 กรัม น้ำระเหยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 21.65 กิโลจูลต่อกรัม น้ำระเหย

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรด ลำไย อัตราการอบแห้ง คุณลักษณะการอบแห้ง

ABSTRACT

The 500-gram longan flesh of Daw variety with moisture content approximately 80 % w.b. (wet basis) was used as the experimental material. This amount of longan was dried until the final moisture content of 26% w.b. was attained. The results indicated that a pair of the infrared ceramic heaters with a black square surface of 800 W each (17.49 W per a gram of longan flesh dry matter) which had a distance between their surfaces and material surface of 25 cm could be used for flesh longan drying with the initial air temperature of 120 °C followed by 80 °C which was equivalent to the product temperature toward the end of drying. When the air velocity over sample surface kept constantly at 1.1 m/s, the drying characteristic had 2 periods, i.e., warming-up and falling rate drying periods, without having a constant one. The highest drying rate occurred after 20 minutes at 80 grams of evaporated water per a kilogram of longan flesh dry matter. The specific heat consumption was 21.65 kJ per a kilogram of water evaporated.

Keywords: Infrared drying, Longan, Drying rate, Drying characteristic

บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้ส่งออกที่ทำรายได้สูงสุดของประเทศชนิดหนึ่ง การส่งออกอยู่ในรูปลำไยสด 58.73 % ลำไยแช่แข็ง 1.42 % และลำไยอบแห้ง 39.85 % (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2546) จากตัวเลขดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการแปรรูปลำไยเป็นผลิตภัณฑ์โดยวิธีอบแห้ง การอบแห้งผลลำไยสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การอบแห้งผลลำไยทั้งเปลือกและการอบแห้งเนื้อลำไย เนื้อลำไยอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพในการส่งออกไปยังประเทศที่มีรายได้สูงซึ่งต้องการบริโภคสินค้าที่มีคุณภาพสูง

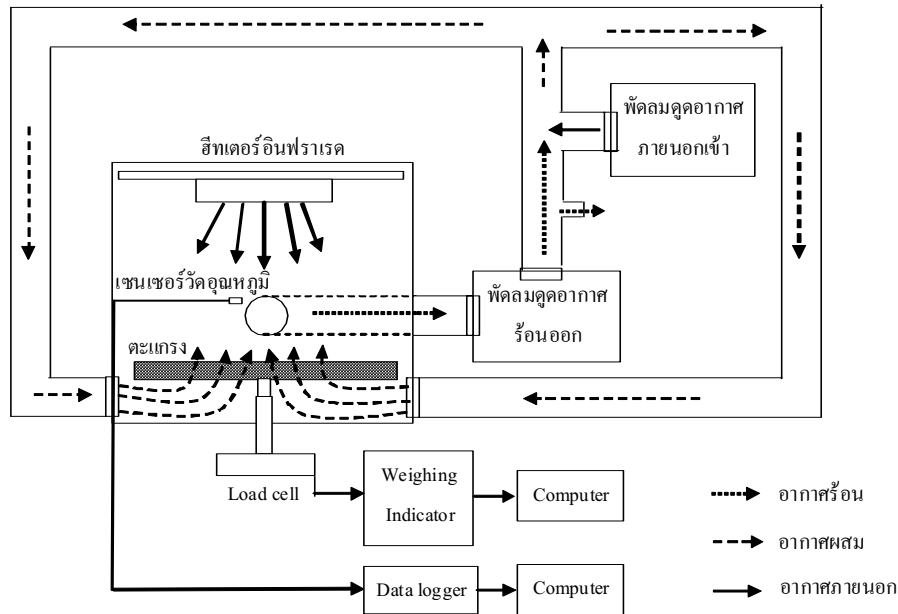
เครื่องอบแห้งเนื้อลำไยที่เกษตรกรใช้ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ลมร้อนแบบถาด อุปกรณ์กำเนิดลมร้อนมีทั้งใช้ไฟฟ้า น้ำมัน ดีเซล และแก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง น้ำมันดีเซลมีปัญหาเรื่องการเผาไหม้ไม่หมด มีกลิ่นน้ำมันติดผลลำไย เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนมีปัญหาเรื่องการกระจายลมร้อนไม่สม่ำเสมอ จึงต้องหมั่นพลิกกลับเพื่อให้เนื้อลำไยมีความแห้งใกล้เคียงกัน การควบคุมอุณหภูมิลมร้อนให้คงที่ทำได้ยาก และระยะเวลาในการอบแห้งนานมากโดยเฉพาะในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

การอบแห้งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิทยาการแบบใหม่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือมนุษย์สร้างขึ้น ช่วงความถี่ที่นิยมนำมาใช้ในการอบแห้งคือ ช่วงคลื่นอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ คลื่นอินฟราเรดสามารถสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำ เป็นคลื่นสั้นความถี่สูงเหมาะกับการอบแห้งแบบชั้นบาง หลักการทำงานคือคลื่นจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนในตัวของวัสดุ (Hall, 1962; Sakai and Hanzawa, 1994) ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบเนือลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดและหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยคลื่นอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ประกอบด้วย 3 ระบบ คือ ระบบให้ความร้อนด้วยคลื่นอินฟราเรด ระบบระบายอากาศขึ้นและนำอากาศร้อนขึ้นบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ และอุปกรณ์อื่นๆ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1. กลไกการทำงานของชุดทดสอบการอบเนือลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรด

1. ระบบการให้ความร้อน ประกอบด้วยฮีเตอร์อินฟราเรดติดตั้งอยู่ตรงกลางห้องอบแห้งซึ่งมีมิติภายใน 50 x 50 x 60 ซม.
2. ระบบการระบายอากาศและนำอากาศร้อนกลับมาใช้ ประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศเพื่อดูดอากาศร้อนขึ้นภายในห้องอบแห้งออกสู่ภายนอกและนำอากาศผสมกลับมาใช้ใหม่
3. อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ตะแกรง (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.) ขนาด 30 x 30 ซม. เพื่อรองรับเนือลำไยขณะอบ โหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์บันทึกและแสดงน้ำหนัก (Weighing indicator) เพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแบบต่อเนื่อง เครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในฮีเตอร์ ชุดควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของเครื่อง และ กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (Kilowatt-hour meter) เพื่อวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยฮีเตอร์และพัดลมดูดอากาศ

ฮีเตอร์อินฟราเรด

ฮีเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ทำจากเซรามิกชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อนดีเยี่ยม แข็งแรง และกระแสไฟฟ้าไม่รั่ว มีความสามารถในการกระจายความร้อนสูงและเร็ว อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดีมาก ชนิดของฮีเตอร์อินฟราเรดที่เลือกศึกษา ได้แก่

1. ฮีเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งมีโพรงช่องว่างภายในเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนแผ่กระจายออกไปด้านหลัง ดังนั้นพลังงานความร้อนทั้งหมดจะกระจายไปด้านเดียว ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการความร้อนสูงและต้องกระจายความร้อนให้ทั่วถึงเท่า ๆ กันบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการอบ การที่พื้นผิวเป็นสีดำก็เพื่อต้องการให้ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) มีค่ามากที่สุด
2. ฮีเตอร์เซรามิกหลอดยาว 30 ซม. ขนาด 40 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีแบบโคมเดี่ยว (1 หลอดต่อ 1 โคม) เพื่อช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรดให้พุ่งไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น
3. ฮีเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมพื้นผิวสีขาว ขนาด 2.4 กิโลวัตต์ การที่พื้นผิวเป็นสีขาวก็จะทำให้ค่าการแผ่รังสีมีค่าน้อยกว่าพื้นผิวสีดำ พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจึงต่ำกว่า

ลำไยที่ใช้ในการทดสอบ

ลำไยพันธุ์ต่อเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ขนาดของผลแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (20-25 มม.) กลาง (25.1-28 มม.) และใหญ่ (28.1-31 มม.) ความชื้นเนือลำไยเริ่มต้น 80 % w.b (มาตรฐานเปียก)

โดยผลล่ำไยซึ่งถูกเอาเปลือกและเมล็ดออกแล้วจะถูกจัดเรียงบนตะแกรงแบบชั้นเดียว (Single layer) ด้วยการคว่ำผลล่ำไยลง อบจนมีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 26 % w.b ซึ่งเป็นระดับความชื้นของผลไม้แห้งที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (Venkatachalapathy and Raghavan, 2000) เก็บเนื้อล่ำไยไว้ในถุงพลาสติกในที่ที่มีอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเพื่อรอการศึกษาคุณภาพต่อไป

การวิเคราะห์การอบแห้ง

1. เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการจากผลผลิตสดเป็นผลิตภัณฑ์แห้งที่มีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 26 % w.b.
2. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ได้แก่ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการต่อน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปได้ (Pakowski and Mujumdar, 1995)

การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อล่ำไยแห้ง

1. สีของเนื้อล่ำไยแห้ง วัดโดยเครื่องมือวัดค่าสีและสเปกตรัม (Spectrophotometer) ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE Plus โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเทียบเท่าแสงกลางวัน D65 มุมฐานการวัดของกล้อง 10 องศา ($10^\circ/D65$) และมุมการวางของแหล่งแสงกับตัวตรวจวัด 45 องศา ($45/0$) ทำการวัดไม่ต่ำกว่า 3 ซ้ำ ๆ ละไม่ต่ำกว่า 3 การอ่านค่า (Reading) แสดงค่าสี L^* , a^* และ b^* ตามระบบการวัดสีของ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยที่ค่า L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า L^* 100 ซึ่งแสดงถึงสีขาวไปจนถึง L^* 0 ซึ่งแสดงถึงสีดำ แกน $+a^*$ จะบรรยายถึงความเป็นสีแดงไปจนถึง $-a^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีเขียว ส่วนแกน $+b^*$ จะแสดงความเป็นสีเหลืองไปจนถึง $-b^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีน้ำเงิน

2. ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Water activity, a_w) วัดโดยใช้เครื่อง a_w Meter ซึ่งแสดงค่า a_w ออกมาเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วยโดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่า a_w ขั้นต่ำสุดสำหรับผลไม้แห้งควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.70 (Jayaraman and Das Gupta, 1995) ดังนั้นเนื้อล่ำไยอบแห้งที่มีค่า a_w ต่ำกว่าค่า

ตารางที่ 1. อิทธิพลของชนิดฮีเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อล่ำไย

ฮีเตอร์		เวลาอบ (นาทึ่)	พลังงาน จำเพาะ (kJ/g)	สี			a_w	ความเหนียว (N-mm)
ชนิด	W/g solid			L^*	a^*	b^*		
I	8.75	158.5	22.005	16.72	3.72	14.2	0.653	7.019
I-I	17.49	163.5	23.145	19.37	2.655	12.645	0.661	7.5405
II	8.75	154.5	22.005	17.19	3.76	10.06	0.677	8.7835
III	26.24	155	22.26	20.2	2.415	9.235	0.6355	6.9945

ผลการศึกษาอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

การแปรค่าอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งถูกกำหนดจากเซนเซอร์อุณหภูมิชนิด K ที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องอบเหนือผิวของตะแกรงรองรับล่ำไย 75 มม. และห่างจากผนังห้องอบ 165 มม. ปลายอีกด้านหนึ่งของเซนเซอร์ต่อเข้ากับเครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิ

a_w ขั้นต่ำสุดจึงปลอดภัยต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ โดยตัวเลขยิ่งสูงผลิตภัณฑ์ยิ่งมีโอกาสมากต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์

3. ความเหนียวของผลิตภัณฑ์ วัดโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส Texture analyzer,) รุ่น XT plus, .TAStable micro systems Texture (KU ,.Technologies Inc ด้วยการทดสอบการถูกกระทำเชิงกลแบบอัด (Mechanical compression test) ความเร็วของหัวกด 30 มม.ต่อวินาทีและความเร็วถอยกลับ 20 มม.ต่อวินาที หัวกดเป็นเหล็กสแตนเลสทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมเทียบเท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. บันทึกค่าแรงกดและการเปลี่ยนรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Texture exponent 32 ด้วยอัตราการบันทึก 400 จุดต่อวินาที ค่าความเหนียวแปรผลจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) กับค่าของแรงสูงสุด (Peak force) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ผลิตภัณฑ์ยังมีความเหนียวมากพลังงานยังีมีค่าสูง (Chuang *et al.*, 1997)

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการศึกษาชนิดของฮีเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 1. ชั่วฮีเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อล่ำไย) ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านสีและความเหนียวดีที่สุด โดยใช้เวลาในการสร้างพลังงานความร้อนจนอุณหภูมิอากาศร้อนจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ 80°C ภายในเวลาสั้นเพียง 10 นาที ฮีเตอร์อินฟราเรดชนิดหลอดเซรามิกมีการกระจายพลังงานความร้อนไม่สม่ำเสมอ และยังใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิอากาศร้อนจากอุณหภูมิห้องไปเป็นอุณหภูมิ 80°C นานมากกว่า 4 เท่าของแบบแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ดังนั้นฮีเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำจึงเหมาะสำหรับการอบเนื้อล่ำไย

เพื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงไป ผลการศึกษาเบื้องต้นชี้ว่าอุณหภูมิของเนื้อล่ำไย 80 °C เป็นอุณหภูมิวิกฤต ดังนั้นหากทรีตเมนต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C อุณหภูมิของ

อากาศจะถูกลดลงให้เหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤตเมื่ออุณหภูมิของเนื้อลำใยเข้าสู่ 80 °C

การอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนมากกว่า 80 °C สามารถทำให้หากมีการลดอุณหภูมิอากาศร้อนให้เหลือ 80 °C โดยอุณหภูมิอากาศสามารถเพิ่มได้ตั้งแต่มากกว่า 80 °C จนถึงมากที่สุดในระดับ

ตารางที่ 2.อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีต่อการอบเนื้อลำใย

อุณหภูมิอากาศ)°(C	เวลาอบแห้ง)นาที่(	พลังงานจำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a _w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
60	268	24.17	18.52	1.28	9.48	0.684	6.2635
80	182.5	22.485	15.315	1.82	9.015	0.675	7.2625
100	163	23.355	19.845	2.94	12.815	0.661	7.8335
120	131	19.655	20.905	4.84	12.755	0.6495	7.853
140	152	22.005	19.695	3.83	12.055	0.602	9.2035

ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างผิวลำใยถึงผิวฮีเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 3ชี้ว่าการอบแห้งที่ระยะห่าง 10 และ15 เซนติเมตร ใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งยาวนาน เนื่องจากปรากฏการณ์ผิวรอบนอกของวัสดุแข็งตัว (Case hardening) การอบแห้งที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร ใช้พลังงานในระดับปานกลาง ส่วนในระยะมากกว่าและเท่ากับ 25 เซนติเมตร ใช้พลังงานในการแห้งต่ำที่สุด ด้วยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดใกล้เคียงกัน แต่ในการเลือกใช้งานจริงควรพิจารณาถึงความเหมาะสมและความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เมื่อ

120 °C โดยในระดับนี้ระยะเวลาในการอบแห้งสามารถลดลงได้กว่าร้อยละ 33เมื่อเทียบกับการอบด้วยอุณหภูมิวิกฤตตลอดเวลา อีกทั้งยังให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านสีที่ดีที่สุดอีกด้วย (ตารางที่ 2)

พิจารณาถึงวัสดุที่ใช้ในการทำห้องอบแห้ง ระยะ 25 ซม.จึงเป็นระยะห่างที่น่าจะเหมาะสมที่สุด ส่วนการอบผลผลิตที่มีปริมาณน้ำตาลต่ำสามารถใช้ระยะห่างแคบ ๆ ได้ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อกับระยะ 15-5 ซม (1979Dagerskog,) .เมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับระยะ 3.6 เซนติเมตร)Hebbbar and Rastogi, 2001 (หรือใบหอมสดสับกับระยะ 10ซม(2002 ,.et al Mongpraneet) .

ตารางที่ 3.อิทธิพลของระยะห่างระหว่างผิวลำใยถึงผิวฮีเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำใย

ระยะห่าง)มม.(	เวลาอบแห้ง)นาที่(	พลังงานจำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี			a _w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
10	187	20.07	15.02	2.505	8.955	0.701	9.012
15	227	25.465	18.655	3.200	9.205	0.546	8.229
20	175	23.41	19.095	1.545	7.910	0.616	10.332
25	156	21.885	18.175	1.980	9.975	0.6655	7.0095
30	142	20.645	19.525	3.605	11.140	0.6855	7.655
35	133	21.33	16.995	1.355	7.310	0.6885	6.076

ผลการศึกษาความเร็วของอากาศในตำแหน่งกึ่งกลางตะแกรงรองรับลำใย

ตารางที่ 4 ชี้ว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากอุณหภูมิของผลผลิตลดลงเพราะความร้อนสูญเสียไปกับพัดลม อัตราการอบแห้งจึงลดลง แต่ความสิ้นเปลืองพลังงานต่อน้ำหนักน้ำที่ระเหยมีแนวโน้มต่ำสุดในระดับความเร็ว 0.7 ถึง 1.1 เมตรต่อวินาที แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทุกด้านสำหรับความเร็ว 1.1 เมตรต่อวินาทีที่ดีที่สุด ใกล้เคียงกับผลของ Achariyaviriy

และคณะ (2001) ณ ระดับ 0.7 เมตร/วินาที ผลการวิจัยของ Karathanos และ Belessiotis (1999) ซึ่งใช้การอบแห้งแบบลมร้อนอบผลไม้รสหวานหลายชนิดชี้ว่าความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตควรมีค่า 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ส่วนการอบก็วัดด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 1.25 เมตรต่อวินาที (Maskan, 2001)

ตารางที่ 4.อิทธิพลของความเร็วของอากาศเหนือพื้นผิวของเนื้อลำไยที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ความเร็ว อากาศ (s/m)	เวลาอบแห้ง (นาทีก)	พลังงาน จำเพาะ (g/kJ)	ค่าสี่			a_w	ความเหนียว (N-mm)
			L^*	a^*	b^*		
0.4	184.5	21.83	20.085	1.51	7.615	0.642	9.5845
0.7	153.5	20.77	19.635	1.82	8.625	0.6475	6.514
1.1	145.0	21.645	19.040	4.92	12.845	0.627	7.665
1.5	129.0	21.925	19.065	3.71	11.210	0.6605	5.979
1.8	122.0	23.125	23.335	3.405	12.180	0.664	10.601

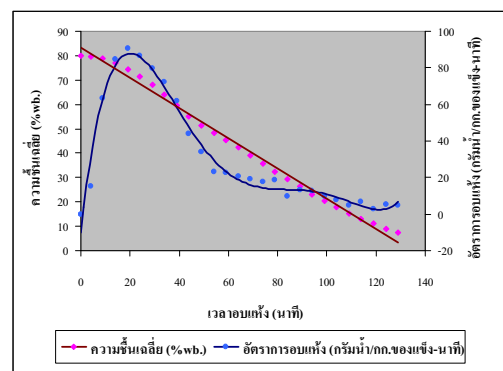
สภาวะการอบแห้งด้วยอินฟราเรด

- ฮีทเตอร์อินฟราเรดชนิดฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลืองจัตุรัส (120 มม.) พื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว
- อุณหภูมิอากาศร้อน 120 องศาเซลเซียสแล้วลดอุณหภูมิเหลือ 80 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเนื้อลำไยเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส
- ระยะห่างระหว่างผิวฮีทเตอร์ถึงผิวลำไยเท่ากับ 25 ซม.
- ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบเท่ากับ 1.1 เมตรต่อวินาที

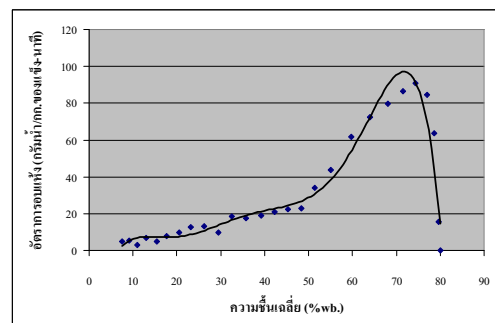
เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

การศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระทำในสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ผลโดยแสดงค่าในหน่วยกรัมของน้ำที่ระเหยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไยต่อหน่วยเวลาการอบแห้ง รูปที่ 1 และ 2 ซึ่งว่าอัตราการอบแห้งเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดภายในเวลา 20 นาที ณ 80 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาทีก ซึ่งแสดงถึงระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิต (Warming-up drying period) เนื้อเนื้อลำไยมีความชื้นสูงจึงดูดซับคลื่นอินฟราเรดได้เร็ว (ตามความเป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริก) ทำให้อุณหภูมิของเนื้อลำไยสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเข้าถึงช่วงอัตราการอบแห้งสูงสุดแล้วอัตราการอบแห้งก็ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period) เนื่องจากลำไยมีปริมาณน้ำลดลง จึงมีความสามารถในการรับคลื่นอินฟราเรดได้น้อย อัตราการเคลื่อนย้ายมวลจึงลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) ผลการศึกษานี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการอบแห้งอุ้งนด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Tulasidas *et al.*, 1993)

การประเมินค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเมื่ออบแห้งเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดในสภาวะที่เหมาะสม พบว่า มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 21.65 กิโลจูลต่อกรัม น้ำระเหย



รูปที่ 1. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของลำไยและอัตราการอบแห้งกับเวลา



รูปที่ 2. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นของลำไย

สรุปผลการศึกษา

1. การอบเนื้อลำไยด้วยคลื่นอินฟราเรดมีความเป็นไปได้ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเพียง 2 ชั่วโมง 25 นาที เมื่ออบในสภาวะที่เหมาะสม โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ดี
2. อิทธิพลของเครื่องอบลำไยแบบอินฟราเรดที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยได้แก่
 - 2.1 ชนิดของฮีทเตอร์อินฟราเรด ชนิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบเนื้อลำไยคือฮีทเตอร์เซรามิกสีเหลืองจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (17.49 วัตต์ต่อกรัมของแข็งของเนื้อลำไย)
 - 2.2 อุณหภูมิอากาศร้อนเหนือพื้นผิวตะแกรงรองรับลำไยในขณะอบ ซึ่งสามารถตั้งได้สูงสุดถึง 120 C°

แต่เมื่ออุณหภูมิภายในเนื้อลำไยที่กำลังอบแห้งเข้าสู่ อุณหภูมิวิกฤต (80 °C) จะต้องลดอุณหภูมิของ อากาศลงเหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต

- 2.3 ระยะห่างระหว่างพื้นผิวของฮีทเตอร์อินฟราเรดกับ พื้นผิวของเนื้อลำไย โดยควรมีระยะห่าง 25 เซนติเมตร เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และ เพื่อความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านการ ออกแบบเครื่องอบในทางปฏิบัติ
- 2.4 ความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตที่กำลังอบแห้ง ควรมีค่า 1.1 เมตรต่อวินาที เพื่อที่จะระบายอากาศ ขึ้นออกจาก ห้องอบแห้งได้เหมาะสมกับอัตราการ อบตลอดระยะเวลาการอบแห้งทั้งขบวนการ

- 3 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะการเพิ่ม อุณหภูมิของผลผลิตและระยะอัตราการอบแห้งลดลง โดยไม่มี การแสดงระยะอัตราการอบแห้งคงที่ โดยอัตราการอบแห้งจะ เริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดประมาณ 80 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ภายในเวลา 20 นาที
- 4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเมื่ออบที่สภาวะการอบแห้งที่ เหมาะสมมีค่า 21.65 กิโลจูลต่อกรัมน้ำที่ระเหย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการ วิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่าง สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับสกว.

เอกสารอ้างอิง

- [1]. กรมส่งเสริมการค้าส่งออก. 2546. ตลาดส่งออกลำไยแห้ง 10 ประเทศแรกของไทย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: http://www.dephtai.go.th/Interdata/service_product01/ลำไย1.doc
- [2]. Achariyaviriya, A., S. Sopronnarit and J. Tiansuwan. 2001. Study of Longan Flesh Drying. *Drying Tech.* 19: 2315-2329.
- [3]. Chuang, H. K., C. Chiu and R. Paniagua. 1997. Avery Adhesive Test yields more performance data than traditional probe. *ADHESIVES AGE*, September: 18-23.

- [4]. Dagerskog, M. 1979. Infra-red radiation for food processing: II. Calculation of heat penetration during infra-red frying of meat products. *Lebensmittels Wissenschaft und Technologie* 12: 252-257.
- [5]. Hall, C. W. 1962. Theory of infrared drying. *Trans. ASAE* 5: 14-16.
- [6]. Hebbar, H. U. and N. K. Rastogi. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47: 1-5.
- [7]. Jayaraman, K. S. and D. K. Das Gupta. 1995. Drying of fruits and vegetables. In *Handbook of industrial drying*, 2nd ed., ed. A. S. Mujumdar, ch. 21, 643-691. New York: Marcel Dekker, Inc.
- [8]. Karathanos, V. T. and V. G. Belessiotis. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J. agric, Engna Res.* 74: 355-361.
- [9]. Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits drying hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48: 177-182.
- [10]. Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Far infrared-vacuum and -convection drying of welsh onion. *Trans. ASAE* 45(5): 1529-1555.
- [11]. 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.
- [12]. Sakai, N. and T. Hanzawa. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. & Tech.* 5: 357-362.
- [13]. Tulasidas, T. N., G. S. Raghavan and E. R. Norris. 1993. Microwave and convective drying of grapes. *Tran. ASAE* 36(6): 1861-1865.
- [14]. Venkatachalapathy, K. and G. S. V. Raghavan. 2000. Microwave drying of whole, sliced and pureed strawberries. *Agric Eng J.* 9(1): 29-39.

สภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยที่เหมาะสมด้วยรังสีอินฟราเรด
Optimum Condition of Longan Flesh Drying Using Infrared Radiant

สุนทร โม่งปรานี¹ ทาเกมิ อาเบ และทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
S. Mongpraneet¹ T. Abe² and T. Kiatsirirot³

Abstract

The 500-gram longan flesh of Daw variety with moisture content approximately 80 % w.b. (wet basis) was used as the experimental material. This amount of longan was dried until the final moisture content of 26% w.b. was attained. The results indicated that a pair of the infrared ceramic heaters with a black square surface of 800 W each (0.64 W/cm^2) which had a distance between their surfaces and material surface of 25 cm could be used for longan flesh drying with the initial air temperature of 120°C followed by 80°C which was equivalent to the product temperature toward the end of drying. When the air velocity over sample surface kept constantly at 1.1 m/s, the drying characteristic had 2 periods, i.e., warming-up and falling rate drying periods, without having a constant one. The highest drying rate occurred after 20 minutes at 80 grams of evaporated water per a kilogram of longan flesh dry matter. The specific heat consumption was 21.65 kJ per a kilogram of water evaporated.

Keywords: Infrared drying, Longan, Drying rate, Drying characteristic

บทคัดย่อ

เนื้อลำไยสดพันธุ์ดอ จำนวน 500 กรัม ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 80 % w.b. (มาตรฐานเปียก) ถูกทำให้แห้งจนเหลือความชื้น 26 % w.b. เพื่อศึกษาสภาวะการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ผลการศึกษาชี้ว่า ฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (0.64 W/cm^2) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างผิวฮีทเตอร์กับผิวลำไย 25 ซม. สามารถอบแห้งเนื้อลำไยได้ด้วยอุณหภูมิอากาศร้อน 120°C ในตอนแรกแล้วลดเหลือ 80°C เท่ากับอุณหภูมิเนื้อลำไยจนกระทั่งสิ้นสุดการอบแห้ง เมื่อความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบคงที่ ณ 1.1 เมตรต่อวินาที คุณลักษณะการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะเวลาเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิตและระยะการอบแห้งลดลง โดยไม่แสดงระยะการอบแห้งคงที่ การอบแห้งสูงสุดเกิดในนาที่ที่ 20 ด้วยอัตรา 80 กรัม น้ำระเหยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่า 21.65 กิโลจูลต่อกรัม น้ำระเหย
คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ลำไย อัตราการอบแห้ง คุณลักษณะการอบแห้ง

บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้ส่งออกที่ทำรายได้สูงสุดของประเทศชนิดหนึ่ง การส่งออกอยู่ในรูปลำไยสด 58.73 % ลำไยแช่แข็ง 1.42 % และลำไยอบแห้ง 39.85 % (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2546) จากตัวเลขดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการแปรรูปลำไยเป็นผลิตภัณฑ์โดยวิธีอบแห้ง การอบแห้งผลลำไยสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การอบแห้งผลลำไยทั้งเปลือก และการอบแห้งเนื้อลำไย เนื้อลำไยอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีศักยภาพในการส่งออกไปยังประเทศที่มีรายได้สูงซึ่งต้องการบริโภคสินค้าที่มีคุณภาพสูง

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

¹ Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Nonghar, Sansai, Chiang Mai, 50290, Thailand

² วาดะ 908-32 เมือง ซากุริ จ.ฟูกูโอกะ 811-2414 ประเทศญี่ปุ่น

² Wada 908-32, Sasaguri city, Fukuoka prefecture, 811-2414, Japan

³ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ถ.พ่วงแก้ว อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Huaykaew Road, Muang, Chiang Mai, 50200, Thailand

เครื่องอบแห้งเนื้อลำไยที่เกษตรกรใช้ส่วนใหญ่เป็นเครื่องอบแห้งแบบให้ลมร้อนแบบถาด อุปกรณ์กำเนิดลมร้อนมีทั้งใช้ไฟฟ้า น้ำมันดีเซล และแก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง น้ำมันดีเซลมีปัญหาเรื่องการเผาไหม้ไม่หมด มีกลิ่นน้ำมันติดผลลำไย เครื่อง

อบแห้งแบบลมร้อนมีปัญหาเรื่องการกระจายลมร้อนไม่สม่ำเสมอ จึงต้องหมุนพลิกกลับเพื่อให้เนื้อลำไยมีความแห้งใกล้เคียงกัน การควบคุมอุณหภูมิลมร้อนให้คงที่ทำได้ยาก และระยะเวลาในการอบแห้งนานมากโดยเฉพาะในช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

การอบแห้งด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิทยาการแบบใหม่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือมนุษย์สร้างขึ้น ช่วงความถี่ที่นิยมนำมาใช้ในการอบแห้งคือ ช่วงรังสีอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ รังสีอินฟราเรดสามารถสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำ เป็นคลื่นสั้นความถี่สูงเหมาะกับการอบแห้งแบบชั้นบาง หลักการทำงานคือคลื่นจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนในตัววัสดุ (Hall, 1962; Sakai and Hanzawa, 1994) ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดและหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

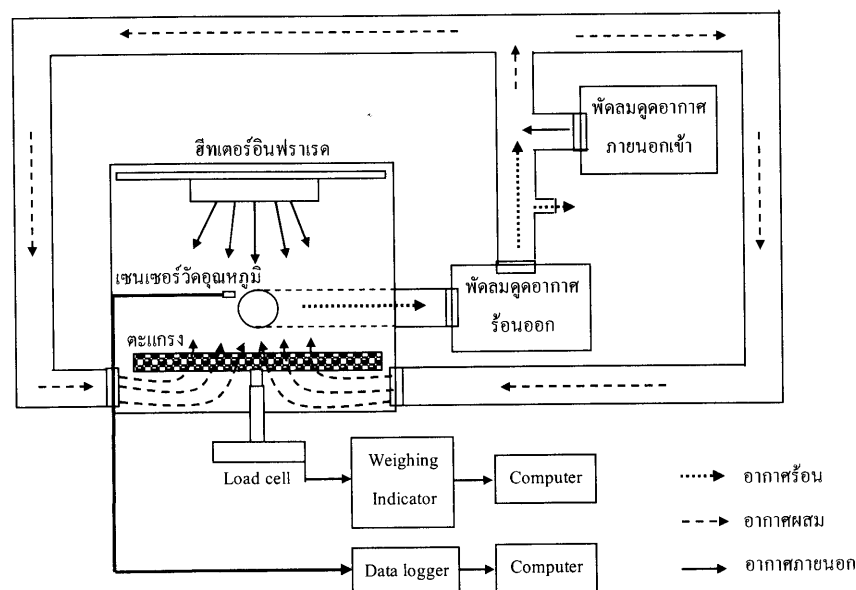
1. ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการที่ใช้ประกอบด้วย 3 ระบบ คือ ระบบให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ระบบระบายอากาศขึ้นและนำอากาศร้อนขึ้นบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ และอุปกรณ์อื่นๆ (รูปที่ 1)

1.1 ระบบการให้ความร้อน ประกอบด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดติดตั้งอยู่กึ่งกลางห้องอบแห้งซึ่งมีมิติภายใน 50 x 50 x 60 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง)

1.2 ระบบการระบายอากาศและนำอากาศร้อนกลับมาใช้ ประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศเพื่อดูดอากาศร้อนขึ้นภายในห้องอบแห้งออกสู่ภายนอกและนำอากาศผสมกลับมาใช้ใหม่

1.3 อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ ถาดรองรับผลผลิตที่กำลังอบ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม.) ขนาด 30 x 30 ซม. เพื่อรองรับเนื้อลำไยขณะอบ โหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์บันทึกและแสดงน้ำหนัก (Weighing indicator) เพื่อบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแบบต่อเนื่อง เครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิเพื่อควบคุมการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปในฮีตเตอร์ ชุดควบคุมการเปิด-ปิดการทำงานของเครื่อง และกิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ (Kilowatt-hour meter) เพื่อวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้โดยฮีตเตอร์และพัดลมดูดอากาศ



รูปที่ 1. กลไกการทำงานของชุดทดสอบการอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

2. ฮีตเตอร์อินฟราเรด

ฮีตเตอร์อินฟราเรดที่ใช้ทำจากเซรามิกชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อนดีเยี่ยม แข็งแกร่ง และกระแสไฟฟ้าไม่รั่ว มีความสามารถในการกระจายความร้อนสูงและเร็ว อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดีมาก ชนิดของฮีตเตอร์อินฟราเรดที่เลือกศึกษา ได้แก่

2.1 ฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ ซึ่งมีโพรงช่องว่างภายในเพื่อป้องกันมิให้ความร้อนแผ่กระจายออกไปด้านหลัง ดังนั้นพลังงานความร้อนทั้งหมดจะกระจายไปด้านเดียว ซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการความร้อนสูงและต้องกระจายความร้อนให้ทั่วถึงเท่า ๆ กันบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการอบ การที่พื้นผิวเป็นสีดำก็เพื่อต้องการให้ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) มีค่ามากที่สุด

2.2 ฮีทเตอร์เซรามิกแบบหลอดความยาวใช้งาน 30 ซม. ขนาด 40 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีแบบโคมเดี่ยว (1 หลอดต่อ 1 โคม) เพื่อช่วยสะท้อนรังสีอินฟราเรดให้พุ่งไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.3 ฮีทเตอร์แบบแผ่นเคลือบเซรามิกสีขาว ขนาด 2.4 กิโลวัตต์ การที่พื้นผิวเป็นสีขาวก็จะทำให้ค่าการแผ่รังสีมีค่าน้อยกว่าพื้นผิวสีดำ พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจึงต่ำกว่า

3. ลำโพงที่ใช้ในการทดสอบ

ลำโพงพันธุ์ดอเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ขนาดของผลแบ่งเป็น 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (20-25 มม.) กลาง (25.1-28.0 มม.) และใหญ่ (28.1-31.0 มม.) ความชื้นเนื้อลำโพงเริ่มต้น 80 % w.b (มาตรฐานเปียก) โดยผลลำโพงซึ่งถูกเอาเปลือกและเมล็ดออกแล้วจะถูกจัดเรียงบนตะแกรงแบบชั้นเดียว (Single layer) ด้วยการคว่ำผลลำโพงลง อบจนมีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 26 % w.b ซึ่งเป็นระดับความชื้นของผลไม้แห้งที่ผลิตเชิงพาณิชย์ (Venkatachalapathy and Raghavan, 2000) เก็บเนื้อลำโพงไว้ในถุงพลาสติกในที่ที่มีอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เพื่อรอการศึกษาคุณภาพต่อไป

4. การวิเคราะห์การอบแห้ง

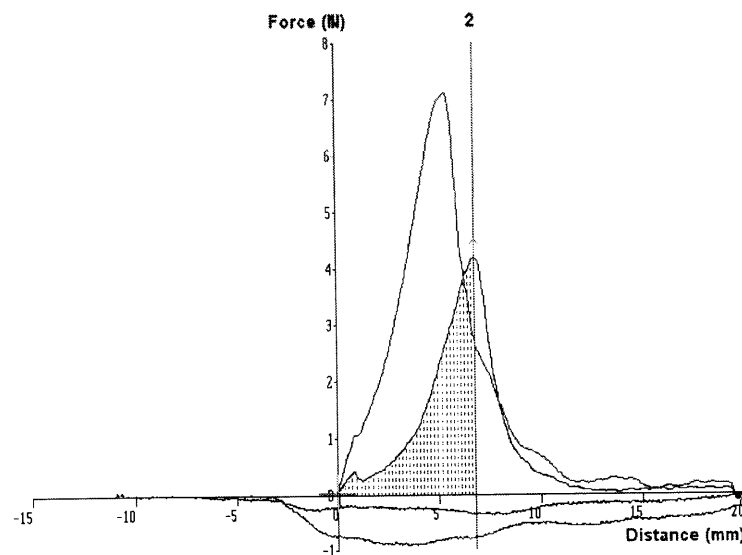
4.1 เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการจากผลผลิตสดเป็นผลิตภัณฑ์แห้งที่มีค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ย 26 % w.b.

4.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ได้แก่ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งทั้งกระบวนการต่อน้ำหนักของน้ำที่ระเหยไปได้ (Pakowski and Mujumdar, 1995)

5. การวิเคราะห์คุณภาพเนื้อลำโพงแห้ง

5.1 สีของเนื้อลำโพงแห้ง วัดโดยเครื่องมือวัดค่าสีและสเปกโตรมิเตอร์ (Spectrophotometer) ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE Plus โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเทียบเท่าแสงกลางวัน D65 มุมฐานการวัดของกล้อง 10 องศา ($10^\circ/D65$) และมุมการวางของแหล่งแสงกับตัวตรวจวัด 45 องศา ($45^\circ/0$) ทำการวัดไม่ต่ำกว่า 3 ซ้ำ ๆ ละไม่ต่ำกว่า 3 การอ่านค่า (Reading) แสดงค่าสี L^* , a^* และ b^* ตามระบบการวัดสีของ CIE (Commission International de l'Eclairage) โดยที่ค่า L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $L^* 100$ ซึ่งแสดงถึงสีขาว ไปจนถึง $L^* 0$ ซึ่งแสดงถึงสีดำ แกน $+a^*$ จะบรรยายถึงความเป็นสีแดงไปจนถึง $-a^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีเขียว ส่วนแกน $+b^*$ จะแสดงความเป็นสีเหลืองไปจนถึง $-b^*$ ซึ่งแสดงความเป็นสีน้ำเงิน

5.2 ปริมาณน้ำอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Water activity, a_w) วัดโดยใช้เครื่อง a_w Meter ซึ่งแสดงค่า a_w ออกมาเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วยโดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยค่า a_w ขั้นต่ำสุดสำหรับผลไม้แห้งควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.70 (Jayaraman and Das Gupta, 1995) ดังนั้นเนื้อลำโพงอบแห้งที่มีค่า a_w ต่ำกว่าค่า a_w ขั้นต่ำสุดจึงปลอดภัยต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ โดยตัวเลขยิ่งสูงผลิตภัณฑ์ยิ่งมีโอกาสมากต่อการเข้าทำลายของจุลินทรีย์



รูปที่ 1. ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูปกับค่าของแรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ

5.3 ความเหนียวของผลิตภัณฑ์ วัดโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer, รุ่น TA.XT plus, Stable micro systems Texture Technologies Inc., UK) ด้วยการทดสอบการถูกกระทำเชิงกลแบบอัด (Mechanical compression test) ความเร็วของหัวกด 30 มม.ต่อวินาทีและความเร็วถอยกลับ 20 มม.ต่อวินาที หัวกดเป็นเหล็กสแตนเลสทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดกลมเทียบเท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. บันทึกค่าแรงกดและการเปลี่ยนรูปด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Texture

exponent 32 ด้วยอัตราการบันทึก 400 จุดต่อวินาที ค่าความเหนียวแปรผลจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) กับค่าของแรงสูงสุด (Peak force) ที่กระทำต่อชิ้นทดสอบ ดังแสดงด้วยพื้นที่สีแดงในรูปที่ 1 ผลลัพธ์ก็ยังมีความเหนียวมากพลังงานยังมีความสูง (Chuang *et al.*, 1997)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. อิทธิพลของชนิดฮีตเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 1 ที่ว่าฮีตเตอร์อินฟราเรดชนิดแผ่นเซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัสพื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (ชนิด I-I) ให้ค่าสถิติที่สุดในขณะที่ค่า a_w อยู่ในช่วงปลอดภัย ส่วนค่าความเหนียวนั้นมีค่าอยู่ในช่วงกลางระหว่างฮีตเตอร์ชนิดต่าง ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบกัน ในขณะที่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูงกว่าฮีตเตอร์ชนิดเดียวกันซึ่งมีจำนวน 1 ตัว (ชนิด I) เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามฮีตเตอร์แบบหลอดพร้อมโคมสสะท้อนรังสี (ชนิด II) มีกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำเพียงหลอดละ 400 วัตต์ซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับขนาดของห้องอบที่ใช้ในการทดลอง ในขณะที่ฮีตเตอร์แบบแผ่นเคลือบเซรามิกสีขาว (ชนิด III) ก็มีการวัดที่สูงเกินไปจนทำให้ผลิตภัณฑ์ได้ใหม่ที่มีผิวด้านนอก ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มกำลังของฮีตเตอร์แบบหลอดให้สูงขึ้น แต่กำลังของฮีตเตอร์แบบหลอดก็แปรผันตรงกับความยาวของหลอดซึ่งถูกจำกัดด้วยมิติภายในของห้องอบ ดังนั้นจึงควรใช้หลอดคู่ต่อโคมสสะท้อนรังสี 1 ชุด

ตารางที่ 1. อิทธิพลของชนิดฮีตเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ฮีตเตอร์ ชนิด	W/cm^2	เวลาอบ (นาที)	พลังงาน จำเพาะ (kJ/g)	สี			a_w	ความเหนียว (N-mm)
				L*	a*	b*		
I*	0.32	162.0	21.26	14.08	5.29	14.46	0.643	7.070
I-I†	0.64	162.0	21.71	18.31	3.81	14.05	0.665	8.064
II‡	0.32	184.0	20.71	16.16	2.62	9.08	0.671	10.641
III**	0.96	145.0	20.80	17.83	1.49	7.65	0.624	8.741

* ฮีตเตอร์

* ฮีตเตอร์แบบหลอดตัวนำเคลือบเซรามิกสีดำ 1 ตัวขนาด 800 W

† ฮีตเตอร์แบบหลอดตัวนำเคลือบเซรามิกสีดำ 2 ตัวๆ ละ 800 W

‡ ฮีตเตอร์แบบหลอดพร้อมโคมสสะท้อนรังสีจำนวน 2 หลอดๆ ละ 400 W

** ฮีตเตอร์แบบแผ่นเคลือบเซรามิกสีขาวมิติ 20 x 23 เซนติเมตร (กว้าง X ยาว) ขนาด 2,400 W

2. อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

การแปรค่าอุณหภูมิอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งถูกกำหนดจากเซนเซอร์อุณหภูมิชนิด K ที่ติดตั้งอยู่ในห้องอบเหนือผิวของถาดรองรับเนื้อลำไย 75 มม. และห่างจากผนังห้องอบ 165 มม. ปลายอีกด้านหนึ่งของเซนเซอร์ต่อเข้ากับเครื่องวัด-ควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้อุณหภูมิของอากาศภายในห้องอบแห้งเปลี่ยนแปลงไป ผลการศึกษาเบื้องต้นชี้ว่าอุณหภูมิของเนื้อลำไย 80 °C เป็นอุณหภูมิวิกฤต ดังนั้นหากที่รีดเม้นท์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C อุณหภูมิของอากาศจะถูกลดลงให้เหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต

ผลการศึกษาชี้ว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิอากาศร้อนมากกว่า 80 °C สามารถทำได้หากมีการลดอุณหภูมิอากาศร้อนให้เหลือ 80 °C โดยอุณหภูมิอากาศสามารถเพิ่มได้ตั้งแต่มากกว่า 80 °C จนถึงมากที่สุดในระดับ 120 °C โดยในระดับนี้ระยะเวลาในการอบแห้งสามารถลดลงได้กว่าร้อยละ 33 เมื่อเทียบกับการอบด้วยอุณหภูมิวิกฤตตลอดเวลา อีกทั้งยังให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านสีที่ดีอีกด้วย (ตารางที่ 2) อย่างไรก็ตามการอบแห้งที่สามารถใช้อุณหภูมิของเนื้อลำไยเป็นแหล่งรับความร้อนแทนอากาศในห้องอบ สามารถลดระยะเวลาการอบแห้งได้กว่าร้อยละ 30 แต่การเลือกตำแหน่งของลำไยที่เป็นตัวแทนที่ดีของประชากรลำไยในห้องอบทำได้ยาก ดังนั้นหากมีการศึกษาเส้นชั้นความร้อนและความเร็วอากาศก็จะมีส่วนช่วยสนับสนุนให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงได้

ตารางที่ 2. อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

อุณหภูมิอากาศ (°C)	เวลาอบแห้ง (นาท)	พลังงานจำเพาะ (kJ/g)	ค่าสี			a_w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
60	268.0	24.170	18.520	1.28	9.480	0.6840	6.2635
80	182.5	22.485	15.315	1.82	9.015	0.6750	7.2625
100	163.0	23.355	19.845	2.94	12.815	0.6610	7.8335
120	131.0	19.655	20.905	4.84	12.755	0.6495	7.8530
140	152.0	22.005	19.695	3.83	12.055	0.6020	9.2035

3. ผลการศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวฮีทเตอร์อินฟราเรด

ตารางที่ 3 ซึ่งว่าการอบแห้งที่ระยะห่าง 15 เซนติเมตร ใช้พลังงานจำเพาะในการอบแห้งยาวนาน เนื่องจากปรากฏการณ์ผิวรอบนอกของวัสดุแข็งตัว (Case hardening) การอบแห้งที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร ใช้พลังงานในระดับปานกลาง ส่วนในระยะมากกว่าและเท่ากับ 25 เซนติเมตร ใช้พลังงานในการแห้งต่ำที่สุด แต่เมื่อคำนึงถึงคุณภาพโดยรวมของผลิตภัณฑ์จึงควรใช้ระยะห่าง 25 ซม. เนื่องจากลำไยเป็นผลไม้ที่มีน้ำตาลอยู่สูง การอบด้วยระยะใกล้เกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ใช่เอนไซม์ ส่วนการอบผลผลิตที่ไม่มีน้ำตาลหรือมีน้อยสามารถใช้ระยะห่างแคบ ๆ ได้ เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อกับระยะ 5-15 ซม. (Dagerskog, 1979) เมล็ดมะม่วงหิมพานต์กับระยะ 3.6 เซนติเมตร (Hebbbar and Rastogi, 2001) หรือใบหอมสดสับกับระยะ 10 ซม. (Mongpraneet *et al.*, 2002)

ตารางที่ 3. อิทธิพลของระยะห่างระหว่างผิวลำไยถึงผิวฮีทเตอร์อินฟราเรดที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ระยะห่าง (มม.)	เวลาอบแห้ง (นาท)	พลังงานจำเพาะ (kJ/g)	ค่าสี			a_w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
15	219	24.57	22.95	4.75	12.55	0.515	12.079
20	174	22.94	15.53	0.80	7.61	0.613	9.078
25	152	21.65	15.48	1.22	9.07	0.656	7.423
30	149	21.40	14.86	0.84	9.38	0.677	8.332
35	132	21.51	17.28	0.35	5.87	0.741	5.314

4. ผลการศึกษาความเร็วของอากาศในตำแหน่งกึ่งกลางตะแกรงรองรับลำไย

ตารางที่ 4 ซึ่งว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง เนื่องจากอุณหภูมิของผลผลิตลดลงเพราะความร้อนสูญเสียไปกับพัดลม ความเปลี่ยนแปลงพลังงานต่อน้ำหนักน้ำที่ระเหยมีแนวโน้มต่ำสุดในระดับความเร็ว 0.7 ถึง 1.1 เมตรต่อวินาที แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ในทุกด้านสำหรับความเร็ว 1.1 เมตรต่อวินาทีดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับผลของ Achariyaviriya และคณะ (2001) ณ ระดับ 0.7 เมตร/วินาที ผลการวิจัยของ Karathanos และ Belessiotis (1999) ซึ่งใช้การอบแห้งแบบลมร้อนอบผลไม้รสหวานหลายชนิดซึ่งว่าความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตควรมีค่า 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ส่วนการอบก็ด้วยไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน 1.25 เมตรต่อวินาที (Maskan, 2001) แต่อย่างไรก็ตามความเร็วของอากาศที่ศึกษาเป็นความเร็วในตำแหน่งกึ่งกลางห้องอบแห้งเท่านั้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเส้นชั้นความเร็วอากาศและรายงานเป็นความเร็วเฉลี่ยเหนือผิวของลำไยที่กำลังทดสอบ

ตารางที่ 4. อิทธิพลของความเร็วของอากาศเหนือพื้นผิวของเนื้อลำไยที่มีต่อการอบเนื้อลำไย

ความเร็วอากาศ (m/s)	เวลาอบแห้ง (นาท)	พลังงานจำเพาะ (kJ/g)	ค่าสี			a_w	ความเหนียว (N-mm)
			L*	a*	b*		
0.4	190	22.15	20.085	1.510	7.615	0.6420	9.585
0.7	155	21.23	19.635	1.820	8.625	0.6475	6.514
1.1	146	21.23	19.040	4.920	12.845	0.6270	7.665
1.5	126	21.60	19.065	3.710	11.210	0.6605	5.979
1.8	124	23.63	23.335	3.405	12.180	0.6640	10.601

5. สภาพการอบแห้งที่เหมาะสมด้วยรังสีอินฟราเรด

- ฮีทเตอร์อินฟราเรดชนิดฮีทเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัส (120 มม.) พื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว
- อุณหภูมิอากาศร้อน 120 องศาเซลเซียสแล้วลดอุณหภูมิเหลือ 80 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิของเนื้อลำไยเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

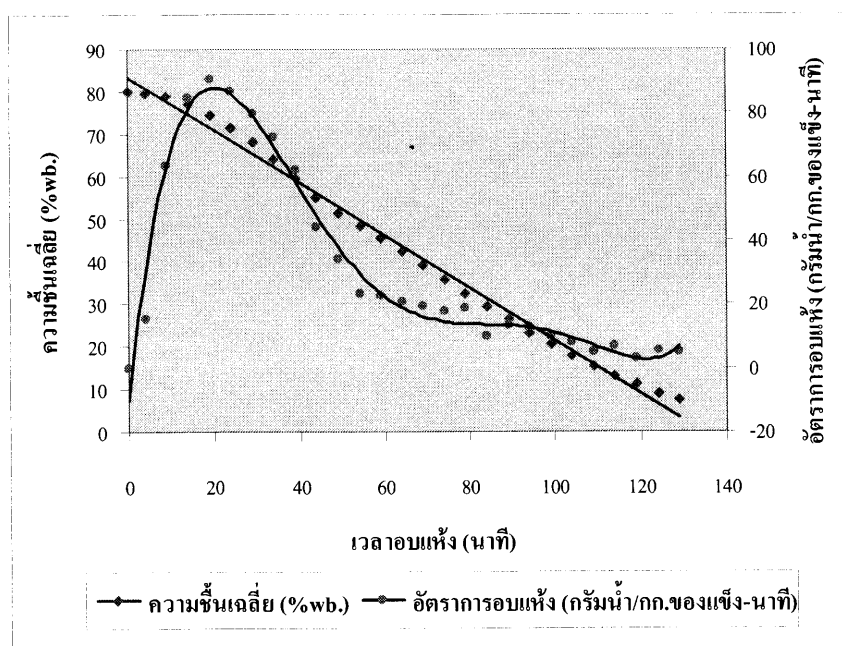
- ระยะห่างระหว่างผิวฮีทเตอร์ถึงผิวลำไยเท่ากับ 25 ซม.

- ความเร็วของอากาศเหนือวัสดุทดสอบเท่ากับ 1.1 เมตรต่อวินาที

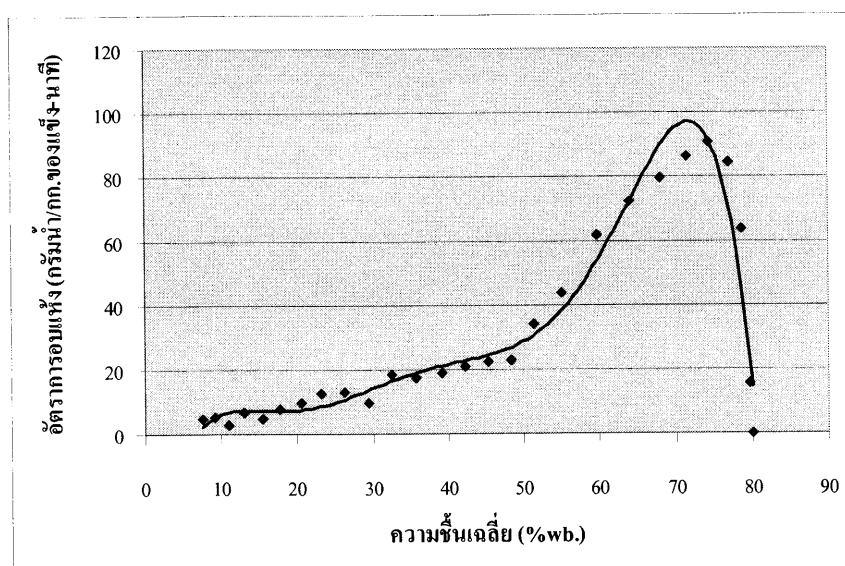
6. เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

การศึกษาเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งกระทำในสภาพการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด อัตราการอบแห้ง (Drying rate) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ผลโดยแสดงค่าในหน่วยกรัมของน้ำที่ระเหยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไยต่อหน่วยเวลาการอบแห้ง รูปที่ 2 และ 3 ซึ่งว่าอัตราการอบแห้งเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดภายในเวลา 20 นาที ณ 80 กรัม น้ำต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ซึ่งแสดงถึงระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิต (Warming-up drying period) เนื่องจากเนื้อลำไยมีความชื้นสูงจึงดูดซับรังสีอินฟราเรดได้เร็ว (ตามความเป็นคุณสมบัติไดอิเล็กตริก) ทำให้อุณหภูมิของเนื้อลำไยสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อไอน้ำระเหยออกมาภายนอก อากาศที่มีไอน้ำปะปนอยู่จะถูกทำให้ร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดจนกลายเป็นอากาศร้อนถ่ายเทให้กับเนื้อลำไย พลังห้องอบ และภาตรองรับ จึงทำให้อัตราการอบแห้งก็ลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งแสดงถึงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate drying period) เนื่องจากลำไยมีปริมาณน้ำลดลงจึงมีความสามารถในการรับรังสีอินฟราเรดได้น้อย อัตราการเคลื่อนย้ายมวลจึงลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) ผลการศึกษานี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการอบแห้งองุ่นด้วยคลื่นไมโครเวฟร่วมกับลมร้อน (Tulasidas *et al.*, 1993)

การประเมินค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเมื่ออบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดในสภาพที่เหมาะสม พบว่า มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 21.65 กิโลจูลต่อกรัมน้ำระเหย



รูปที่ 2. ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเฉลี่ยของลำไยและอัตราการอบแห้งกับเวลา



รูปที่ 3. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับความชื้นของลำไย

สรุปผลการศึกษา

- การอบเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดมีความเป็นไปได้ เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้นเพียง 2 ชั่วโมง 25 นาที ต่อ 500 กรัมเนื้อลำไยสด เมื่ออบในสภาวะที่เหมาะสม โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ดี
- อิทธิพลของเครื่องอบลำไยแบบอินฟราเรดที่มีผลต่อการอบแห้งเนื้อลำไยได้แก่
 - ชนิดของฮีตเตอร์อินฟราเรด ชนิดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบเนื้อลำไยคือฮีตเตอร์เซรามิกสี่เหลี่ยมจัตุรัส พื้นผิวสีดำ ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 2 ตัว (0.64 W/cm^2)
 - อุณหภูมิอากาศร้อนเหนือพื้นผิวตะแกรงรองรับลำไยในขณะอบ ซึ่งสามารถตั้งได้สูงสุดถึง 120°C แต่เมื่ออุณหภูมิภายในเนื้อลำไยที่กำลังอบแห้งเข้าสู่อุณหภูมิวิกฤต (80°C) จะต้องลดอุณหภูมิของอากาศลงเหลือเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต
 - ระยะห่างระหว่างพื้นผิวของฮีตเตอร์อินฟราเรดกับพื้นผิวของเนื้อลำไย โดยควรมีระยะห่าง 25 เซนติเมตร เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพื่อควบคุมค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านการออกแบบเครื่องอบในทางปฏิบัติ
 - ความเร็วของอากาศเหนือผลผลิตที่กำลังอบแห้ง ควรมีค่า 1.1 เมตรต่อวินาที เพื่อที่จะระบายอากาศขึ้นออกจากห้องอบแห้งได้เหมาะสมกับอัตราการอบตลอดระยะเวลาการอบแห้งทั้งกระบวนการ
- เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมี 2 ช่วง คือ ระยะการเพิ่มอุณหภูมิของผลผลิตและระยะอัตราการอบแห้งลดลง โดยไม่มีการแสดงระยะอัตราการอบแห้งคงที่ โดยอัตราการอบแห้งจะเริ่มจากศูนย์แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสูงสุดประมาณ 80 กรัมเนื้อลำไยต่อกิโลกรัมของแข็งของเนื้อลำไย-นาที่ ภายในเวลา 20 นาที
- ความสัมพันธ์พลังงานจำเพาะเมื่ออบที่สภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมมีค่า 21.65 กิโลจูลต่อกรัมเนื้อน้ำที่ระเหย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษากับสกว. และขอขอบคุณ Mr. Jordan Aluloski นักศึกษาจากประเทศมาซิโดเนียภายใต้โครงการแลกเปลี่ยนนักศึกษาเพื่อการฝึกงานด้านเทคนิค (IAESTE) ที่กรุณาช่วยเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. 2546. ตลาดส่งออกลำไยแห้ง 10 ประเทศแรกของไทย. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก: http://www.depthai.go.th/Interdata/service_product01/ลำไย1.doc
- Achariyaviriya, A., S. Sopnronnarit and J. Tiansuwan. 2001. Study of Longan Flesh Drying. *Drying Tech.* 19: 2315-2329.
- Chuang, H. K., C. Chiu and R. Paniagua. 1997. Avery Adhesive Test yields more performance data than traditional probe. *Adhesives Age*, September: 18-23.
- Dagerskog, M. 1979. Infra-red radiation for food processing: II. Calculation of heat penetration during infra-red

- frying of meat products. *Lebensmittell Wissenschaft und Technologie* 12: 252-257.
- Hall, C. W. 1962. Theory of infrared drying. *Trans. ASAE* 5: 14-16.
- Hebbbar, H. U. and N. K. Rastogi. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47: 1-5.
- Jayaraman, K. S. and D. K. Das Gupta. 1995. Drying of fruits and vegetables. In *Handbook of industrial drying*, 2nd ed., ed. A. S. Mujumdar, ch. 21, 643-691. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Karathanos, V. T. and V. G. Belessiotis. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J. agric, Engna Res.* 74: 355-361.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits drying hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48: 177-182.
- Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Far infrared-vacuum and -convection drying of welsh onion. *Trans. ASAE* 45(5): 1529-1555.
- 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.
- Sakai, N. and T. Hanzawa. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. & Tech.* 5: 357-362.
- Tulasidas, T. N., G. S. Raghavan and E. R. Norris. 1993. Microwave and convective drying of grapes. *Trans. ASAE* 36(6): 1861-1865.
- Venkatachalapathy, K. and G. S. V. Raghavan. 2000. Microwave drying of whole, sliced and pureed strawberries. *Agric Eng J.* 9(1): 29-39.

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิจากหลอดอินฟราเรดพร้อมโคมสะท้อนรังสี
(Parameters Affecting the Temperature Distribution from Metal Sheath Radiant Rod
with Parabolic Reflector)

สุนทร โม่งปรางค์* อรทัย ชัยศิลป์ และ กิ่งแก้ว อยู่มาก

ผู้รับผิดชอบบทความ* ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

โทรศัพท์: 0-5387-5570 โทรสาร: 0-5349-8902 มือถือ: 0 6922 6391 E-mail: sunate@mju.ac.th

บทคัดย่อ

ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิเป็นหนึ่งในตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาขยายขนาดตู้อบ น้ำถูกใช้เป็นโหลดในการทดสอบการกระจายอุณหภูมิในชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด แหล่งกำเนิดพลังงานรังสีอินฟราเรดได้แก่ ฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบไฟฟ้า 2 หลอดทำด้วยเซรามิกพร้อมโคมสะท้อนรังสี ความลึกการทะลุทลวงของรังสีอินฟราเรดที่เหมาะสมในระดับ 5 มิลลิเมตรได้ผิวน้ำ ถูกเลือกเพื่อบันทึกโปรไฟล์อุณหภูมิกับเวลาตลอดช่วง 60 นาที ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำตามลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ กำลังไฟฟ้า เวลา ความสูง ความเร็วอากาศ และระยะห่าง โดยระยะห่างกับความเร็วมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ส่วนตัวแปรที่เหลือมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน แต่ความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่เป็นเชิงเส้นจึงเปลี่ยนรูปของตัวแปรอิสระบางตัวแปร เพื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น ผลการวิเคราะห์ชี้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระตั้งแต่สามตัวขึ้นไปสามารถทำนายอุณหภูมิแตกต่างได้ดีซึ่งชี้บอด้วยค่า R^2 ที่ปรับแก้

คำสำคัญ: การอบแห้ง รังสีอินฟราเรด การกระจายอุณหภูมิ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

Temperature uniformity is one of the most important considerations for scaling up of a drying unit. Water load was used to determine the temperature distribution in an infrared radiation drying setup. The infrared energy generator was a double of electric infrared heaters made from quartz tube elements covered by a metal sheath infrared radiation element. Five mm depth under the water surface of infrared penetration was selected to monitor temperature-time history over 60 min. The changes of water temperature at any position in the drying chamber were determined. Variables affecting the water temperature were power level, time, distance, air velocity and clearance, respectively. The clearance and air velocity were inversely proportional to the water temperature; whereas, the other variables were directly proportional. However, these two relationships were not linear. Therefore, some dependent variables were transformed in order to conduct a linear regression analysis. Results showed that mathematical models which were a function of the abovementioned three or more dependent variables were most suitable for characterizing different temperatures of water indicated by the adjusted R^2 .

Keywords: Drying, Infrared Radiation, Temperature distribution, Mathematical Model

บทนำ

การลดความชื้นด้วยรังสีอินฟราเรดได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีสามารถแผ่ได้รวดเร็ว ง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์และบำรุงรักษา และเลือกใช้ได้ตามความยาวคลื่นที่ต้องการ อีกทั้งไม่ทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณรอบๆ รังสีที่มีการแผ่รังสีความร้อนกระจายไปถึงสูงขึ้น แต่อุณหภูมิจะเพิ่มได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอตลอดบริเวณผิวและเนื้อชิ้นในของวัตถุ วัตถุจะไม่ถูกทำลายหากวางในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยมีหลักการทำงานคือการส่งผ่านพลังงานความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ด้วยตัววัตถุเองโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางหรือตัวนำในการส่งผ่านความร้อนไปยังวัตถุที่มีโมเลกุลน้ำเป็นองค์ประกอบ รังสีในช่วงความถี่ 10^{11} - 10^{14} เฮิร์ตซ์ หรือความยาวคลื่นระหว่าง 0.75-1000 μm ซึ่งยาวกว่าแสงที่ตาคนสามารถมองเห็นได้ (Invisible lights) แต่สั้นกว่าคลื่นไมโครเวฟ รังสีอินฟราเรดยังมีการแบ่งตามความยาวคลื่นออกได้อีก 3 ระดับได้แก่ อินฟราเรดช่วงใกล้ (Near infrared) อินฟราเรดช่วงกลาง (Medium infrared) และอินฟราเรดช่วงไกล (Far infrared) ซึ่งมีความยาวคลื่น 0.75-1.5 μm , 1.5-5.6 μm และ 5.6-1,000 μm ตามลำดับ ความยาวคลื่นนี้จะมีผลต่ออุณหภูมิของเครื่องให้ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง

เครื่องให้ความร้อนโดยใช้รังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดแบบดวงไฟร้อนหรือแบบหลอดนั้นสามารถแผ่รังสีความร้อนได้ 360 องศาจึงมีพื้นผิวในการกระจายความร้อนมาก การติดตั้งโคมสะท้อนรังสีทำให้รังสีตกลงบนวัตถุที่ต้องการได้ดีขึ้น หลอดอินฟราเรดพร้อมโคมสะท้อนรังสีขนาดใดๆ จะมีอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความร้อนซึ่งเป็นสัดส่วนกับระยะทางการแผ่รังสี หลอดอินฟราเรดยิ่งอยู่ใกล้วัตถุประสิทธิภาพการในการให้ความร้อนยิ่งมากขึ้นเท่านั้น แต่หากหลอดอินฟราเรดอยู่ใกล้กันมากเกินไปอาจทำให้เกิดการซ้อนทับของรังสีที่แผ่ออกมามีผลทำให้การกระจายพลังงานไม่สม่ำเสมอในระนาบเดียวกัน การแผ่กระจายรังสีของหลอดอินฟราเรดเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาการกระจายพลังงานความร้อนที่ไม่สมดุล จึงควรมีการศึกษาการแผ่กระจายรังสีอินฟราเรดในระนาบต่างๆ ตามระยะห่างจากวัตถุกับโคมสะท้อนรังสีที่ใช้ และระยะห่างระหว่างหลอดอินฟราเรด เพื่อใช้เป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวและการออกแบบระบบอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ของหลอดอินฟราเรดพร้อมโคมสะท้อนรังสีที่มีผลต่อการแผ่กระจายของอุณหภูมิ พร้อมทั้งแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบคณิตศาสตร์

วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุทดสอบ

ในการทดลองใช้น้ำเป็นวัสดุรับความร้อนคล้ายกับการศึกษาของ Wang และ Tang (2003) เนื่องจากน้ำเป็นสารที่มีสารเจือปนน้อยมาก และน้ำยังประพุดิตนเป็นของไหลจึงทำให้วัสดุทดลองมีความสม่ำเสมอทั่วกัน โดยบรรจุน้ำในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร ซึ่งมีมิติภายใน 500×570 มิลลิเมตร (เส้นผ่านศูนย์กลาง $\times$ สูง) จำนวน 30 ใบ ครอบคลุมมิติภายในตู้อบแห้งขนาด $475 \times 500 \times 570$ มิลลิเมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) ได้เกือบทั้งหมด ตำแหน่งการวางบีกเกอร์น้ำภายในตู้อบแห้งแสดงในรูปที่ 1 พร้อมทิศทางลมที่พัดผ่านพื้นผิวของบีกเกอร์

ทิศทางลม

➔

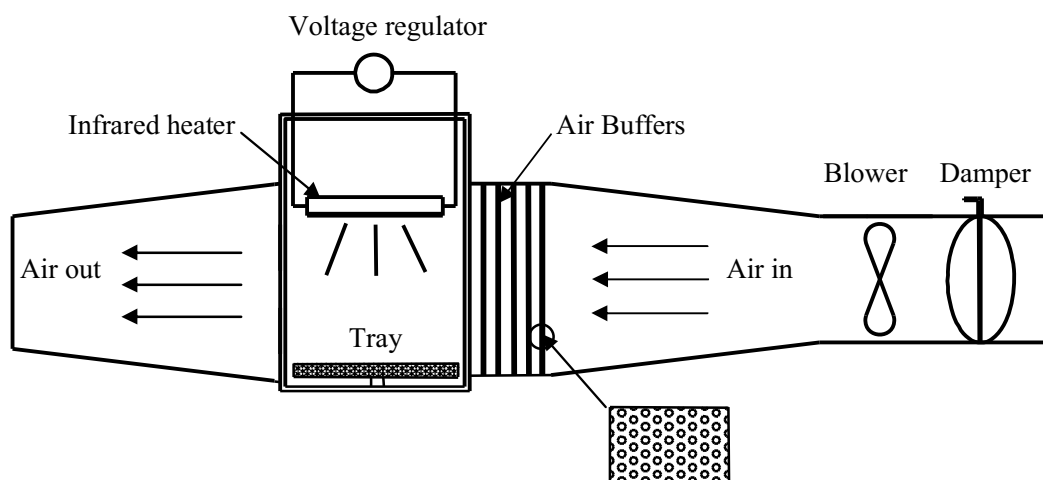
A1	B1	C1	D1	E1
A2	B2	C2	D2	E2
A3	B3	C3	D3	E3
A4	B4	C4	D4	E4
A5	B5	C5	D5	E5
A6	B6	C6	D6	E6

รูปที่ 1. ภาพตำแหน่งการวัดการกระจายอุณหภูมิภายในชุดทดสอบการอบด้วยรังสีอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (รูปที่ 2) มี 3 ระบบได้แก่ ระบบกำเนิดความร้อน ระบบพาไอน้ำออกจากห้องอบแห้ง และระบบควบคุม แหล่งกำเนิดความร้อนได้แก่ ฮีทเตอร์อินฟราเรดแบบหลอดคู่ชนิดวางในแนวนอนพร้อมโคมสะท้อนรังสี ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิจากหลอดอินฟราเรดพร้อมโคมสะท้อนรังสีที่ศึกษามีดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับหลอดอินฟราเรด 3 ระดับได้แก่ คือ 1000, 1500 และ 2000 วัตต์
2. ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางโคมสะท้อนรังสี 5 ระดับ ได้แก่ 0, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิเมตร โดยที่ระยะ 0 มิลลิเมตรหมายถึงมีชุดหลอดอินฟราเรดพร้อมโคม 1 ชุด
3. ความสูงของหลอดอินฟราเรดจากผิวหน้าวัสดุ 4 ระดับ ได้แก่ 150, 200, 250 และ 300 มิลลิเมตร โดยวัดจากขอบโคมสะท้อนรังสี
4. ความเร็วอากาศเหนือผิวน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 0.8 – 1.3 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 2. ส่วนประกอบในชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการศึกษาเส้นชั้นอุณหภูมิในแนวดิ่งชี้ว่า ระดับ 5 มิลลิเมตรจากผิวน้ำแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดชัดเจนที่สุด ในการทดสอบการกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบจึงเลือกจุดวัดอุณหภูมิที่ระดับ 5 มิลลิเมตรจากผิวน้ำ โดยบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงนาฬิกาที่ 60 และแสดงค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ กับอุณหภูมิที่เฉลี่ยเริ่มต้น (ประมาณ 25 องศาเซลเซียส)

อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินฟราเรดฮีตเตอร์

ผลของกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ฮีตเตอร์อินฟราเรดชี้ว่าอุณหภูมิแตกต่างของน้ำเทียบกับเวลาแปรผันตามกำลังไฟฟ้า เส้นกราฟแบ่งได้เป็น 3 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นซึ่งยังไม่มีรังสีความร้อนแผ่ออกมาจากฮีตเตอร์ หลังจากนั้นประมาณ 2 นาทีอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากน้ำได้รับรังสีอินฟราเรด ช่วงที่สามน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งอุณหภูมิมีค่าคงที่ เนื่องจากน้ำในบีกเกอร์มีการสูญเสียความร้อนแบบการนำให้แก่บีกเกอร์และภาชนะรองรับตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียความร้อนแบบการพาเนื่องจากอากาศในตู้อบมีการเคลื่อนไหวด้วยอัตราเร็วเฉลี่ย 1.1 เมตรต่อวินาที

อิทธิพลของความสูงกับระยะห่าง

ผลการศึกษาชี้ว่าอุณหภูมิ ณ เวลาเดียวกันในแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน โดยน้ำในแถวที่ 1 และ 6 ซึ่งอยู่ติดกับด้านข้างผนังตู้อบมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการซ้อนทับของรังสีอินฟราเรดมากที่สุด น้ำบริเวณคอลัมน์ A มีอุณหภูมิต่ำที่สุดเพราะเป็นทางเข้าของอากาศที่พัดผ่าน ในขณะที่อากาศที่พัดผ่านคอลัมน์ E บริเวณทางออกเป็นอากาศร้อนเช่นเดียวกับคอลัมน์ B, C และ D ซึ่งมีค่าอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ โดยน้ำในตำแหน่ง C6, D6 และ E6 มีอุณหภูมิสูงกว่าตำแหน่งอื่นเพราะมีค่าความเร็วอากาศต่ำทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผิวน้ำต่ำกว่าตำแหน่งอื่น ๆ (Nowak and Piotr, 2004) ซึ่งสอดคล้องกับโปรไฟล์ความเร็วอากาศเหนือผิวน้ำในตู้อบ

อิทธิพลของระดับความสูงของโคมสะท้อนรังสี

ผลการศึกษาชี้ว่าระดับความสูงแปรผกผันกับผลต่างอุณหภูมิของน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Nowak และคณะ (2004) จึงกล่าวได้ว่าลักษณะการซ้อนทับของรังสีที่ระดับความสูง 150 มิลลิเมตร มีผลต่างอุณหภูมิสูงสุด แต่ที่ระดับความสูง 200, 250 และ 300 มิลลิเมตร เมื่อระยะห่างของโคมสะท้อนรังสีมีค่ามาก (300 มิลลิเมตร) ปริมาณของรังสีตกกระทบผิวน้ำมีค่าไม่สม่ำเสมอ

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างโคมสะท้อนรังสี

ตำแหน่ง C3 และ C4 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางตู้ทั้งด้านยาวและด้านกว้างเป็นตำแหน่งที่ได้รับรังสีสูงสุด ดังนั้นในการวิเคราะห์อิทธิพลของระยะห่างระหว่างโคมสะท้อนรังสี จึงเลือกพิจารณาที่ตำแหน่ง C4 ที่กำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์ ผลการศึกษาชี้ว่า ระยะห่างของโคมสะท้อนรังสีมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิแตกต่างของน้ำน้อยมากโดยเฉพาะที่ระดับความสูง 300 มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

1. การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงส่วนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชี้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดความร้อน (Power) เวลาที่ได้รับรังสี (Time) ความสูงระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อน (Distance) ความเร็วอากาศ (Velocity) และระยะห่าง (Clearance) ระหว่างโคมสะท้อนรังสี โดยระยะห่างกับความเร็วมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ส่วนตัวแปรที่เหลือมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน

2. การวิเคราะห์ความถดถอย การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์ผลต่างอุณหภูมิของน้ำในตู้อบอินฟราเรดตำแหน่งต่าง ๆ นั้น ตัวแปรตามได้แก่ ผลต่างอุณหภูมิ (dT) ส่วนตัวแปรอิสระได้แก่ กำลังไฟ (E) เวลา (t) ระยะห่าง (c) ความสูง (d) และความเร็วอากาศ (v) ผลการวิเคราะห์ (ตารางที่ 1) ซึ่งว่าแบบจำลองหมายเลข 1 สามารถทำนายผลต่างอุณหภูมิได้ดีที่สุด ($R^2=0.891$) แต่สมการอื่น ๆ ที่มีค่า R^2 ค่อนข้างสูงใกล้เคียงกันนี้ก็สามารถใช้ได้ จึงกล่าวได้ว่าการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งานสิ่งแรกที่ต้องทำคือ การกำหนดตัวแปรที่สนใจจะศึกษา แล้วจึงเลือกสมการโดยพิจารณาจากค่า R^2 ที่ปรับแก้โดยอาจมีการความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเทียบกับค่าที่วัดได้จริง (Toğrul, 2005)

ตารางที่ 1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เพื่อใช้ทำนายผลต่างอุณหภูมิของน้ำในตู้อบอินฟราเรด

Model no.	Model equation	Adjusted R^2
1.	$\ln(dT) = 2.628 \ln(E) + 1.432 \ln(t) - 3.872E - 0.604 \ln(d) - 0.919 \ln(v) + 0.321 \ln(c/d) - 17.280$	0.891
2.	$\ln(dT) = 2.625 \ln(E) + 1.435 \ln(t) - 3.889E - 0.623 \ln(c/d) - 0.917 \ln(v) - 20.511$	0.881
3	$\ln(dT) = 2.613 \ln(E) + 1.431 \ln(t) - 3.874E - 0.612 \ln(c/d) - 20.434$	0.861
4	$\ln(dT) = 2.612 \ln(E) + 1.430 \ln(t) - 3.867E - 0.591 \ln(d) + 0.316 \ln(c/d) - 17.269$	0.871
5	$\ln(dT) = 2.625 \ln(E) + 1.430 \ln(t) - 3.861E - 0.622 \ln(c/d) - 20.547$	0.863
6	$\ln(dT) = 2.612 \ln(E) + 1.430 \ln(t) - 3.868E - 0.605 \ln(d) + 0.543 \ln(c/d) - 0.222(c/d) - 16.956$	0.871
7	$\ln(dT) = 2.716 \ln(E) + 0.726 \ln(t) + 0.725(c/d) - 20.967$	0.805
8	$\ln(dT) = 2.729 \ln(E) + 1.407 \ln(t) + 0.731(c/d) - 3.755E - 0.2(t) - 22.096$	0.853
9	$\ln(dT) = 2.757 \ln(E) + 1.406 \ln(t) + 0.646(c/d) - 3.752E - 0.2(t) - 0.269 \ln(d) - 20.740$	0.855
10	$\ln(dT) = 2.626 \ln(E) + 1.430 \ln(t) - 3.868E - 0.923 \ln(d) - 0.919 \ln(v) - 15.545$	0.886
11	$\ln(dT) = 2.611 \ln(E) + 1.427 \ln(t) - 3.857E - 0.906 \ln(d) - 15.556$	0.865
12	$\ln(dT) = 2.596 \ln(E) + 0.731 \ln(t) + 0.304 \ln(c) - 20.943$	0.763
13	$\ln(dT) = 2.611 \ln(E) + 1.427 \ln(t) - 3.876E - 0.2(t) - 20.547$	0.821
14	$\ln(dT) = 2.595 \ln(E) + 0.729 \ln(t) - 19.294$	0.758
15	$\ln(dT) = 2.608 \ln(E) + 1.424 \ln(t) - 3.849E - 0.2(t) - 20.404$	0.820
16	$\ln(dT) = 2.900 \ln(E) - 19.283$	0.687

3. การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งาน แบบจำลองที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบขนาดห้องอบแห้ง โดยการแทนค่าตัวแปรที่กำหนดในการออกแบบ เช่น ผลต่างอุณหภูมิเมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้า ความเร็วอากาศ และเวลาในการอบแห้ง จากการแทนค่าลงในสมการแนวโน้มกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 5 ตัว ซึ่งจะได้ค่าอัตราส่วนระหว่างระยะห่างต่อความสูงที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบขนาดห้องอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการสร้างห้องอบแห้งที่เหมาะสม ไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นหรือมีขนาดเล็กเกินไปจนทำให้พื้นที่รับรังสีน้อยกว่าความสามารถในการแผ่รังสีของฮีเตอร์

สรุปผลการทดลอง

1. กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ฮีเตอร์แปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ได้จากการแผ่รังสีความร้อนของฮีเตอร์ และกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างกันมีผลต่ออุณหภูมิของรังสีด้วย
2. ความสูงระหว่างฮีเตอร์และผิวหน้าวัสดุทดสอบ มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิโดยตรงที่ระดับความสูง 150 มิลลิเมตร โดยผลต่างของอุณหภูมิของน้ำลดลงตามลำดับที่ความสูง 200, 250 และ 300 มิลลิเมตร
3. ระยะห่างระหว่างฮีเตอร์ มีผลต่ออุณหภูมิของรังสีในทิศทางที่แตกต่างกัน โดยระยะห่าง 150, 200 และ 250 มิลลิเมตร การซ้อนทับของรังสีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ที่ระยะห่าง 300 มิลลิเมตร การซ้อนทับของรังสีมีความแตกต่างจากระยะห่างอื่นๆ
4. ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำตามลำดับจากมากไปหาน้อยได้แก่ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แหล่งกำเนิดความร้อน เวลาที่ได้รับรังสี ความสูงระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อน ความเร็วอากาศ และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนกับผิวหน้าวัสดุทดสอบ
5. แบบจำลองที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระตั้งแต่สามตัวขึ้นไปสามารถทำนายอุณหภูมิแตกต่างของน้ำได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- Nowak, D. and P. P. Lewicki. (2004). Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Science and Emerging Technol.* 5: 353-360.
- Toğrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *J. of Food Eng.* 71: 311-323.
- Wang, S. and J. Tang. (2003). An experimental method for evaluating heating uniformity in RF systems. ASAE Paper No. 036202. St. Joseph, Mich.: ASAE.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนสนับสนุนงานวิชาการ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) กับ สกว. ที่สนับสนุนทุนวิจัย

จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าสี เนื้อสัมผัส และการหดตัวเชิงปริมาตรของเนื้อลำไย ในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

KINETICS OF COLOR CHANGES, TEXTURE AND VOLUME SHRINKAGE IN LONGAN FLESH DURING INFRARED DRYING

สุนทร สิบคำ

ทาเกมิ อาเบ่

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร

อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

โทร. 0 5387 8123 โทรสาร 0 5349 8902

E-mail: sunate@mju.ac.th

ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ภาควิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

จ.เชียงใหม่ 50200

โทร. 053-944144 ต่อ 431

โทรสาร 053-944145

E-mail: tanong@dome.eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าสี เนื้อสัมผัส และการหดตัวเชิงปริมาตรในระหว่าง
ขบวนการเชิงความร้อนเป็นประโยชน์มากสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์แบบ
ออนไลน์ ลำไยพันธุ์อู๊ดอ เกต A (เส้นผ่านศูนย์กลาง 27-28 มิลลิเมตร) ถูกเตรียมโดยการ
แกะเปลือกและควั่นเมล็ดออกครึ่งละ 500 กรัม ความเข้มข้นรังสีอินฟราเรดและความเร็วลมใน
ห้องอบแห้งอย่างละ 3 ระดับถูกทดสอบนาน 200 นาที โดยทุก ๆ 20 นาทีจะมีการวัด
คุณภาพเนื้อลำไยเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสม จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าความ
แตกต่างของค่าสีรวมเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับมีค่า
เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วอากาศ จลนศาสตร์การ
เปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวเกาะติดของเนื้อลำไยเป็นไปตามสมการโพลิโนเมียลอันดับสาม
โดยค่าคงที่สองค่าแรกในสมการถดถอยเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดและ
ความเร็วอากาศ และจลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวเชิงปริมาตรซึ่งขึ้นอยู่กับ
ความชื้นเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับเป็นฟังก์ชันของ
ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วลม การทดสอบแบบจำลองจลนศาสตร์ทั้งสาม
แบบชี้ว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงโดยมีค่ารากที่สองของ
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองอยู่ในช่วง 0.64 – 7.34 % และไคส์แควร์อยู่ในช่วง
0.00071 – 0.09325 แบบจำลองการหดตัวเชิงปริมาตรที่ขึ้นอยู่กับความชื้นทำนายได้ถูกต้อง
ที่สุดเพราะเป็นการวัดค่าตลอดทั้งผล ไม่ใช่เฉพาะจุดเหมือนกับการวัดค่าสีหรือความเหนียว
เกาะติด ดังนั้นหากต้องการแบบจำลองที่มีความแม่นยำจึงควรวัดค่าตลอดทั้งผล

Abstract Modeling the color changes, texture development and volume shrinkage during thermal processing may be useful in monitoring the equality of the final product. Experimental data on the changes of color, texture, and volume shrinkage for longan flesh in infrared drying were studied at infrared (IR) intensities at 0.521, 0.625 and 0.729 W/cm² and air velocities at 0.4, 0.7 and 1.0 m/s for 0 – 200 min with 20-min intervals. Total colour differences (TOC) of longan flesh followed the reaction kinetic model having a first order. The reaction rate constant during infrared drying were found to increase as infrared intensity and air velocity increased. Volume shrinkage of longan flesh followed a third-degree polynomial equation. The first two constants were found to increase as infrared intensity increased. Specific volume of longan flesh as moisture dependency followed the reaction kinetic model having a first order. The reaction rate constant during infrared drying were found to increase as infrared intensity increased. A good agreement between observed and predicted values of TOC, cohesiveness, and shrinkage as moisture content dependency for longan flesh were obtained, with root mean square values

ranging from 0.64 – 7.34 % and Chi-Square from 0.00071 – 0.09325. A model of shrinkage as moisture content dependency was the best, resulted from the data measurement done by the whole fruits, partly taken data measurements for the TOC and cohesiveness. Therefore, for a better model the data measurement should be done by in whole sample, rather than in part

1. บทนำ

ลำไยเป็นผลไม้ที่มีรสชาติหอมหวาน เป็นที่นิยมของชาวไทยและชาวต่างชาติ สามารถบริโภคได้ทั้งในรูปผลสด และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้หลายชนิด ผลผลิตลำไยนอกจากมีการจำหน่ายในประเทศแล้วยังมีการส่งออกจำหน่ายต่างประเทศอีกด้วย ในปัจจุบันได้มีการส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศประมาณ 5- 6 หมื่นตันต่อปี มูลค่าการส่งออกถึง 1,800 ล้านบาท (สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตร กรมการค้าภายใน, 2549) แต่ในช่วงที่ผลผลิตออกสู่ตลาดพร้อมกัน เกษตรกรประสบปัญหาลำไยราคาตก จึงได้มีการนำกระบวนการแปรรูปอาหารมาใช้ เช่น การอบแห้ง การแช่แข็ง การแช่อิ่ม ลำไยกระป๋อง เป็นต้น ซึ่งถึงเป็นสินค้าที่ได้รับการยอมรับของผู้บริโภค โดยเฉพาะอย่างยิ่งลำไยอบแห้งเป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตลำไยให้สูงขึ้น เนื่องจากมีข้อดีคือ มีคุณภาพดีทั้งทางด้านสี รูปร่าง ความสะอาด และความน่ารับประทาน ทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และการเก็บรักษาซึ่งมีแนวโน้มการส่งออกที่สูงขึ้นในอนาคต

การนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในขบวนการอบแห้งอบแห้งกำลังได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) สามารถแผ่รังสีได้รวดเร็ว ง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์ และการบำรุงรักษา และเลือกใช้ได้ตามความยาวคลื่นที่ต้องการ ไม่ทำให้อุณหภูมิของอากาศบริเวณรอบ ๆ รังสีที่มีการแผ่รังสีความร้อนกระจายไปถึงสูงขึ้น แต่อุณหภูมิจะเพิ่มได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอบริเวณผิวและเนื้อชิ้นในของวัตถุ วัตถุจะไม่ถูกทำลายหากวางในตำแหน่งที่เหมาะสม การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดให้มีประสิทธิภาพต้องมีการควบคุมความเข้มของรังสี ความเร็วลมระยะห่างระหว่างที่จ่ายความร้อนกับภาชนะที่ใส่วัสดุ เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้จะเน้นไปที่การควบคุมความเข้มของรังสี ความเร็วลมเนื่องจากการอบแต่ละครั้งหากไม่มีการควบคุมอาจเกิดการสูญเสียความร้อนจะทำให้ปริมาณรังสีที่ต้องการคลาดเคลื่อนจากปริมาณรังสีที่ตกกระทบจริง มีผลต่อการสูญเสียพลังงาน และ วัตถุที่นำมาอบจะไม่ได้มาตรฐาน ส่วนความเร็วลมหากไม่มีการควบคุม เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะเคลื่อนย้ายไอน้ำออกจากเหนือผิวของเนื้อลำไยสดจะทำให้ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกับการสูญเสียความร้อนก็มากด้วย

ผลที่ตามมาจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร สี ลักษณะเนื้อสัมผัส เป็นต้น โดยทั่วไปนั้นการหดตัวของปริมาตร หมายถึงการมีขนาดเล็กลง ในทางกายภาพนั้นเราสามารถวัดได้ทั้งเชิงเส้น (ความยาว ความกว้าง และความสูง) และเชิงปริมาตร สาเหตุมาจากการสูญเสียองค์ประกอบหรือการเปลี่ยนแปลงองค์โครงสร้างภายใน ค่าของสีเป็นค่าที่บรรยายลักษณะ (Physical characteristics) ของวัสดุเกษตรได้ง่ายที่สุด การตรวจสอบ

จะเป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non destructive testing) ส่วนลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นปัจจัยที่สำคัญทั้งในด้านการยอมรับในคุณภาพของผู้บริโภคหรือผู้ใช้ ในด้านการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามข้อกำหนด กระบวนการอบแห้งที่ดีนั้น ขึ้นอยู่กับแบบจำลองจลนศาสตร์การหดตัว สี และเนื้อสัมผัส โดยจะใช้เป็นตัวชี้ถึงคุณภาพสำหรับสภาวะการแปรรูปลำไยแห้ง

การวัดปริมาตร สี และเนื้อสัมผัส เป็นวิธีการวัดโดยตรงในห้องปฏิบัติการ หากสามารถศึกษาแบบจำลองค่าดังกล่าว ก็จะช่วยทำให้สามารถทำนายตัวแปรคุณภาพทั้ง 3 ค่าได้โดยไม่ต้องวัดจริง ซึ่งเป็นงานที่ยาก เสียค่าใช้จ่าย และใช้เวลานาน งานวิจัยแบบจำลองทางด้านคุณภาพผลผลิตมีมากมาย เช่น จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการผลิตองค์ (รัตน และ อนุสรณ์, 2548) การหดตัวของกวีในระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ (Maskan, 2001) แต่ยังไม่มียกย่องว่างานใดศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของการหดตัว เนื้อสัมผัส และสีของเนื้อลำไยเมื่ออบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาในเชิงลึกเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาคุณภาพและอาจจะเป็นกระบวนการที่สำคัญในอนาคตส่งผลต่อเศรษฐกิจการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรของไทยที่จะดียิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้ได้แก่การหาแบบจำลองจลนศาสตร์ของการหดตัว เนื้อสัมผัส และสีของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยได้แก่

1. เพื่อวัดการหดตัว เนื้อสัมผัส และสีของเนื้อลำไยเทียบกับเวลาในระดับความเข้มของรังสีและความเร็วลม
2. เพื่อจำลองจลนศาสตร์และค่าคงที่ที่เป็นฟังก์ชันของความเข้มของรังสีและความเร็วลมต่าง ๆ
3. เพื่อทดสอบความกลมกลืน (Goodness-of-fit test) ของแบบจำลองเทียบกับค่าที่วัดได้จริง

3. อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

3.1 เนื้อลำไยที่ใช้ในการทดสอบ

ผลลำไยที่เหมาะสมควรมีเนื้อหนา สีขาวใส คุณภาพดี ไม่เน่า โดยพันธุ์ที่เหมาะสมที่สุดคืออีดอ เกรด A (เส้นผ่านศูนย์กลาง 27-28 มิลลิเมตร) เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีรสชาติดีเมื่อทำการอบแห้ง แกะเปลือกและคลานเมล็ดออก แล้วล้างน้ำให้สะอาด เตรียมปริมาณให้พอเพียงต่อการทดลองแต่ละครั้ง (ครั้งละ 500 กรัม)

3.2 ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดในระดับห้องปฏิบัติการ (ภาพที่ 1) ประกอบไปด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดแบบแผ่น 200×300 มม. (กว้าง x ยาว) ขนาด 2.4 kW พัดลมชนิดไหลตามแนวแกนขนาด 750 วัตต์ ตะแกรงจัดระเบียบอากาศซึ่งมีขนาดรูตะแกรง 6 มิลลิเมตร ภาชนะรองรับผลผลิตที่กำลังอบแห้ง ระบบติดตามอุณหภูมิ ระบบติดตามมวล ระบบวัดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า และระบบควบคุม

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 ปรับตั้งตัวแปรอิสระซึ่งได้แก่ ความเข้มรังสีอินฟราเรด 0.521, 0.625, และ 0.729 W/cm² และความเร็วลม 0.4, 0.7 และ 1.0 m/s ให้ได้ระดับตามที่วางแผนไว้ โดยการปรับตั้งตัวแปรอิสระ ทำได้ดังนี้

ก) ความเข้มของรังสีอินฟราเรด (IR intensity) หาได้จากสมการที่ 1 และ 2

$$IR \text{ Intensity} = \frac{W}{A} \quad (1)$$

$$W = IV \quad (2)$$

เมื่อ IR Intensity = ค่าความเข้มของรังสีอินฟราเรด (วัดต่อตารางเซนติเมตร)

W = กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีเตอร์อินฟราเรด (วัตต์)

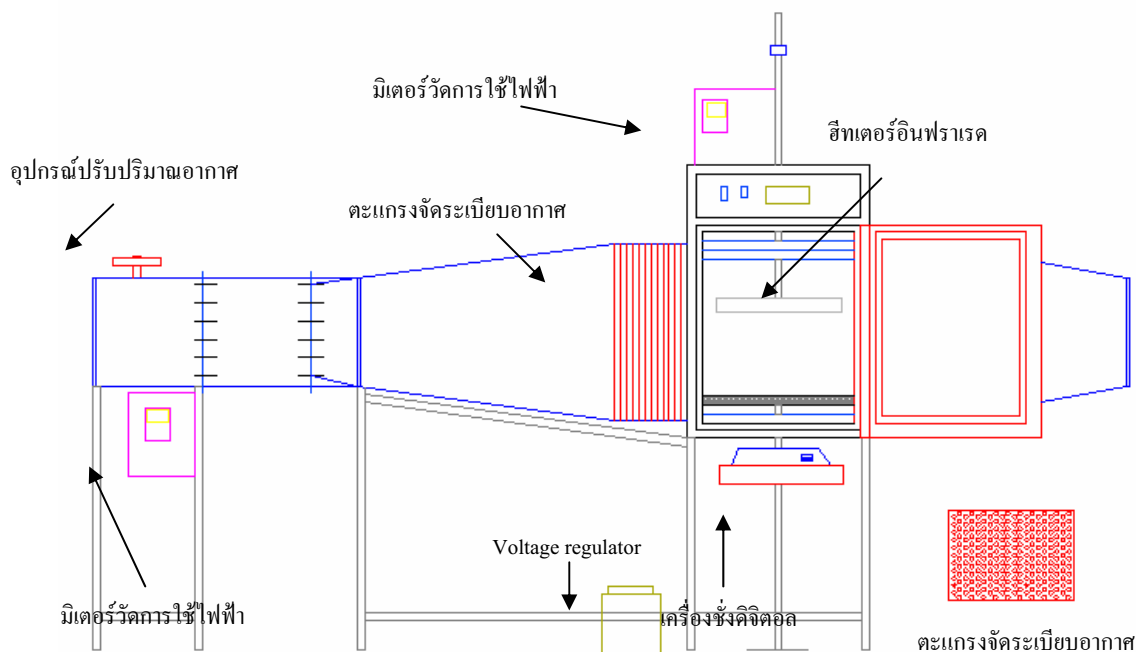
A = พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง (ตารางเซนติเมตร)
V = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีเตอร์อินฟราเรด (โวลต์)
I = กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีเตอร์อินฟราเรด (แอมแปร์)

ข) ความเร็วอากาศเหนือวัสดุทดสอบ เราสามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วลมแบบใช้ขดลวดตัวนำความร้อน (Hot-wire anemometer) ยี่ห้อ Testo รุ่น 405-V1 ย่านการวัด 0.2-20 เมตรต่อวินาที

3.3.2 วางเนื้อลำไยที่สะอาดลงบนถาดรองรับผลผลิตให้ความหนา 1 ชั้น

3.3.3 เปิดฮีเตอร์และพัดลม อบนาน 200 นาที โดยทุก 20 นาทีให้สูมตัวอย่างออกมาวัดปริมาตร ค่าสี และเนื้อสัมผัส

3.3.4 ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งโดยซ้ำที่ 1 ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาแบบจำลองและซ้ำที่สองใช้เพื่อการทวนสอบ



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบหลักของชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดในระดับห้องปฏิบัติการ

3.4 การวัดการหดตัวเชิงปริมาตร สี และเนื้อสัมผัส

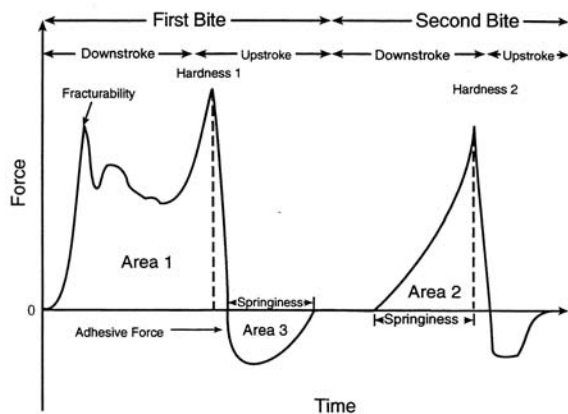
ตัวแปรตามที่ต้องการศึกษาเพื่อหาแบบจำลองได้แก่ การหดตัวเชิงปริมาตร ค่าสี และเนื้อสัมผัสของลำไยซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น โดยมีวิธีการวัดดังนี้

3.4.1 การวัดปริมาตร สามารถหาได้โดยวิธีการแทนที่น้ำในการหาความหนาแน่นที่แท้จริงด้วยวิธี Pycnometer

3.4.2 การวัดค่าสี เครื่องมือที่ใช้วัดสี คือเครื่อง Spectrophotometer โดยใช้ระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ (CIE-Lab System) คือสีที่แทน L* จะบรรยายถึงความสว่าง โดยที่ L* มีค่าเป็นศูนย์แสดงถึงสีดำและ L* มีค่าเป็นหนึ่งร้อยแสดงถึงสีขาว แทน a* จะ

บรรยายถึงสีแดง (+a*) ไปจนถึงสีเขียว (-a*) แทน b* จะบรรยายถึงเหลือง (+b*) ไปจนถึงสีน้ำเงิน (-b*) พร้อมทั้งแสดงค่าสีรวม (ΔE^*) ด้วย โดยแต่ละตัวอย่างวัดไม่น้อยกว่า 3 ค่า

3.4.3 การวัดค่าเนื้อสัมผัส วัดได้จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer รุ่น TA-XT2) โดยจะวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสจากกราฟ TPA (Texture Profile Analysis, TPA) ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งบอกผลด้วยค่าความเกาะติดกัน (Cohesiveness) ซึ่งหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ 2 หาดด้วยพื้นที่ใต้กราฟ 1 ค่าต่ำหมายถึงความนุ่ม ค่าปานกลางหมายถึงเนื้อสัมผัสดี และค่าสูงหมายถึงความแข็งเปราะ



ภาพที่ 2 กราฟ TPA แบบทั่วไปที่ได้จากเครื่องวัดเนื้อสัมผัส
ที่มา: Ma *et al.* (nd, p 120)

3.5 การหาค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับต่าง ๆ

แบบจำลองจลนศาสตร์การหดตัวเชิงปริมาตร สี และเนื้อสัมผัสที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสมการเชิงเส้นเพื่อนำมาหาค่าคงที่ของปฏิกริยาอันดับต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม SPSS Version 15 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination of coefficient, R^2) พิจารณาเลือกสมการที่เหมาะสม ซึ่งจะอธิบายความเหมาะสมของตัวแปรตามกับตัวแปรต้น ค่า R^2 ยิ่งสูง ตัวแปรต้นก็สามารถอธิบายตัวแปรตามได้มาก

3.6 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกริยากับตัวแปรต้น

ค่าคงที่ของปฏิกริยาในสมการถดถอยที่ดีที่สุดจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรต้น (ความเข้มข้นของรังสีและความเร็วอากาศ) เพื่อให้สามารถทำนายค่าคงที่ของปฏิกริยาได้นอกช่วงตัวแปรต้นที่ทดสอบ โดยจะพิจารณาทั้งความสัมพันธ์ในรูปแบบ Linear, Logarithmic, Power, Exponential และ Arrhenius โดยใช้ค่า R^2 เป็นค่าตัดสิน

3.7 การทวนสอบแบบจำลอง (Model validation)

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาทวนสอบเพื่อตรวจวัดความกลมกลืนของแบบจำลอง โดยชี้บอกด้วยค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root mean square error, RMSE) และค่าไคส์แควร์ (Chi-square, χ^2) โดยค่า RMSE ที่เข้าใกล้ศูนย์และค่าไคส์แควร์ยิ่งต่ำแบบจำลองยิ่งมีความแม่นยำ สมการที่ใช้มีดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{i,exp} - P_{i,cal})^2}{N}} \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i,exp} - P_{i,cal})^2}{N - n} \quad (4)$$

เมื่อ n คือจำนวนของสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

4. ผลและวิจารณ์ผล

จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าสี เนื้อสัมผัส และการหดตัวเชิงปริมาตรแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสีของเนื้อลำไยจะเริ่มเปลี่ยนจากสีขาวเมื่อเริ่มต้นอบถึงเป็นสีเหลืองทองเมื่อถึงเวลา 200 นาที ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกริยาเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแบบไมไซเอ็นไซม์ (ประสาร, 2538) ค่าความแตกต่างของสีรวม (Total colour difference, TOC) มีแนวโน้มคงที่ในช่วงแรกของการอบถึงเวลาประมาณ 60 นาที หลังจากนั้นค่าสีรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างเป็นเชิงเส้น โดยที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดมีแนวโน้มทำให้ค่าสีรวมเปลี่ยนแปลงมากกว่าความเร็วลม (ภาพที่ 4)

ค่าความเหนียวเกาะติดกัน (Cohesiveness) เทียบกับเวลาการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามีแนวโน้มเป็นรูปพาราโบลา จากการเริ่มให้ความร้อนเนื้อสัมผัสของลำไยมีความแข็งและค่อย ๆ เหนียวนุ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลาประมาณ 80 นาที หลังจากนั้นความเหนียวนุ่มจะเริ่มลดลงกลายเป็นแข็งเปราะ โดยที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดมีแนวโน้มทำให้ค่าความเกาะติดกันเปลี่ยนแปลงมากกว่าความเร็วลม ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับค่าสีรวม

ค่าการหดตัวเชิงปริมาตรชี้วัดจากค่าปริมาตรจำเพาะของเนื้อลำไยเมื่อเทียบกับเวลา โดยที่ค่ามากแสดงถึงการหดตัวที่น้อย ภาพที่ 6 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปริมาตรของเนื้อลำไยเริ่มลดลงค่อนข้างเป็นเชิงเส้นจากนาที่ที่ 0 ถึงนาที่ประมาณ 100 หลังจากนั้นการหดตัวจะเปลี่ยนแปลงอย่างเล็กน้อยเนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในเนื้อลำไยเริ่มเคลื่อนตัวออกมาเกือบหมด โดยที่ความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดมีแนวโน้มทำให้เกิดการหดตัวมากซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับงานของ Wang and Brennan (1995)

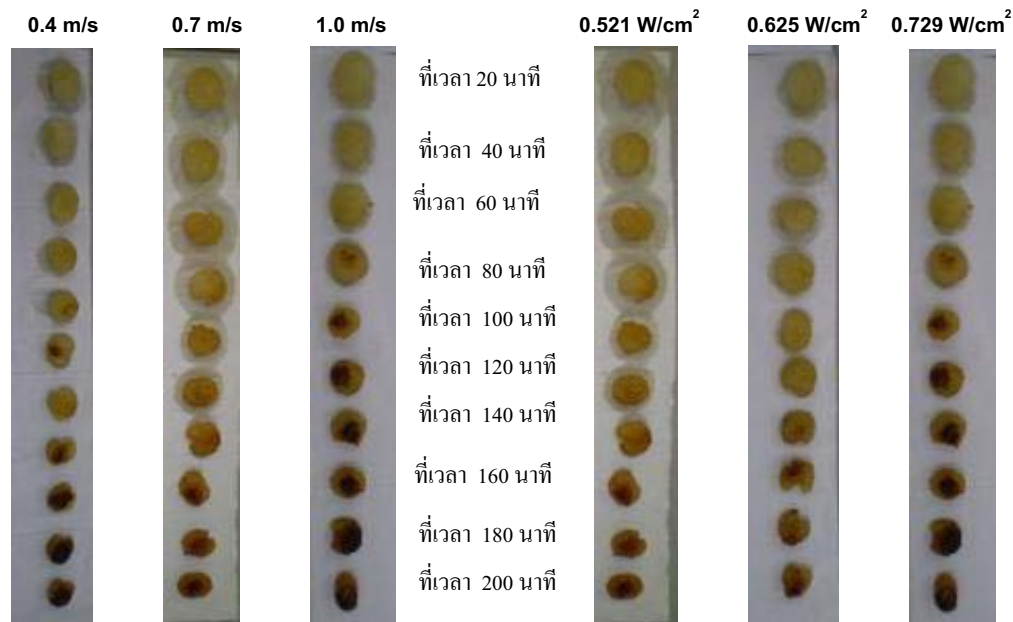


Figure 3 Change in total colour difference of longan flesh (Left) at 0.729 W/cm^2 and (Right) 1.0 m/s .

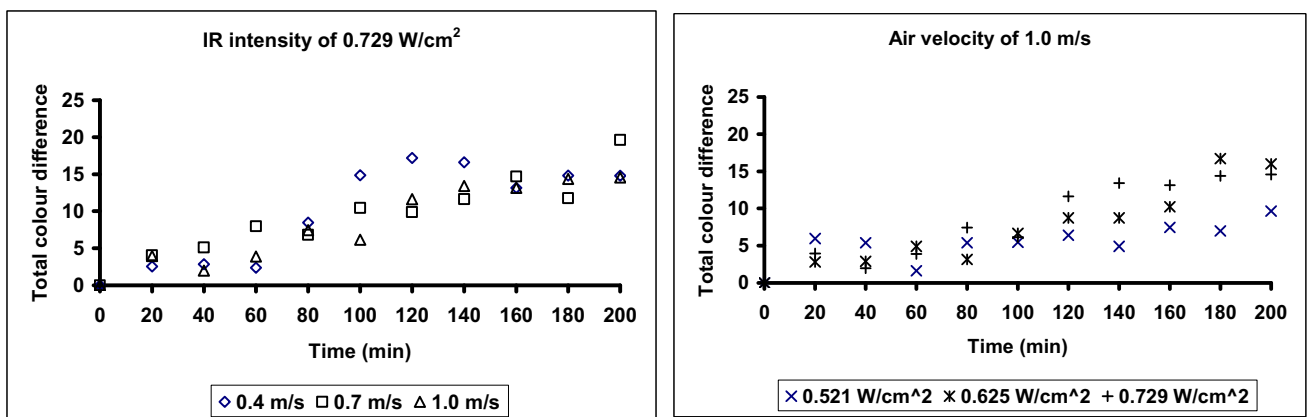


Figure 4 Kinetics of change of colour parameters as a function of time during infrared drying

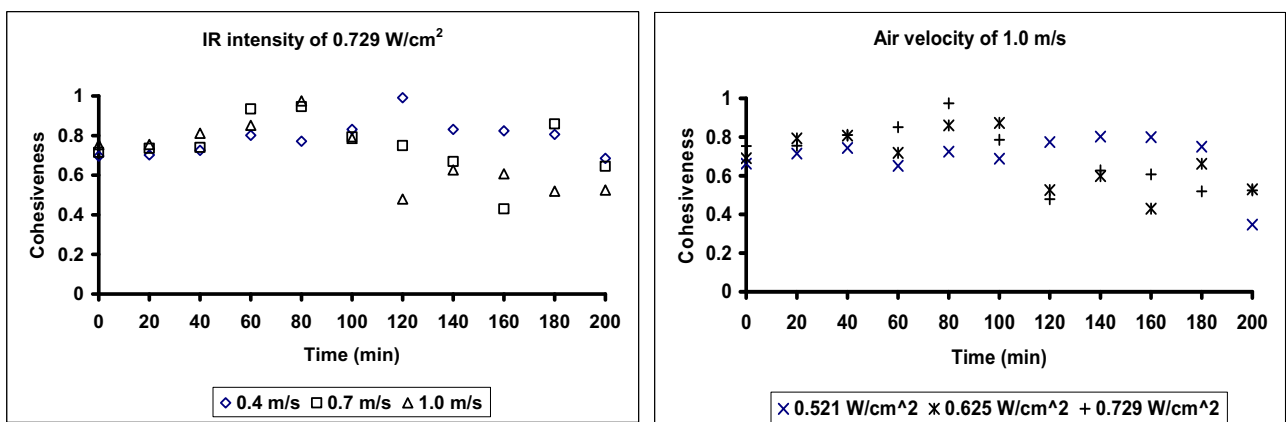


Figure 5 Kinetics of texture parameter as a function of time during infrared drying

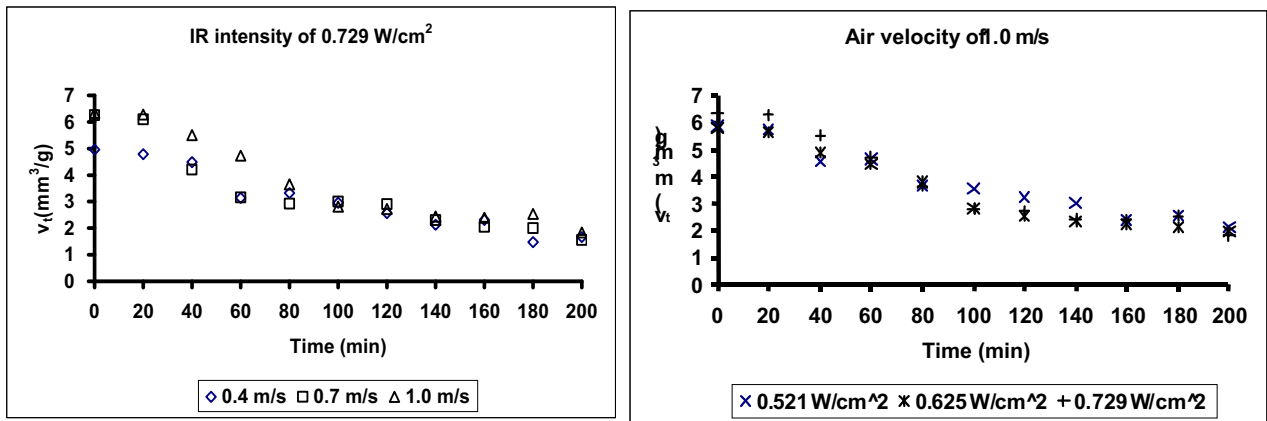


Figure 6 Kinetics of volume shrinkage as a function of time during infrared drying

4.1 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสี

ค่าความแตกต่างของสีรวม (ΔE^*) เป็นพารามิเตอร์ค่าสีที่ได้เลือกมาพิจารณา พบว่าค่าสีรวมเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ตารางที่ 1) โดยค่าคงที่หรือ (β_0) มีค่าเท่ากับศูนย์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นในสมการถดถอยจึงไม่ควรมีค่าคงที่ โดยรูปแบบของสมการถดถอยมีดังนี้

$$\frac{C - C_{Eq}}{C_o - C_{Eq}} = \exp(-k_c t) \quad (5)$$

เมื่อ C = ค่าความแตกต่างของสีรวมของเนื้อลำไย ณ เวลาใด ๆ (ไม่มีหน่วย) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{เมื่อ}$$

L^* คือค่าความสว่าง a^* คือค่าความเป็นสีเขียวกับสีแดง และ b^* คือค่าความเป็นเหลืองกับสีน้ำเงิน โดยใช้ค่าสีเริ่มต้นเป็นค่าอ้างอิง

C_0 = ค่าสีรวมของเนื้อลำไย ณ เวลาเริ่มต้น

C_{Eq} = ค่าสีรวมสมดุลของเนื้อลำไย ณ เวลาสุดท้าย

t = เวลาในการอบแห้งใด ๆ (min)

k_c = ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min^{-1})

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งกับความเข้มรังสีอินฟราเรดและความเร็วลม เพื่อใช้ทำนายค่าคงที่ของปฏิกิริยาได้นอกจากเหนือจากช่วงที่ทดสอบ ทำโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression analysis) พบว่าสมการความสัมพันธ์มีดังนี้

$$k_c = 0.01199 \times IR + 0.00180 \times V, \quad R^2 = 0.900 \quad (6)$$

การทวนสอบแบบจำลองเทียบกับค่าความแตกต่างของสีรวมที่วัดได้จริงพบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก (ภาพที่ 7)

Table 1 Equation parameters, correlation coefficients, %RMSEs and Chi-squares of the colour change models

IR intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	First-order reaction			
		k_c (min ⁻¹)	R^2	%RMSE	χ^2
0.521	0.4	-0.00941	0.933	4.81706	0.02808
	0.7	-0.00843	0.700	4.21576	0.02150
	1.0	-0.00798	0.853	5.83642	0.03791
0.625	0.4	-0.01078	0.918	6.53430	0.05166
	0.7	-0.00636	0.961	6.49601	0.05106
	1.0	-0.00581	0.970	5.30955	0.03411
0.729	0.4	-0.00767	0.914	4.81770	0.02808
	0.7	-0.00661	0.954	3.77084	0.01721
	1.0	-0.01621	0.970	3.70288	0.01339

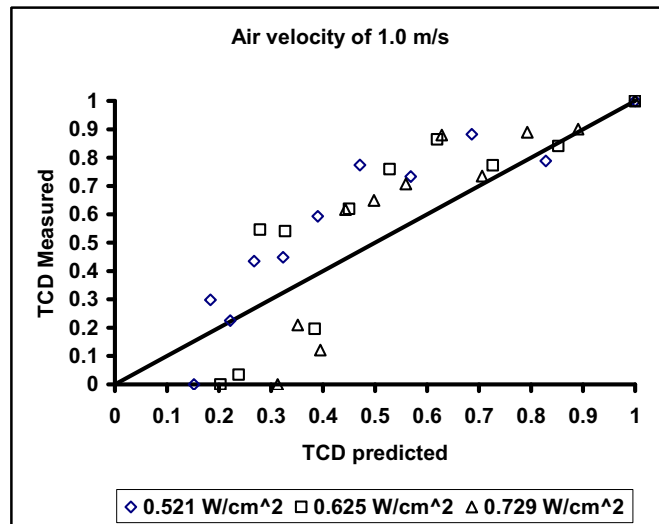


Figure 7 Experimental and predicted total colour difference (TCD) for longan flesh during IR drying.

4.2 แบบจำลองเนื้อสัมผัส

ค่าความเหนียวเกาะติด (Cohesiveness) เป็นค่าที่เลือกมาพิจารณาเพื่อใช้วัดเนื้อสัมผัสของลำใย จากการทำแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) พบว่ามีความสัมพันธ์กับเวลาในการอบแห้งเป็นรูปพาราโบลา (ตารางที่ 2) ดังนั้นสมการปฏิกิริยาจึงใช้ไม่ได้ จึงพิจารณาหาความสัมพันธ์เป็นรูปแบบ polynomial จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression analysis) จึงได้รูปแบบของสมการถดถอยดังนี้

$$Cohesive = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 \quad (7)$$

t = เวลาในการอบแห้ง (min)

โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ต่อเนื่องเพื่อหาสมการถดถอยของค่าคงที่ต่าง ๆ ที่เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรต้น พบว่าค่าคงที่ β_2, β_3 ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรต้น แต่ β_0, β_1 เป็นฟังก์ชันกับความเข้มของรังสีกับความเร็วลม ดังนี้

$$\beta_0 = 0.83822 \times IR + 0.19271 \times V, R^2 = 0.981 \quad (8)$$

$$\beta_1 = 0.01138 \times IR - 0.00289 \times V, R^2 = 0.610 \quad (9)$$

การทวนสอบแบบจำลองเทียบกับค่าความเหนียวเกาะติดที่วัดได้จริง พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก (ภาพที่ 8)

เมื่อ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = ค่าคงที่

Table 2 Equation parameters, correlation coefficients, %RMSEs and Chi-squares of the cohesiveness models

IR intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	Order 3 polynomial						
		β_0	β_1	β_2	β_3	R^2	%RMSE	χ^2
0.521	0.4	0.66464	0.00816	-0.00010	2.75E-07	0.743	3.79778	0.02493
	0.7	0.70063	0.00481	-0.00004	7.95E-08	0.761	2.75288	0.01310
	1.0	0.72658	-0.00489	0.00009	-3.7E-07	0.708	3.32422	0.01910
0.625	0.4	0.62776	0.00610	-0.00005	7.45E-08	0.759	2.89863	0.01452
	0.7	0.56416	0.00880	-0.00005	6.09E-08	0.888	5.06982	0.04443
	1.0	0.67914	0.00705	-0.00009	2.84E-07	0.594	2.02019	0.00705
0.729	0.4	0.69298	-0.00006	0.00003	-1.70E-07	0.745	7.34481	0.09325
	0.7	0.65597	0.00877	-0.00010	3.11E-07	0.374	3.19430	0.01764

	1.0	0.71002	0.00710	-0.00009	2.70E-07	0.689	3.37764	0.01972
--	-----	---------	---------	----------	----------	-------	---------	---------

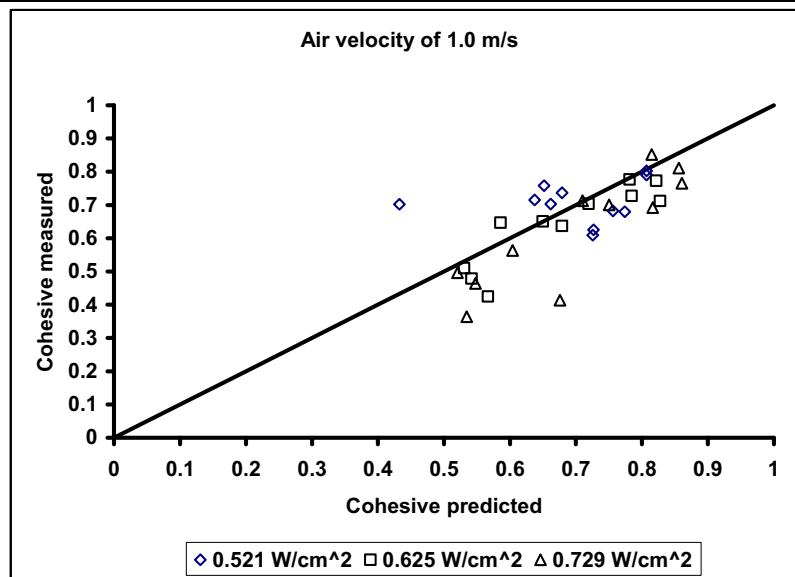


Figure 8 Experimental and predicted cohesiveness for longan flesh during IR drying.

4.3 แบบจำลองการหดตัวเชิงปริมาตร

แบบจำลองการหดตัวเชิงปริมาตรของเนื้อลำไยที่ได้รับความร้อนจากรังสีอินฟราเรดเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ตารางที่ 3) ดังแสดงในสมการ

$$\frac{v_t}{(AM_d + B)} = a \cdot \exp(k_v t) \quad (10)$$

เมื่อ v_t คือปริมาตรจำเพาะของเนื้อลำไย ณ เวลาใด ๆ (mm^3/g)

$$A = \frac{1}{\rho_w} \text{ โดย } \rho_w \text{ คือความหนาแน่นของน้ำในเนื้อ}$$

ลำไยซึ่งหาได้จาก m_w/V_w

$$B = \frac{1}{\rho_d} \text{ โดย } \rho_d \text{ คือความหนาแน่นของมวลแห้งของ}$$

เนื้อลำไยซึ่งหาได้จาก m_d/V_d

$$m_w = \text{มวลของน้ำในเนื้อลำไย (g)}$$

$$V_w = \text{ปริมาตรของน้ำในเนื้อลำไย (mm}^3\text{)}$$

$$m_d = \text{มวลของมวลแห้งของเนื้อลำไย (g)}$$

$$V_d = \text{ปริมาตรของมวลแห้งในเนื้อลำไย (mm}^3\text{)}$$

M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้งของเนื้อลำไย (ทศนิยม)

t = เวลาในการอบแห้ง (min)

a = ค่าคงที่

k_v = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

โดย ณ ระดับความเข้มข้นของรังสีที่สูง ๆ แบบจำลองยังสามารถทำนายค่าได้ดี จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple regression analysis) จึงได้สมการความสัมพันธ์ของค่าคงที่กับตัวแปรต้น ดังนี้

$$a = 0.73096 \times IR + 0.08593 \times V, \quad R^2 = 0.985 \quad (11)$$

$$k_v = 0.00390 \times IR - 0.00043 \times V, \quad R^2 = 0.993 \quad (12)$$

การทวนสอบกับค่าการหดตัวเชิงปริมาตรที่วัดได้จริงพบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก (ภาพที่ 9) เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองค่าสีรวมและค่าความเหนียวเกาะติด ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เนื่องจากการวัดค่าการหดตัวเป็นการวัดทั้งผล ไม่ใช่เป็นการวัดเฉพาะจุด เหมือนกับการวัดค่าสีหรือค่าความเหนียวเกาะติด ดังนั้นหากต้องการแบบจำลองที่ดีและมีความแม่นยำสูง ควรมีวัดค่าตลอดทั้งผล ไม่ใช่วัดเฉพาะจุด

Table 3 Equation parameters, correlation coefficients, %RMSEs and Chi-squares of the volume shrinkage models

IR intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	First-order reaction				
		a	k_v (min ⁻¹)	R^2	%RMSE	χ^2
0.521	0.4	0.52437	0.00208	0.891	1.16016	0.00233
	0.7	0.51859	0.00194	0.856	0.64270	0.00071
	1.0	0.52615	0.00166	0.865	0.79223	0.00108
0.625	0.4	0.52080	0.00250	0.913	0.76831	0.00102
	0.7	0.52743	0.00180	0.949	1.05159	0.00191
	1.0	0.52389	0.00206	0.921	0.87665	0.00133
0.729	0.4	0.53933	0.00256	0.968	1.29511	0.00290
	0.7	0.52817	0.00243	0.960	0.82222	0.00117
	1.0	0.51775	0.00234	0.950	0.76980	0.00102

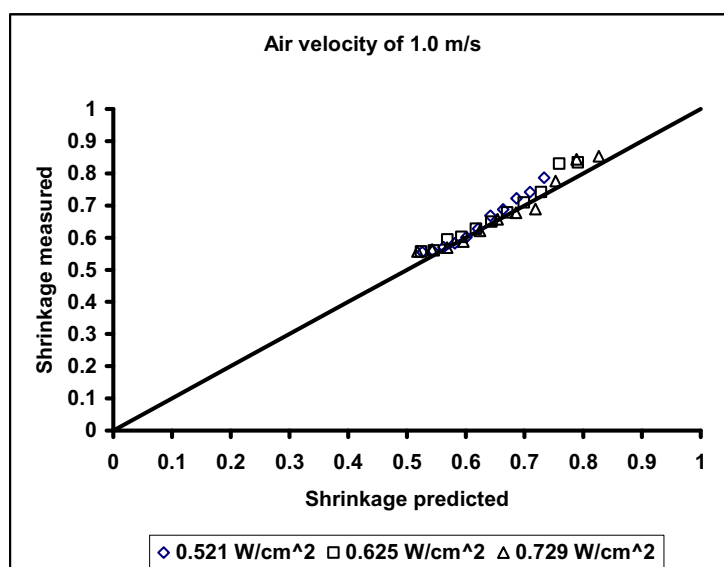


Figure 9 Experimental and predicted specific volume for longan flesh during IR drying.

5. สรุปผลการศึกษา

5.1 แบบจำลองการหดตัวเชิงปริมาตรซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุสามารถทำนายได้ถูกต้องและแม่นยำที่สุด

5.2 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างของค่าสีรวมเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดกับความเร็วม ในรูปเชิงเส้นที่มีค่าคงที่ออกจากจุดกำเนิด แบบจำลองสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงโดยมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองอยู่ในช่วง 3.33 – 6.53 % และไครส์แควร์อยู่ในช่วง 0.01339 – 0.05166

5.3 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวเกาะติดของเนื้อลำใยเป็นไปตามสมการโพลิโนเมียลอันดับสาม โดยค่าคงที่ของสมการถดถอยเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดกับ

ความเร็วมเหมือนกับค่าสีรวม แบบจำลองสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงโดยมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองอยู่ในช่วง 2.02 – 7.34 % และไครส์แควร์อยู่ในช่วง 0.00705 – 0.09325

5.4 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงการหดตัวเชิงปริมาตรที่ขึ้นอยู่กับความชื้นเป็นไปตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของสมการถดถอยเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรดกับความเร็วมเหมือนกับค่าสีรวม แบบจำลองสามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงโดยมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองอยู่ในช่วง 0.64 – 1.30 % และไครส์แควร์อยู่ในช่วง 0.00071 – 0.00290

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับปริญญาดุษฎี (IRPUS) ประจำปี 2550 และโครงการการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด ทุนนักวิจัยรุ่นใหม่ประจำปี 2548

7. เอกสารอ้างอิง

- [1]. นัฐพล กรัณพัต และวีระชัย ม่านมุงศิลป์. 2541. แบบจำลองจลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของแป้งข้าวกลั่นใบเตยอบแห้งด้วยไมโครเวฟ. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [2]. ประสาร สวัสดิ์ชิตัง. 2538. การเกิดสีน้ำตาลของอาหารและการควบคุมป้องกัน. ว.อาหาร 25(3): 160-169.
- [3]. รัตนา ม่วงรัตน์ และนุสรณ์ ภูษา . 2548. จลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในการผลิตอังกัก. ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- [4]. ราม แยมแสงสังข์ และถาวร อริยภูชัย. 2548. แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผักและผลไม้ที่ผ่านการทอดภายใต้สภาวะสุญญากาศ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 4 วันที่ 8-9 ธันวาคม 2548.
- [5]. Ma, L., D. G. Davis, L. G. Obaldo and G. V. Barbosa-Canovas. n.d. *Engineering properties of foods and other biological material*. Washington State Univ., Pullman, Washington.
- [6]. Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. of Food Eng.* 48:177-182.
- [7]. Moreira, R., A. Figueiredo and A. Sereno. 2000. Shrinkage of apple disks during dryingx by warm air convection and freeze drying. *Drying Tech.* 18: 279-294.
- [8]. Tagawa, A., Y. Muramatsu, T. Nagasuna, T. Kasai, M. Imoto and S. Murata. 2002. Volume change of kidney beans soaking in water. *Trans. ASAE* 45(5): 1505-1510.
- [9]. Wang, N. and J. G. Brennan. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *J. of Food Eng.* 24: 61-76.

Kinetics of Color changes, Texture and Volume Shrinkage in Longan Flesh during Infrared Drying

Sunate Surbkar*, Takemi Abe and Tanongkiat Kiatsiriroat

*Department of Agricultural and Food Engineering

Faculty of Engineering and Agro-industry

Maejo University, Sansai, Chiangmai 50290 Thailand

Tel +66 5387 5570 Fax +66 5349 8902 Email: sunate@mju.ac.th

1. Introduction

Longan (*Dimocarpus longan* Lour.) is an evergreen tree of the *Sapindaceae* family and is grown commercially in many countries, including Thailand, China, India and Vietnam (Jiang et al., 2002). In Thailand, this agricultural produce is a considerable importance in country trade and is exported in several forms: 58.18 % fresh longan fruit, 1.42% frozen longan flesh and 39.85% in both dried whole fruit and flesh. A longan flesh is fleshy, translucent white aril and popularly consumed throughout the country is edible. Its high initial moisture content and hence energy cost in drying has been a concern to many food produces. Especially, human beings are facing with an energy shortage. There is, therefore, a concern to develop an innovative way of drying.

There are plenty of nation publications reporting the traditional hot air drying of either longan flesh or longan fruit. Drying condition with such method is usually done in the range of 50-80 °C with superficial air velocity of over 0.3 m/s to minimize changes in physical and chemical properties. The major disadvantages of this traditional drying technique is that it is subject to; have a low drying rate and hence long drying time especially in the falling rate drying period(s), eliminate the product qualities and hence shorten the shelf life.

Drying with an electromagnetic wave, on the other hand, has become a new innovative technique in the past decade. There are three electromagnetic spectrums used for drying, heating, cooking, baking, roasting, curing and thermal treatments (blanching, pasteurization, sterilization, etc); infrared, microwave and radio frequency. Infrared wave has advantages among them as, lower capital cost, easier and safer technology, longer lifetime of irradiators, and can be used in a variety of different applications with many substrate materials. As a result, infrared drying has been investigated as a promising method of foodstuffs; including fruits, vegetables and grains (Afzal et al., 1999; Afzal and Abe, 1999; Umesh Hebbar and Rastogi, 2001; Datta and Ni, 2002; Mongpraneet et al., 2002; Das et al., 2004a, 2004b; Jain and Pathare, 2004; Nowak and Lewicki, 2004; Umesh Hebbar et al., 2004; Sharma et al., 2005; Toğrul, 2005; Bazyma et al., 2006; Praveen Kumar et al., 2006; Toğrul, 2006; Wang and Sheng, 2006). However, any work on the infrared drying and drying kinetic of longan flesh has not been identified till now.

Modeling the color changes, texture development and volume shrinkage during thermal processing may be useful in characterizing texture and quality of the final products. The objectives of this study were therefore to examine a kinetic of these

properties and then to develop an appropriate model for predicting foremention data. This knowledge will be an alternative energy in drying of this potentially valuable fruit.

2. Material and Methods

2.1 Longan Flesh

Longan fruits used in this study were *E-dow* variety having a range of 27 – 28 mm in diameter. This longan cultivar is used worldwide in the drying process because its excellent taste when dried.

2.2 Experimental Setup

A laboratory scale unit of the infrared dryer is shown in figure 1. A rectangular ceramic board infrared heater, measuring 20 × 30 cm in area with an electric power of 2.4 kW were attached to the metal frame. The radiant power was regulated by adjusting the voltage and hence infrared intensities at at 0.521, 0.625 and 0.729 W/cm². Air velocities were also varied at 0.4, 0.7 and 1.0 m/s. Each treatment was replicated for three drying runs for a model development and one for a model validation.

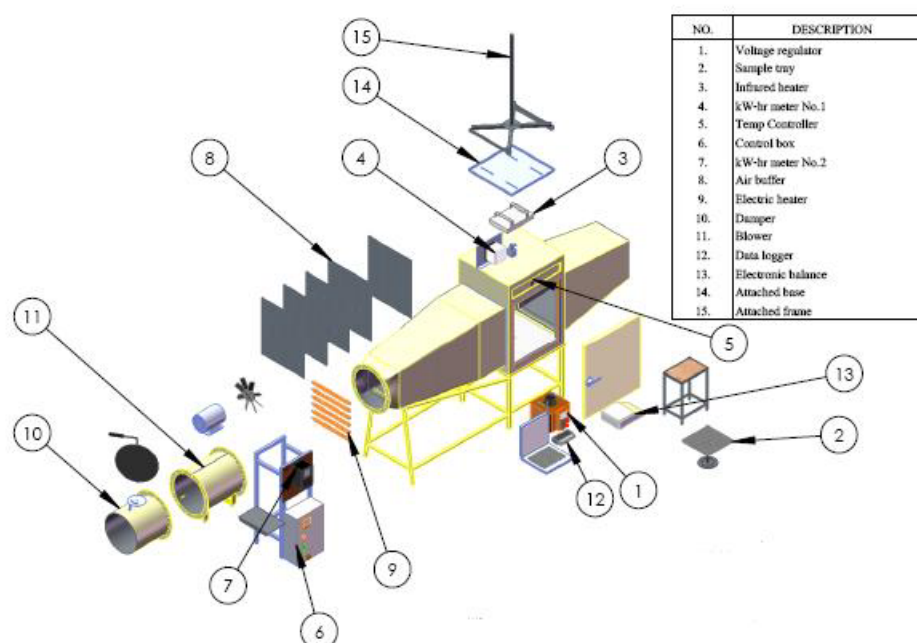


Figure 1 Components of an experimental set-up

2.3 Product Quality Assessments

Experimental data on the changes of color, texture, and volume shrinkage of longan flesh in infrared drying were studied at each drying run for 0 – 200 min with 20-min intervals. Three fruits at a time were taken out from an IR dryer for quality assessment. The color values and texture in term of cohesiveness and adhesiveness were directly measured and indicated promptly by a spectrophotometer (model MiniScan XE Plus) and texture analyzer (model TA.XTplus, Stable Micro Systems Texture Technologies Inc., UK), respectively; whereas, the shrinkage index was calculated from a moisture content and solid volume of longan flesh follow the predetermined equations.

2.4 Model Considerations

The measured quality data were fitted to the rate of change of a food property with a rate constant varied from zero, half-, first-, second- and third-order reaction kinetics. Regressions analyses obtained from this consideration were done by using SPSS 15.0 for Windows routine. The performance of derived new models was evaluated using various statistical parameters such as coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and Chi-square (X^2). The higher correlation coefficient value (R^2) and the lower values of RMSE, and X^2 were chosen as the criteria for goodness of fit.

3. Results and discussion

Total colour differences (TCO) of longan flesh followed the reaction kinetic model having a first order. The reaction rate constant during infrared drying were found to increase as infrared intensity and air velocity increased. Volume shrinkage of longan flesh followed a third-degree polynomial equation. The first two constants were found to increase as infrared intensity increased. Volume shrinkage of longan flesh as moisture dependency followed the reaction kinetic model having a first order. The reaction rate constant during infrared drying were found to increase as infrared intensity increased. A good agreement between observed and predicted values of TOC, cohesiveness, and volume shrinkage as moisture content dependency of longan flesh were obtained, with root mean square values ranging from 0.64 – 7.34 % and Chi-Square from 0.00071 – 0.09325.

A model of shrinkage as moisture content dependency was the best among TCO and texture, resulted from the data measurement done by the whole fruits, partly taken data measurements for the TCO and cohesiveness. Therefore, for a better model the data measurement should be done in whole sample, rather than in part.

4. Conclusions

Kinetics of color changes, texture and volume shrinkage in longan flesh during infrared drying have been determined by the direct gravimetric method at 3 IR intensities and 3 air velocities. The general reaction equation has been employed and shown that the TCO model followed a zero-order and the shrinkage followed a first-order. The texture change in term of cohesiveness, however, followed a third-degree polynomial equation. More work is needed to refine the other texture parameter so that the general reaction equation could be applied.

5. Selected References

- Jiang, Y., Z. Zhang, D. C. Joyce and S. Ketsa. 2002. Review: postharvest biology and handling of longan fruit (*Dimocarpus longang* Lour.). *Postharvest Biology and Tech.* 26: 241-252.
- Ma, L., D. G. Davis, L. G. Obaldo and G. V. Barbosa-Canovas. n.d. *Engineering properties of foods and other biological material*. Washington State Univ., Pullman, Washington.
- Maskan, M. 2001. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. of Food Eng.* 48:177-182.
- Moreira, R., A. Figueiredo and A. Sereno. 2000. Shrinkage of apple disks during dryingx by warm air convection and freeze drying. *Drying Tech.* 18: 279-294.
- Tagawa, A., Y. Muramatsu, T. Nagasuna, T. Kasai, M. Iimoto and S. Murata. 2002. Volume change of kidney beans soaking in water. *Trans. ASAE* 45(5): 1505-1510.

Wang, N. and J. G. Brennan. 1995. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *J. of Food Eng.* 24: 61-76.

คุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด

Drying Characteristics of Longan Flesh by Infrared Radiation

สุนทร สิบคำ (Sunate Surbkar)^{1,2*} ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอานวย (Thanasit Wongsiriamnuay)^{1,2}
ฤทธิชัย อัสวราชันย์ (Ritthichai Assawarachan)^{1,2} สุจิตรา รตนะมโน (Sujitra Ratanamarno)^{1,2}
ระวิน สิบคำ (Rawin Surbkar)³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดจากฮีเตอร์แบบหลอดคู่ที่มีความยาวใช้งาน 300 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มม. ขนาด 500 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีชนิดวางในแนวนอนแบบหลอดคู่ ขนาด 125 x 45 x 315 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด ซึ่งแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นช่วงไกล (FIR) อยู่ในช่วง 3 ถึง 8 ไมโครเมตร โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเนื้อลำไยกับผิวของฮีเตอร์อินฟราเรดชม. การศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.ซม.⁻² และความเร็วอากาศเหนือวัสดุที่กำลังอบแห้ง 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ ที่มีต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพันธุ์อีดอ เกรด A (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27-28 มม.) จากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 80 มาตรฐานเปียก (w.b) เหลือไม่เกินร้อยละ 18 w.b ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 136/2546 ส่วนอัตราการอบแห้งถูกนำไปกำหนดแบบจำลองเอมพิริคัลการอบแห้ง โดยใช้พารามิเตอร์ในการประเมินความเข้ากันได้ของแบบจำลองกับการทดลองหรือความกลมกลืนของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่าแบบอื่น ๆ เนื่องจากค่า χ^2 และ ค่า RMSE ต่ำสุด และ ค่า R^2 อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ส่วนค่าปริมาณความชื้นของเนื้อลำไยแห้งมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 18 w.b และค่าวอเตอร์แอคทิวิตีไม่เกิน 0.75 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 136/2546 ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงของลำไยแห้งเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นสีเหลืองมีค่าลดลง

Abstract

The objective of this study was 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 mid-infrared radiation (MIR). 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 considering from the goodness-of-fit between the calculated and experimental moisture ratios; namely the coefficient of determination (R^2), the reduced chi-square (χ^2) and the root mean square error (RMSE). It was found that the Page Model described the moisture loss within acceptable ranges. Moisture content (not excess 18 % w.b) and water activity of dried longan flesh (less than 0.75) met the requirement of Thai Community Product Standard number 136/2546. The L* and a* values increased whereas the b* decreased in dried longan flesh.

คำสำคัญ: แบบจำลองการอบแห้ง การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ลำไย

Keywords: Drying Model, Infrared drying, Longan

¹ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

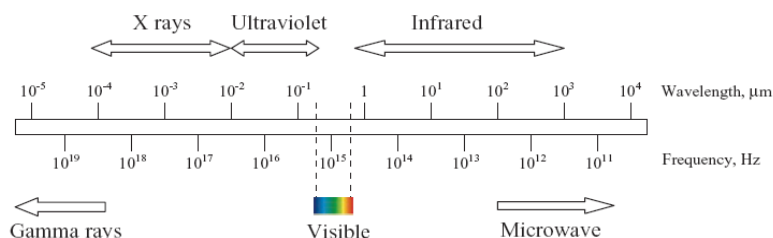
² ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110

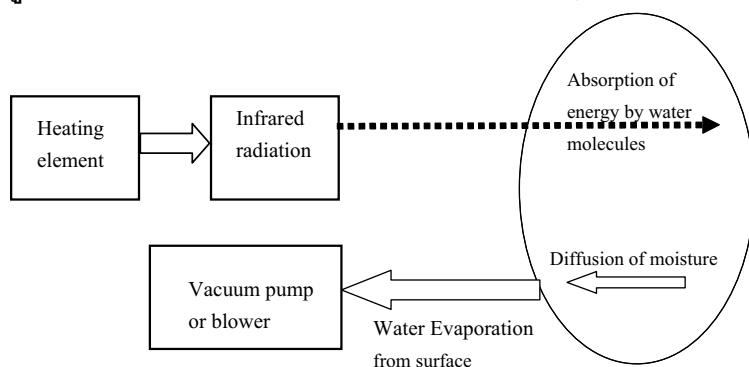
*Corresponding author, e-mail: sunate@mju.ac.th

บทนำ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation, IR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.75 ถึง 1000 μm (รูปที่ 1) แบ่งย่อยเป็น 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ (Near infrared, NIR) มีช่วงความยาวคลื่น 0.75 – 1.4 μm ซึ่งเหมาะสำหรับการอบวัสดุหนากว่าวัสดุชั้นบาง รังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle infrared, mid-IR) ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 1.4 – 3.0 μm และรังสีอินฟราเรดช่วงไกล (Far infrared, FIR) มีช่วงความยาวคลื่น 3.0 – 1000 μm ซึ่งเหมาะสำหรับการอบวัสดุชั้นบาง ๆ (Sakai and Hanzawa, 1994; Nowak and Lewicki, 2004) จะเห็นได้ว่ารังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่ำ และระดับความถี่สูงกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ส่งผลให้มีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำเพียงไม่เกิน 10 มม. (Hall, 1962) ดังนั้นรังสีอินฟราเรดจึงเหมาะกับการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยมีหลักการการทำงานคือรังสีอินฟราเรดจะทำให้โมเลกุลของน้ำในวัสดุสั่นและเกิดความร้อนขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในตัวของวัสดุสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว (Farhat *et al.*, 2000; Mongpraneet, 2003) ดังแสดงกลไกในการถ่ายเทความร้อนและมวลในรูปที่ 2 ซึ่งอาศัยรังสีอินฟราเรดเป็นแหล่งความร้อน ด้วยการถ่ายโอนความร้อนแบบการนำมากกว่าการพา (Adonis and Khan, 2004) และอาศัยลมเป็นตัวพาไอน้ำที่ระเหยแล้วออกสู่ระบบ จึงทำให้วัสดุที่กำลังอบอยู่แห้งทั้งภายในและภายนอกในเวลาเกือบเท่ากัน นั่นคือกระจายความร้อนภายในชั้นวัสดุเป็นไปได้อย่างทั่วถึง ถ่ายเทความร้อนได้เร็วและมีประสิทธิภาพ ลดระยะเวลาการอบแห้งและประหยัดพลังงานถึงร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน (Nowak and Lewicki, 2004) และแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมี heat flux สูง ทำให้เครื่องอบมีขนาดเล็กกะทัดรัด ช่วยลดต้นทุนในการสร้างเครื่อง นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับการอบแห้งแบบพาความร้อนแบบอื่น ๆ ได้อย่างเหมาะสม (อำไพศักดิ์ และคณะ, 2549; Hall, 1962; Sakai and Hanzawa, 1994) ด้วยคุณสมบัติของการเกิดความร้อนที่ผิวของอาหารอย่างรวดเร็วนี้เอง จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผิวอาหาร เช่น ทำให้ผิวของอาหารมีสีเข้มขึ้น หรือมีกลิ่นหอม จึงนิยมนำมาใช้ในการลดความชื้นอาหารที่ต้องการให้มีความชื้นต่ำ มีความหนาไม่มากนัก และต้องการการเปลี่ยนแปลงของสี เช่น การลดความชื้นเมล็ดกาแฟ ผงโกโก้ ใบชา ซึ่งผลพลอยได้ก็คือช่วยให้สีของผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Krishnamurthy *et al.*, 2008)



รูปที่ 2 กลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Wadsworth *et al.*, 1997)

ความน่าสนใจในการให้ความร้อนที่ผิวด้วยรังสีอินฟราเรด จึงมีนักวิจัยหลายคนได้พยายามศึกษาระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดกับพื้นผิวของผลผลิตต่าง ๆ เช่น ผลไม้กับเนื้อที่ระยะ 15 – 25 เซนติเมตร (Dagerskog, 1979) เมล็ดมะม่วงหิมพานต์ที่ระยะ 3.6 เซนติเมตร (Hebbbar and Rastogi, 2001) ใบหอมสดสับที่ระยะ 10 เซนติเมตร (Mongpraneet *et al.*, 2002; Mongpraneet, 2003) การอบแห้งเนื้อที่ระยะ 15 เซนติเมตร (อำไพศักดิ์ และคณะ, 2549; อำไพศักดิ์ และธนภัทร, 2550) และเนื้อลำไยที่ระยะ 25 เซนติเมตร (สุนทร และคณะ, 2554) นอกจากนี้ Farhat *et al.* (2000) ยังศึกษาพบว่าการอบแห้งพริกชี้ฟ้าด้วยรังสีอินฟราเรดควรใช้ความหนาแน่นของรังสี 500 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิอากาศร้อน 40 องศาเซลเซียส และความเร็วอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาทีหรือน้อยกว่า Sharma *et al.* (2005) พบว่า การอบแห้งหอมหั่นแว่นด้วยรังสีอินฟราเรดเกิดอยู่ในระยะการอบแห้งลดลง โดยที่แบบจำลองของเพจสามารถอธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งได้ดีที่สุด Tana *et al.* (2001) ศึกษาการแช่ชิ้นมันฝรั่งและสับปะรดในสารละลายก่อนอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานคุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด การลดความชื้นผลผลิตเกษตรในช่วงอัตราการทำแห้งแบบลดลง มีการควบคุมโดยกลไกการแพร่ของน้ำและ/หรือไอน้ำ แบบจำลอง Newton, Herderson and Pabis, Page และ Modified Page เป็นแบบจำลองการทำแห้งแบบชั้นบางที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้จึงศึกษาการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดโดยมีลมเป็นตัวกลางในการพาไอน้ำออกจากห้องอบแห้ง เพื่อศึกษาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายความชื้นของเนื้อลำไยในระหว่างการอบแห้ง โดยคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นแนวทางใช้ประโยชน์สำหรับการออกแบบสภาวะการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรดในระบบอุตสาหกรรมต่อไป (Kemp *et al.*, 2001) หรือนำไปประยุกต์ใช้กับการอบแห้งระบบอื่น ๆ ต่อไป

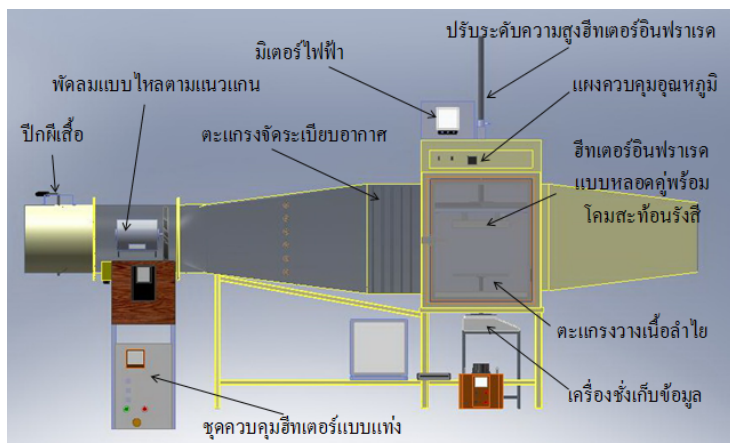
อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

วัตถุดิบ

ผลลำไยพันธุ์ทองเกรด A (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 27 – 28 มม.) หลังจากแกะเปลือกและเมล็ดออก ต้มล้างน้ำและทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำก่อนนำไปทดลอง โดยมีการหาความชื้นเริ่มต้นด้วยวิธี AOAC (1995)

ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบมีอากาศบังคับ

ชุดทดสอบฯ (รูปที่ 3) ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ อาทิเช่น ฮีทเตอร์อินฟราเรดแบบหลอดคู่พร้อมโคมสะท้อนรังสี พัดลมเป่าอากาศแบบไหลตามแนวแกน (Tube axial fan) ชนิดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า ปีกผีเสื้อ (Damper) ควบคุมความเร็วอากาศ ตะแกรงจัดระเบียบอากาศ ตะแกรงวางวัสดุทดสอบ อุปกรณ์ปรับระดับความสูงฮีทเตอร์อินฟราเรด เครื่องชั่งติดตามมวล ชุดควบคุมฮีทเตอร์ มอเตอร์วัดไฟฟ้าฮีทเตอร์ และแผงควบคุมอุณหภูมิ โดยอินฟราเรดฮีทเตอร์เป็นแบบหลอดคู่ที่มีความยาวใช้งาน 300 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มม. ขนาด 500 วัตต์ พร้อมโคมสะท้อนรังสีชนิดวางในแนวนอนแบบหลอดคู่ ขนาด 125 x 45 x 315 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด รวมเป็นอินฟราเรดฮีทเตอร์ 4 หลอด



รูปที่ 3 ชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบมีอากาศบังคับ

การวางแผนการทดลอง

จัดเรียงเนื้อลำไยให้หว่านจุกคว่ำลงและเป็นแบบชั้นบาง อบแห้งด้วยชุดทดสอบการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดแบบมีอากาศบังคับที่ระดับความหนาแน่นรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.ซม.² และความเร็วอากาศเหนือวัสดุที่กำลังอบแห้ง 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างเนื้อลำไยกับผิวของฮีตเตอร์อินฟราเรดคงที่ 25 ซม. วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ๆ ละ 500 กรัมเนื้อลำไยสดอบจนเหลือ 100 กรัม วัดและบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของเนื้อลำไยในระหว่างการทดลองโดย electronic balance ผ่านช่องสัญญาณ RS-232 ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกราฟการอบแห้ง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไย สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สมการของอัตราส่วนความชื้นคำนวณจาก

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

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น และ M_i , M_t , M_e คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ ความชื้นเริ่มต้น และ ความชื้นสมดุล ตามลำดับ

จากการตรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่นิยมใช้ในการศึกษาสำหรับการอบแห้งวัตถุทางการเกษตรจำพวกผักและผลไม้ มักนิยมใช้แบบจำลองเอมไพริคอล (Empirical model) อาทิเช่น แบบจำลอง Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุในระหว่างการอบแห้ง

Model name	Model	Reference
Newton or Exponential	$MR = \exp(-kt)$	Jain and Pathare (2004), Lin <i>et al.</i> (2005), Sharma <i>et al.</i> (2005), Waewsak <i>et al.</i> (2006)
Herderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Jain and Pathare (2004), Lee <i>et al.</i> , 2004; Sharma <i>et al.</i> (2005), Waewsak <i>et al.</i> (2006)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Jain and Pathare (2004), Lin <i>et al.</i> (2005),

		Sharma et al. (2005), Waewsak et al. (2006)
Modified Page	$MR = \exp[(-kt)^n]$	Jain and Pathare (2004), Sharma et al. (2005), Waewsak et al. (2006)

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

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่าการลดลงไคกำลังสอง (χ^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, RMSE) เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติซึ่งช่วยในการวิเคราะห์การเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำในการทำนายค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการอบแห้ง (Jain et al., 2004; Lin et al., 2005; Sharma et al., 2005; Waewsak et al., 2006) ค่า R^2 เป็นค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพของรูปแบบสมการในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง โดยยิ่งมีค่าเข้า 1.0 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวมีความแม่นยำมาก ในขณะที่ค่า χ^2 และค่า RMSE เป็นพารามิเตอร์ทางสถิติที่ใช้บ่งบอกความผิดพลาดในการทำนายค่าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งที่มีความแม่นยำในการทำนายที่เหมาะสม ควรจะมีค่า R^2 มากแต่มีค่า χ^2 และค่า RMSE น้อย โดยสมการแสดงการคำนวณหาพารามิเตอร์ มีดังนี้

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

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

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

พลังงานจำเพาะที่ใช้ในการอบแห้งเนื้อลำไย

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) นิยมใช้เป็นค่าบ่งบอกสมรรถนะเครื่องอบแห้ง เนื่องจากน้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุอบแห้งแตกต่างกัน คำนี้นหาได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำต่อปริมาณน้ำที่ระเหยซึ่งหาได้จากสมการ (Pakowski and Mujumdar, 1995)

$$SEC = \frac{Q}{m_{w,evap}} \quad (4)$$

เมื่อ SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (W/g)

Q = พลังงานความร้อนรวมที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (W)

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

การวิเคราะห์คุณภาพของเนื้อลำไยแห้ง

นำเนื้อลำไยอบแห้งไปตรวจวัดปริมาณความชื้นโดยใช้เครื่องวัดความชื้นของอาหาร (ยี่ห้อ A&D รุ่น AD-4714) ด้วยอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส นาน 99 นาที วัดค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water Activity, a_w , ยี่ห้อ Aqua Lab รุ่น Series 3TE) และค่า CIE-L*a*b* ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE plus) ค่าสีสามค่าที่ได้จะถูกนำไป

ผลการทดลองและวิจารณ์

ความชื้นสมดุลของเนื้อลำไย

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

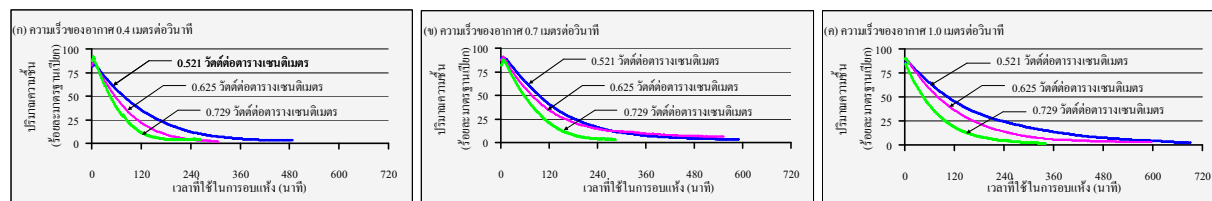
$$M_e = 18.375 - 26.656 \times IR + 8.704v; R_{adj}^2 = 0.808 \quad (5)$$

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

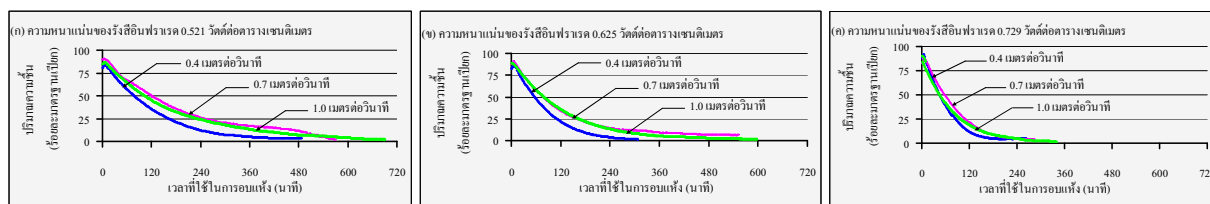
IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)		
	0.4	0.7	1.0
0.521	7.5	10.1	14.2
0.625	5.1	7.2	10.9
0.729	3.7	4.7	6.8

คุณลักษณะการอบแห้งเนื้อลำไย

เนื้อลำไยสดถูกอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 81 มาตรฐานเปียก (w.b.) เหลือไม่เกินร้อยละ 18 w.b. ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) กราฟการอบแห้งแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงอิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ความเร็วต่าง ๆ ซึ่งว่าความชื้นของเนื้อลำไยลดลงตามความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นในทุกระดับความเร็ว เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนอาศัยหลักการของการแผ่รังสี โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ดังนั้นรังสีอินฟราเรดจึงถูกส่งไปยังเนื้อลำไยโดยตรง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharma *et al.* (2005) ที่ศึกษาการอบหมักหัวใหญ่หั่นแฉ่นหนา 6±0.1 มม. ด้วยความเร็วในช่วง 1.0 – 1.5 ม.วินาที⁻¹ รูปที่ 5 แสดงกราฟการอบแห้งที่เป็นอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ ซึ่งว่าความเร็วอากาศ 0.4 ม.วินาที⁻¹ ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นกว่าความเร็ว 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ เวลาในการอบแห้งที่ใช้ในการลดความชื้นจากมวลเริ่มต้น 500 กรัมเหลือ 100 กรัม มีค่าต่ำในระดับความเร็วอากาศ 0.4 – 0.7 ม.วินาที⁻¹ สำหรับความหนาแน่นรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.ซม.⁻² ขึ้นไป ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำด้วย แต่หากใช้ความเร็ว 1.0 ม.วินาที⁻¹ เวลาในการอบจะยาวนานออกไปเนื่องจากเนื้อลำไยสูญเสียความร้อนให้กับอากาศที่พัดผ่าน (ตารางที่ 3)



รูปที่ 4 กราฟการอบแห้งเนื้อลำไยที่ความหนาแน่นรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ สำหรับแต่ละความเร็วอากาศ



รูปที่ 5 กราฟการอบแห้งเนื้อลำไยที่ความเร็วอากาศต่าง ๆ สำหรับแต่ละความหนาแน่นรังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 3 ความชื้นเนื้อลำไยแห้ง ระยะเวลาในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งเนื้อลำไย

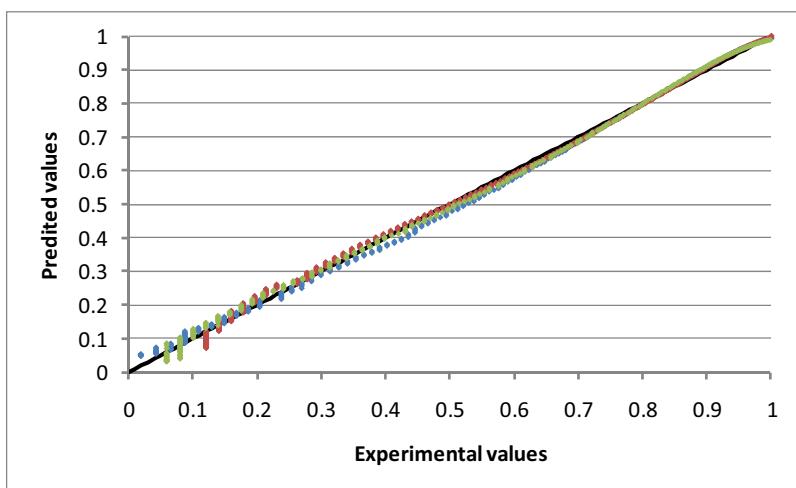
IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	MC (% wb)	Drying time (min)	SEC (kJ/g water evap)
0.521	0.4	11.8±0.5	551±159	69.93±20.50
0.521	0.7	15.5±2.7	512±119	94.23±31.99
0.521	1	18.0±2.4	486±122	77.79±14.15
0.625	0.4	19.2±0.4	276±27	58.68±13.86
0.625	0.7	10.1±1.8	396±138	71.46±24.58
0.625	1	14.7±3.6	505±79	90.87±14.68
0.729	0.4	10.5±2.2	212±48	51.39±11.73
0.729	0.7	12.7±2.0	194±24	45.48±7.15
0.729	1	15.7±1.7	464±224	83.49±18.40

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบสมการถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้ง Newton, Henderson and Pabis, Page และ Modified Page ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง Page มีความเหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด เพราะมีค่า R^2 สูงสุด เท่ากับแบบจำลอง Modified Page โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.9606 – 0.9913 แต่แบบจำลอง Page มีค่า χ^2 ต่ำกว่า จึงเลือกแบบจำลองดังกล่าวเพื่อแสดงพฤติกรรมของการถ่ายเทความชื้นของเนื้อลำไยอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด รูปที่ 6 แสดงความสอดคล้องของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองและการทำนายโดยแบบจำลอง Page ที่ความเร็วอากาศ 0.4 m/s ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายกระจายอยู่รอบ ๆ เส้นตรง แสดงว่าแบบจำลองสามารถทำนายได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sharma *et al.* (2005) ศึกษาพบว่าแบบจำลอง Page เหมาะสมกับการอบหมวใหญ่หั่นแว่นหนา 6±0.1 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรด และงานวิจัยของ Lin *et al.* (2005) ที่อบแห้งมันเทศหั่นเต๋าขนาด 10, 17.5 และ 25 มม. แบบเยือกแข็งร่วมกับรังสีอินฟราเรด ส่วน Jain and Pathare (2004) พบว่าแบบจำลอง Asymptotic หรือ Logarithmic ($MR = a_0 + a \cdot \exp(-kt)$) เหมาะสมกว่าเมื่ออบแห้งหมวใหญ่หั่นแว่นหนา 6±0.01 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ในขณะที่ Togrul (2006) ศึกษาพบว่าแบบจำลอง Midilli *et al.* ($MR = a \cdot \exp(-kt^N) + b \cdot t$) เหมาะสมกับการอบแครอทหั่นชิ้นหนา 1 – 2 มม. ด้วยรังสีอินฟราเรดความยาวช่วงคลื่น 2 – 3.5 μm ซึ่งจัดเป็นรังสีอินฟราเรดช่วงใกล้ถึงช่วงกลาง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้แบบจำลอง Page ซึ่งมีรูปสมการง่ายกว่าก็สามารถอธิบายพฤติกรรมของการถ่ายเทความชื้นของเนื้อลำไยได้แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องศึกษาแบบจำลองอื่น ๆ ซึ่งมีระดับความยาก และความซับซ้อนมากกว่า

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 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



รูปที่ 6 อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อลำไยที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลอง Page ที่ระดับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดต่าง ๆ และ ความเร็วอากาศ 0.4 ม.วินาที⁻¹

คุณภาพของเนื้อลำไยอบแห้ง

ผลการตรวจวัดคุณภาพของเนื้อลำไยหลังการอบแห้งในสภาวะที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.ซม.² กับความเร็วของอากาศที่ระดับ 0.4, 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ แสดงในตารางที่ 3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ความชื้นลำไยแห้งส่วนใหญ่มีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 นั่นคือความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 มาตรฐานเปียก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2546) โดยมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วของอากาศ เนื่องจากความเร็วของอากาศจะเป็นตัวกลางพาความร้อนจากฮีทเตอร์ออกไปกับอากาศชั้น ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) และแปรผกผันกับความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด สำหรับค่า a_w มีค่าใกล้เคียงกันทุกสภาวะการอบแห้ง และผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 136/2546 ซึ่งกำหนดว่าผลไม้อบแห้งจะต้องมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี้ไม่เกิน 0.75 ค่าความสว่างของเนื้อลำไยเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดที่ทำให้ความสว่างของเนื้อลำไยสูงสุดคือ 0.625 วัตต์.ซม.² ในทุกระดับความเร็วอากาศ ส่งผลให้ค่าสีรวมมีค่าสูงสุด ในขณะที่ค่า hue angle ซึ่งแสดงถึงค่าความเป็นสีน้ำตาลไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสภาวะการอบแห้งอื่น ๆ จึงสรุปได้ว่าหากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสีดีที่สุดควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.ซม.² และเมื่อพิจารณาพร้อมกับเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะดังแสดงในตารางที่ 3 ก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 0.7 ม.วินาที⁻¹ ถึงแม้ว่าที่ความเร็ว 0.4 ม.วินาที⁻¹ จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า แต่ความชื้นของเนื้อลำไยมีค่าสูงเกินระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา

ตารางที่ 5 อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรดและความเร็วอากาศต่อคุณภาพเนื้อลำไยอบแห้ง

IR Intensity (W/cm ²)	Air velocity (m/s)	L*	a*	b*	ΔE	Hue angle	a _w
0.251	0.4	30.54±1.35 ^{ad}	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
0.251	0.7	31.18±1.69 ^{abd}	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
0.251	1	34.25±0.95 ^c	3.45±2.33 ^a	14.03±3.59 ^{abc}	33.97±3.31 ^b	12.65±6.29 ^b	0.543±0.045 ^a
0.625	0.4	31.93±0.66 ^{abcd}	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	33.54±1.48 ^{bc}	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	34.74±1.55 ^c	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	25.22±2.21 ^e	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	29.04±2.45 ^d	6.32±2.96 ^a	13.26±2.22 ^{bc}	32.30±2.83 ^{bc}	25.31±11.90 ^{bc}	0.473±0.011 ^a
0.729	1	32.15±0.9b ^{abc}	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

ค่าเฉลี่ยในแต่ละคอลัมน์ที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษแตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

สรุปผลการทดลอง

อิทธิพลของความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 3 ระดับ คือ 0.521, 0.625 และ 0.729 วัตต์.ซม.⁻² และความเร็วอากาศ 3 ระดับ คือ 0.4, 0.7 และ 1.0 ม.วินาที⁻¹ ต่อการอบแห้งเนื้อลำไยพันธุ์ดอเกรด A ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง Page สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ใกล้เคียงที่สุด หากต้องการเนื้อลำไยที่มีคุณภาพทางด้านสีดีที่สุดควรอบแห้งที่ความหนาแน่นของรังสีอินฟราเรด 0.625 วัตต์.ซม.⁻² และเมื่อพิจารณาพร้อมกับเวลาในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็สามารถสรุปได้ว่าควรอบแห้งที่ความเร็วอากาศ 0.7 ม.วินาที⁻¹

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ ประจำปี 2547 ในโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับ สกว. ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทรัพยากรต่าง ๆ ในการดำเนินงาน และขอขอบคุณ นางสาวดวงกมล ฟองสินธุ์ นางสาวเนตรมกา สีหานารถ และนายพัฒนพงษ์ บุญยศักดิ์ไพศาล ที่ช่วยเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2546. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผลไม้อบแห้ง: มผช. 136/2546. (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก:

http://www.nectec.or.th/courseware/siamculture/otop\tis\tcp s136_46.pdf

สุนทร สืบคำ ทาเกมิ อาเบ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. 2554. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การอบแห้งเนื้อลำไยด้วยรังสีอินฟราเรด. เสนอ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

อำไพศักดิ์ ธิบุญมา ธนภัทร สุวรรณภู และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2549. การอบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรด. วิศวกรรมสาร มช. 33(2): 169-180.

อำไพศักดิ์ ธิบุญมา และ ธนภัทร สุวรรณภู. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและลมร้อนร่วมรังสีอินฟราเรด. วิศวกรรมสาร มช. 34(2): 189-201.

- Adonis, M. and M.T.E. Khan. 2004. Combined convective and infrared drying model for food applications. *IEEE AFRICON 2004*: 1049-1052.
- 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, 16th ed. VA., USA.: AOAC.
- 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.
- 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.
- Hall, C.W. 1962. Theory of infrared drying. *Trans. ASAE* 5: 14-16.
- Hebbbar, H. U. and N. K. Rastogi. 2001. Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *J. Food Eng.* 47: 1-5.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lee, G., W. S. Kang and F. Hsieh. 2004. Thin-layer drying characteristics of chicory root slices. *Trans. ASAE* 45(5): 1619-1624.
- 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.
- Mongpraneet, S. 2003. Drying characteristics of a far infrared heater combined vacuum operation. Unpub. Ph.D. dissertation. Ehime University, Matsuyama, Japan. pp 106.
- Mongpraneet, S., T. Abe and T. Tsurusaki. 2002. Far infrared-vacuum and -convection drying of welsh onion. *Trans. ASAE* 45(5): 1529-1555.
- Nowak, D. and P. P. Lewicki. 2004. Infrared drying of apple slices. *Innovative Food Sci. & Emerging Tech.* 5: 353-360.
- 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.
- Sakai, N. and T. Hanzawa. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Sci. & Tech.* 5: 357-362.
- 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.
- Shishegharha, F., J. Makhlof and C. Ratti. 2002. Freeze-drying characteristics of strawberry. *Drying Tech.* 20(1): 131-145.
- 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.
- Togrul, H. 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *J. Food Eng.* 77: 610-619.
- Wadsworth, J. I., L. Velupillai, and L. R. Verma. 1990. Microwave-vacuum drying of parboiled rice. *Trans. ASAE* 33(1): 199-210.
- 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.
- Wang, J. and K. Sheng. 2006. Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT* 39: 247-255.