



การอบแห้งกล้วยหอมทองด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด

Drying of Gros Michel Banana by Using Solar Combined with Infrared Dryer

ศิริ ดวงพร* อภिरักษ์ ลอยแก้ว ปริญญา พันธุ์พรหม และภากร ไทยพิทักษ์

Siri Doungpom*, Aphirak Loykaew, Parinya Panprom and Pakorn Thaipituk

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

Physics Program, Faculty of Science, Udon Thani Rajabhat University

*Corresponding author; E-mail: sirido@yahoo.co.th

Received: 22 March 2019 | Revised: 25 April 2019 | Accepted: 17 June 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกล้วยหอมทองและสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้กระจกใสและเลนส์นูนเป็นตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้ง 50 °C และ 70 °C ดำเนินการทดลองโดยนำกล้วยหอมทองที่มีความชื้นเริ่มต้น 309.2 %db. หั่นตามขวางเป็นชิ้นบางขนาด 0.5 cm. จำนวน 10 kg นำไปอบแห้งจนความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 6.0 %db. ผลการวิจัยพบว่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวัน มีค่าอยู่ระหว่าง 666.8 - 687.1 W/m² ความชื้นและอัตราการความชื้นจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ลดลงเร็วและใช้เวลาอบน้อยกว่าอุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 50 °C อัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นต่ำ เพิ่มขึ้นในช่วงกลางวันและลดลงเล็กน้อยในช่วงเย็น สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 8.68×10^{-08} - 9.85×10^{-08} m²/s และสมการการอบแห้งของ Page สามารถพยากรณ์การอบแห้งกล้วยได้ ชนิดของตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เฉพาะอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะโดยอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70 °C มีค่าสูงกว่า 50 °C

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด จลนพลศาสตร์การอบแห้ง กล้วยหอมทอง



Abstract

The objective of this research was to study the drying kinetics of gros michel banana and the performance of solar combined with an infrared dryer by using flat plate glass and convex lens as solar collectors and drying temperature was 50, 60 and 70 °C. The banana with 309.2 %db. initial moisture content was sliced into 0.5 cm. thin pieces. Ten kilograms of banana was dried until the final moisture content was 6.0 % db. The research found that the average daily solar radiation intensity was between 666.8 - 687.1 W/m². The moisture content and moisture rate decreased continuously, and drying time in the case of drying temperature at 70 °C was less than that of drying at 60 °C and 50 °C. The initial drying rate had low, increased during the daytime and slightly decreased in the evening. The moisture diffusion coefficient was between 8.68×10⁻⁰⁸- 9.85×10⁻⁰⁸ m²/s. The Page drying equation can predict the drying of banana. Types of collectors and drying temperatures do not affect on drying efficiency and specific energy consumption. The drying temperature affects on the specific energy consumption which 60 and 70 °C drying temperatures have SEC higher than 50 °C.

Keywords: The solar combined with infrared dryer, Drying kinetics, Gros michel banana

บทนำ

กล้วยหอมของไทยได้ชื่อว่ามีคุณภาพดีและมีหลายพันธุ์ ซึ่งแต่ละพันธุ์ล้วนมีรสชาติและความหอมที่ผู้บริโภคชื่นชอบ กล้วยหอมทองเป็นพืชเศรษฐกิจที่สามารถปลูกได้ทั่วไปและให้ผลผลิตตลอดปี แต่มีอายุเก็บรักษาเพียง 5-7 วัน ในบางฤดูกาลมีผลผลิตมากเกินความต้องการ ดังนั้นการแปรรูปให้เป็นกล้วยอบแห้งจึงเป็นทางเลือกที่สามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้

การอบแห้งเป็นกระบวนการลดความชื้นหรือกำจัดน้ำออกจากผลิตภัณฑ์โดยใช้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุม ซึ่งจะมีการถ่ายโอนความร้อนและถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ช่วยลดค่าแวลเตอร์ แอกติวิตีในผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีผลยับยั้งการเจริญของ

เชื้อจุลินทรีย์และการทำงานของเอนไซม์ ลดน้ำหนักและปริมาณของผลิตภัณฑ์ทำให้สะดวกในการขนส่งและเก็บรักษา ช่วยรักษาคุณภาพให้ได้ยาวนานขึ้น การพัฒนาวิธีการอบแห้งจะใช้เทคนิคและหลักวิชาทางวิศวกรรมโดยอาศัยหลักการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในชั้นผลิตภัณฑ์ทำให้น้ำหรือความชื้นกลายเป็นไอระเหยออกไปจากผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ความร้อนที่ส่งเข้าไปอาจจะเป็นการนำความร้อน การพาความร้อน หรือการแผ่รังสี ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วขึ้น คุณภาพดี มีความชื้นต่ำ ได้คุณภาพตามที่ต้องการ และสามารถควบคุมอัตราการอบแห้งได้ นอกจากนี้ การอบแห้งยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และโภชนาการเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วย



โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน เช่น อาหารและชีวผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ทำให้สี คุณค่าทางอาหาร รสชาติ และโครงสร้างมีการสูญเสียเกิดขึ้น [1] การอบแห้งสามารถทำได้หลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป จากการศึกษาของงานวิจัยเกี่ยวกับการอบแห้งที่ผ่านมาพบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง อบแห้งด้วยสุญญากาศ และอบแห้งด้วยความร้อนจะได้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างดีเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค [2] แต่มีข้อเสียคือระบบซับซ้อนและต้นทุนที่สูง ซึ่งไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดครัวเรือน สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีที่น่าสนใจผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบมีคุณภาพสูง [3] และเป็นที่ยอมรับกันดีในปัจจุบัน แต่มีข้อจำกัดคือไมโครเวฟมีอันตรายเพราะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมนอย่างมากเพราะมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นที่ได้กล่าวมา [4] เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้แหล่งความร้อนจากหลายแหล่งที่หาได้ง่าย เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ขดลวดความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซ LPG หรือความร้อนทิ้งจากกระบวนการต่าง ๆ ของโรงงาน เป็นต้น แต่การอบแห้งด้วยลมร้อนก็มีข้อด้อยคือผิวนอกของผลิตภัณฑ์เกิดการเหี่ยวยุบเพราะอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะสูงที่สุดที่ผิวนอก การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นวิธีการอบแห้งวิธีหนึ่งที่มีต้นทุนต่ำ [4, 5] มีจุดเด่นคือพลังงานจากรังสีอินฟราเรดจะแผ่ไปยังผลิตภัณฑ์ซึ่งจะทำให้ร่างกายในผลิตภัณฑ์สั้น และเกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิภายในผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ผิว [6, 7] ทำให้ผิวนอกผลิตภัณฑ์ไม่เหี่ยวยุบ ช่วยให้ผิวอัตราการอบแห้งสูง ลดเวลาและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง การใช้หลอดอินฟราเรดจะให้ Heat Flux

ค่อนข้างสูง [8, 9, 10, 11] ดังนั้นเครื่องอบแห้งจึงมีขนาดกะทัดรัด ช่วยลดเงินทุนในการสร้างเครื่องอบแห้ง นอกจากนี้การให้ความร้อนโดยการแผ่รังสีอินฟราเรด อุณหภูมิจะกระจายค่อนข้างสม่ำเสมอ [11, 12] จึงไม่มีปัญหาความชื้นไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งยังต้องการอากาศหมุนเวียนที่เล็กน้อย ทำให้ไม่ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ ลดต้นทุนอุปกรณ์และค่าพลังงาน และอินฟราเรดสามารถนำไปใช้ควบคู่กับระบบอื่นได้ง่ายเนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่น้อย ไม่มีความซับซ้อนของระบบรวมทั้งตอบสนองต่อการควบคุมได้รวดเร็ว [4, 5]

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน มีความจำเป็นต่อดำรงชีวิต โดยเฉพาะในการถนอมอาหารส่วนใหญ่จะใช้การตากแดดซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนต่ำหรือไม่มีค่าใช้จ่าย แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพต่ำเนื่องจากการปนเปื้อนสิ่งสกปรกต่าง ๆ เกิดความเสียหายระหว่างการตาก เช่น เปียกฝน ชื้นรา หรือถูกทำลายจากนก หนู แมลง และสัตว์ต่าง ๆ ใช้เวลานานไม่สามารถผลิตได้ต่อเนื่อง ถ้าหากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวยก็ไม่สามารถทำได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คุณภาพไม่ค่อยคงที่หรือสม่ำเสมอ [13] ในการแก้ปัญหาดังกล่าวผู้ประกอบการจำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้งที่เหมาะสมในการอบแห้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดีและลดการสูญเสีย เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าว เพราะจะช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นที่เหมาะสมสามารถเก็บรักษาได้นานยิ่งขึ้น [14]

จากแนวคิดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำความร้อนจากแสงอาทิตย์และรังสีอินฟราเรดมาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งกล้วยหอมทอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกล้วยหอมทอง



และสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดที่ใช้ตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้งต่างกัน หลักการที่สำคัญ คือ ถ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพียงพอจะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหลัก แต่ถ้าพลังงานจากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ระบบของอินฟราเรดก็จะทำงานเพื่อช่วยเพิ่มความร้อน นับว่าเป็นสิ่งที่จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรหรือผู้ผลิตกล้วยหอมทองอบแห้งเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มกับผลิตภัณฑ์ โดยแก้จุดอ่อนของการอบแห้งโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์

วิธีการวิจัย

1. การดำเนินการอบแห้งโดยนำกล้วยหอมทองสุกปอกเปลือก ล้างน้ำให้สะอาด แล้วหั่นตามขวางเป็นชิ้นเล็ก ๆ มีความหนา 0.5 cm อบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรดที่ใช้กระจกใสและเลนส์นูนสองหน้าเป็นตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C ควบคุมอุณหภูมิในห้องอบโดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิที่ปรับค่าได้ โดยถ้าหากอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ระบบอินฟราเรดจะทำงาน ถ้าสูงกว่าอุณหภูมิที่กำหนดระบบอินฟราเรดจะหยุดทำงาน อบครั้งละ 10 kg ความเร็วลม 8 m/s ตั้งแต่เวลา 09.00 น. จนกระทั่งความชื้นลดจาก 309.2 %db. เหลือประมาณ 6.0 %db. ทดลองอย่างละ 3 ซ้ำ ดำเนินการทดลองในระหว่างเดือนตุลาคม - ธันวาคม 2561 เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยเครื่องมือวัดต่าง ๆ ดังแสดงใน Figure 1

2. วิเคราะห์ข้อมูลโดยการหาค่าต่าง ๆ ดังนี้

2.1 หาค่าความชื้นและอัตราส่วนความชื้น โดยคำนวณจากสมการ (1) และ (2) [15]

$$MC = \left[\frac{(M_{in} + 1) W_t}{W_{in}} \right] - 1 \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (2)$$

2.2 หาอัตราการอบแห้งของกล้วยหอมทอง โดยคำนวณจากสมการ (3) [15]

$$DR = \frac{M_t - M_{t+dt}}{dt} \quad (3)$$

2.3 หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น โดยใช้สมการที่พัฒนามาจากสมการของ Fick กำหนดให้อัตราความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์แผ่นแบน กว้างและยาวไม่จำกัด ซึ่งมีรูปแบบสมการ (4) ดังนี้ [16]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{l^2}\right] \quad (4)$$

พิจารณาเฉพาะเทอมที่ 1 ของสมการ (4) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการ The Regular Regime Method เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ln(MR) กับเวลาในการอบแห้ง จะได้ค่าคงตัว 2 ค่า จากความชันของกราฟทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นได้จากสมการ (5) [17]

$$D_{eff} = -\text{slope}\left(\frac{w^2}{\pi^2}\right) \quad (5)$$

2.4 สร้างสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยใช้สมการของ Page ดังนี้ [18]

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (6)$$

2.5 หาประสิทธิภาพของการอบแห้ง โดยคำนวณจากสมการ (7) [19]

$$\eta = \frac{M_w L}{E_{dry}} \times 100 \quad (7)$$

$$E_{dry} = \dot{m} c_p (T_i - T_o) \quad (8)$$

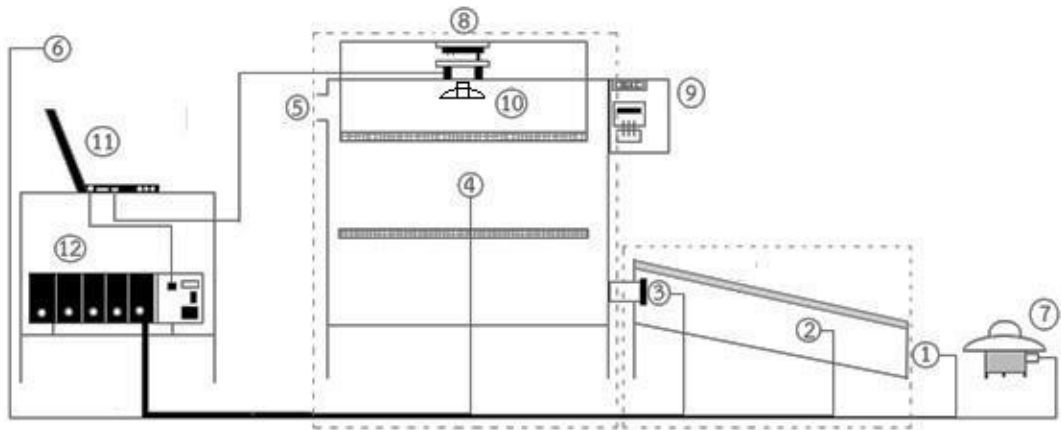


Figure 1. Dryer and measurement position (1) inlet temperature of the solar air heater (2) outlet temperature of the solar air heater (3) inlet temperature of drying chamber (4) temperature of drying chamber (5) outlet temperature of drying chamber (6) ambient temperature (7) pyranometer (8) load cell (3) electric meter and temperature controller (10) Infrared tube (11) computer (12) data logger

2.6 หาความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง โดยคำนวณจากสมการ (9) และ (10) [20]

$$SEC = \frac{E_{elec} + E_{solar}}{M_w} \quad (9)$$

$$E_{solar} = I A_c t \quad (10)$$

เมื่อ MC = ค่าความชื้น (db.)

MR = อัตราความชื้น

W_t = มวล ที่เวลาใดๆ (kg)

W_{in} = มวลเริ่มต้น (kg)

M_{in} = ความชื้นเริ่มต้น (db.)

M_{eq} = ความชื้นสมดุล (db.)

M_t = ความชื้นเวลาใดๆ (db.)

DR = อัตราการอบแห้ง

M_{t+dt} = ความชื้น ที่เวลา $t + dt$ (db.)

dt = คือ ช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น (s)

D_{eff} = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/s)

t = ระยะเวลาในการอบแห้ง (s)

w = ความกว้างของกล้วยที่อบแห้ง (m)

E_{dry} = พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง (kJ)

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

η = ประสิทธิภาพของการอบแห้ง (%)

M_w = ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย (kg)

L = ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ (kJ/kg)

T_o = อุณหภูมิออกจากตู้อบแห้ง (K)

T_i = อุณหภูมิเข้าตู้อบแห้ง (K)

c_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg.K)

E_{solar} = พลังงานแสงอาทิตย์ (kW.hr)

SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kW.hr/kg_{water})

E_{elec} = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kW.hr)



- I = ความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)
- A_c = พื้นที่ที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์ (m^2)
- χ^2 = ไคสแควร์ (Chi square)
- RMSE = Root mean Squared Error
- R^2 = Coefficient of Determination

2.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่ใช้ตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้งต่างกันโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

ผลการวิจัย

1. ในช่วงเริ่มทำการทดลอง ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าต่ำ และค่อนข้างแปรปรวน โดยการอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60 °C มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาตั้งแต่ 11.30-12.00 น. ส่วนการอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาตั้งแต่ 12.10-13.15 น. และจะค่อย ๆ ลดลงในช่วงบ่าย ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวันในกรณีอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 666.8, 687.1 และ 670.6 W/m^2 ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 2

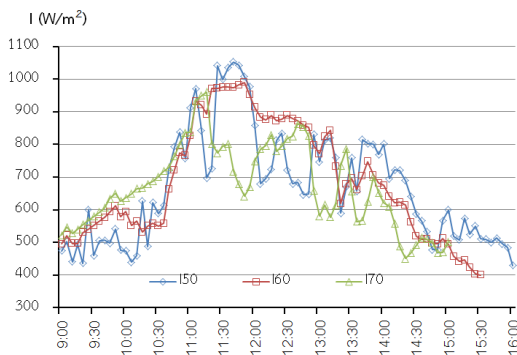


Figure 2. Solar intensity

2. จนศาสตร์การอบแห้ง

2.1 ความชื้น (MC) และอัตราส่วนความชื้น

(MR) ของกล้วยหอมทองลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 309.2 %db. และอบจนเหลือค่าความชื้นสุดท้ายที่ 6.0-9.0 %db. โดยอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ใช้เวลาน้อยกว่าอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 และ 50 °C ความชื้นและอัตราส่วนความชื้นของกล้วยหอมทองกรณีอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 70 °C ลดลงเร็วกว่าอุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 50 °C ดังแสดงใน Figure 3, 4

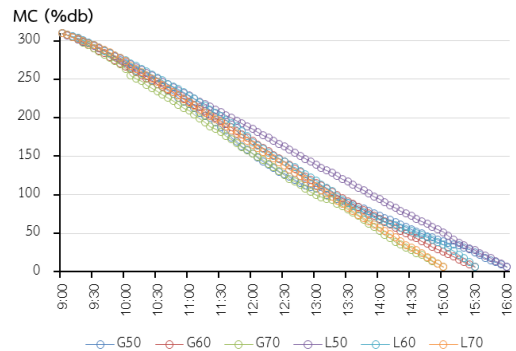


Figure 3. Moisture content of banana

(G = Glass and L = Lens)

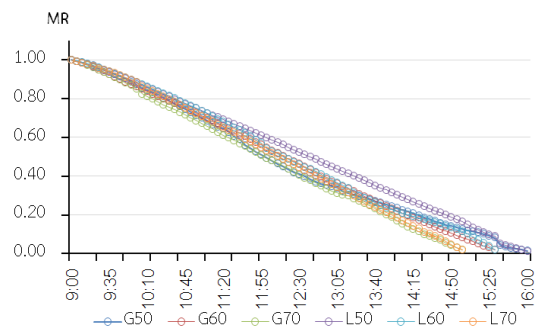


Figure 4. Moisture rate of banana

(G = Glass and L = Lens)



2.2 อัตราการอบแห้ง (DR) กล้วยหอมทองที่อบด้วยเครื่องอบแห้งที่ใช้ตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้งต่างกัน ในช่วงเริ่มต้นจะต่ำเพราะเป็นช่วงที่ผิวของกล้วยมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลา อัตราการระเหยน้ำออกน้อย ช่วงกลางวันจะเพิ่มขึ้นเป็นช่วงที่มีการระเหยน้ำออกได้อย่างรวดเร็ว และช่วงเย็นจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากน้ำมีปริมาณลดลงจึงระเหยได้ช้า ดังแสดงใน

Figure 5

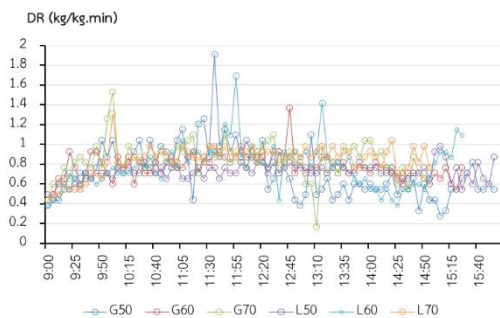


Figure 5. Drying rate of banana
(G = Glass and L = Lens)

2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น หาโดยวิธีการ The Regular Regime Method เขียนกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่าง Ln (MR) กับเวลาในการอบแห้ง ได้ดังแสดงใน Figure 6

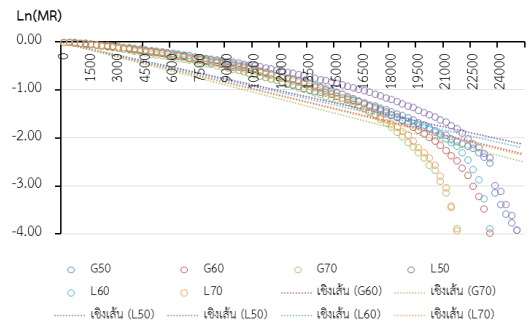


Figure 6. Changes of Ln (MR)

(G = Glass and L = Lens)

จากความชันของกราฟทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น พบว่ากรณีที่ใช้กระจกใสเป็นตัวรับรังสี อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 9.39×10^{-08} , 9.29×10^{-08} และ 9.85×10^{-08} m^2/s ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ใช้เลนส์นูนเป็นตัวรับรังสี อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 8.68×10^{-08} , 8.73×10^{-08} และ 9.62×10^{-08} m^2/s ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1

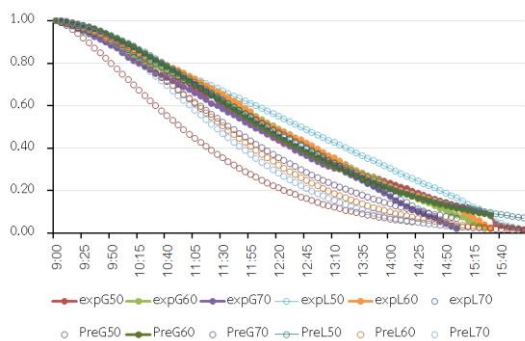
Table 1. The moisture diffusion coefficient

Collector and drying temperature	Slope	R ²	D _{eff} (m ² /s)
flat plate glass and 50 °C	-0.0371	0.8574	9.39×10^{-08}
flat plate glass and 60 °C	-0.0367	0.8518	9.29×10^{-08}
flat plate glass and 70 °C	-0.0389	0.8470	9.85×10^{-08}
convex lens and 50 °C	-0.0343	0.7844	8.68×10^{-08}
convex lens and 60 °C	-0.0345	0.8702	8.73×10^{-08}
convex lens and 70 °C	-0.038	0.8306	9.62×10^{-08}

Table 2. Drying constants and statistical relationship values of Page equations

Collector and drying temperature	k	n	R ²	χ^2	RMSE
Flat plate glass and 50 °C	0.0002	1.5839	0.996	0.0294	0.1705
Flat plate glass and 60 °C	0.0001	1.6952	0.991	0.0009	0.0298
Flat plate glass and 70 °C	0.0002	1.6145	0.99	0.0027	0.0512
Convex lens and 50 °C	0.0001	1.6869	0.986	0.0033	0.0574
Convex lens and 60 °C	0.0001	1.7629	0.996	0.0132	0.1141
Convex lens and 70 °C	0.0001	1.783	0.991	0.0151	0.1219

2.4 สมการการอบแห้งกัวยหอมทองที่อบด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด โดยใช้สมการของ Page ค่าคงตัวการอบแห้งและค่าความสัมพันธ์ทางสถิติมีค่าดังแสดงใน Table 2 และเปรียบเทียบอัตราส่วนการอบแห้ง (MR) ในกรณีที่ได้จากการทดลอง (exp) และสมการของ Page (pre) ได้ดังแสดงใน Figure 7


Figure 7. MR comparison of experiment and Page equation (G = Glass and L = Lens)

3. สมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอินฟราเรด

3.1 ประสิทธิภาพการอบแห้งกรณีใช้กระจกใสเป็นตัวรับรังสี อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 33.4, 26.7 และ 27.0% ตามลำดับ ส่วนกรณีใช้เลนส์นูน อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 27.5, 22.8 และ 27.5 % ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3 และชนิดของตัวรับรังสีกับอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการอบแห้ง ดังแสดงใน Table 4

Table 3. Efficiency of drying system

Collector and drying temperature	η (%)
Flat plate glass and 50 °C	33.4
Flat plate glass and 60 °C	26.7
Flat plate glass and 70 °C	27.0
Convex lens and 50 °C	27.5
Convex lens and 60 °C	22.8
Convex lens and 70 °C	27.5

**Table 4.** Comparison of drying efficiency

Source	SS	df	MS	F	Sig.
Temperature	95.97	2	47.984	2.04	0.17
Collector	43.09	1	43.090	1.83	0.20
Temp*coll	31.46	2	15.732	0.67	0.53
Error	282.43	12	23.536		
Total	14057.2	18			

3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกรณีใช้กระจกใสเป็นตัวรับรังสี อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 11.7, 15.4 และ 14.9 kW.hr/kg_{water} ตามลำดับ ส่วนกรณีใช้เลนส์นูนเป็นตัวรับรังสี อุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C มีค่าเท่ากับ 11.7, 14.2 และ 15.1 kW.hr/kg_{water} ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 5

Table 5. SEC of drying (kW.hr/kg_{water})

Collector and drying temperature	SEC
Flat plate glass and 50 °C	11.7
Flat plate glass and 60 °C	15.4
Flat plate glass and 70 °C	14.9
Fonvex lens and 50 °C	11.7
Convex lens and 60 °C	14.2
Fonvex lens and 70 °C	15.1

ชนิดของตัวรับรังสีกับอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ แต่เฉพาะอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังแสดงใน Table 6 โดยกรณีอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 60

และ 70 °C มีค่า SEC สูงกว่าอุณหภูมิอบแห้ง 50 °C ดังแสดงใน Table 7

Table 6. The comparison of SEC

Source	SS	df	MS	F	Sig.
Temperature	40.05	2	20.03	58.29*	.00
Collector	0.42	1	0.42	1.23	.29
Temp*coll	1.96	2	0.98	2.85	.09
Error	4.12	12	0.34		
Total	3489.9	18			

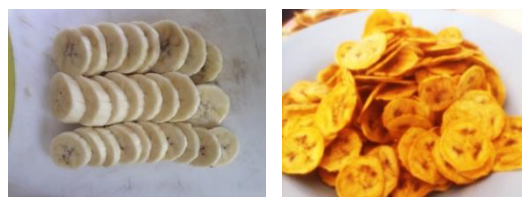
* p<.05

Table 7. The pair comparison of SEC

Drying temperature	SEC ± S.D.
50 °C	11.7 ± 0.7 ^a
60 °C	14.8 ± 0.9 ^b
70 °C	15.0 ± 0.3 ^b

Different letters indicates significant difference (P<0.05).

4. การเปรียบเทียบกล้วยหอมทองคำก่อนและหลังการอบแห้งดังแสดงใน Figure 8



Fresh banana

Dried banana

Figure 8. Fresh and dried banana



อภิปรายผล

1. ความชื้นและอัตราความชื้นจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยอบที่อุณหภูมิ 70 °C ลดลงเร็วกว่าและใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าการอบที่อุณหภูมิ 60 และ 50 °C อัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นจะมีอัตราการอบแห้งต่ำและจะเพิ่มขึ้นในช่วงกลางวันและลดลงเล็กน้อยในช่วงเย็น การที่ผลการวิจัยเป็นเช่นนี้เพราะ ในช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงที่ผิวของวัสดุมีน้ำหล่อเลี้ยงอยู่ตลอดเวลาจึงทำให้อัตราการระเหยน้ำออกน้อยเนื่องจากความต้านทานในการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุมีค่ามาก ส่วนในช่วงกลางวันจะมีความต้านทานในการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารภายนอกวัสดุน้อยจึงทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเป็นช่วงที่มีการระเหยน้ำออกได้อย่างรวดเร็ว และช่วงเย็นจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากน้ำมีปริมาณลดลงจึงระเหยได้ช้า [19] สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าระหว่าง 8.68×10^{-08} - 9.85×10^{-08} m²/s และสมการการอบแห้งของ Page สามารถพยากรณ์การอบแห้งกัวยหอมทองได้ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Esper และ Muhlbaue [20], Bala และคณะ [21], Akpinar [22], Lahsasni และคณะ [23] และ Doymaz [24] การที่ผลเป็นเช่นนี้เพราะว่า ในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความชื้นลดลงค่อนข้างเร็ว เนื่องจากที่ผิวของกัวยหอมทองยังมีความชื้นอยู่ค่อนข้างมาก ซึมไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกนำออกจากผิวกัวยหอมทองด้วยความร้อนที่ทำให้ น้ำระเหยออก เกิดการถ่ายโอนความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนไปยังผิวผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจะหว่างที่ผิวผลิตภัณฑ์และของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้นเป็นผลให้การถ่ายโอนความร้อนและมวลดี จึงทำให้ในช่วงแรกของการอบแห้งที่ความชื้นลดลง

ค่อนข้างเร็ว และในช่วงที่ 2 อัตราการอบแห้งช้าลง เพราะการถ่ายโอนความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวของผลิตภัณฑ์เท่านั้นแต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อผลิตภัณฑ์ด้วย คือความชื้นในกัวยหอมทองเหลืออยู่น้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าของกัวยหอมทองอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของกัวยหอมทองเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิจึงผิวของกัวยหอมทองสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงค่าความชื้นสมดุล ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด หรือเป็นความเข้มข้นของความชื้นและความดันไอระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์ที่มีความแตกต่างกันน้อยลงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารน้อยลงจึงมีการเปลี่ยนแปลงของความชื้นลดลงเช่นกัน [25] สามารถอธิบายได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อเวลาการอบแห้ง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง ในการนำกัวยหอมทองอบแห้งไปใช้แปรรูปเป็นกัวยหอมทองอบแห้งนั้น ต้องอบให้กัวยหอมทองมีความชื้นสุดท้ายไม่เกิน 6 %db. [26] ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้พบว่าความชื้นสุดท้ายในการอบแห้งครั้งนี้ยังมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานเล็กน้อย (6.0-9.0 %db.) เนื่องจากการอบแห้งนั้นมีตัวให้พลังงานในการอบอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้แดดจะไม่เพียงพอ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งนอกจากสภาพธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ ยังมีอีกหลายปัจจัย ซึ่งได้แก่ 1) อุณหภูมิ โดยในวันที่ทำการอบแห้งนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าไม่สูงมากและค่อนข้างจะแปรปรวนตลอดทั้งวันเนื่องจากความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำเพราะเป็นฤดูหนาว ทำให้อุณหภูมียังไม่เพียงพอต่อการอบแห้ง 2) ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขณะอบแห้งนั้นมีค่าสูง จะมีผลทำให้การเคลื่อนที่ของน้ำและการระเหยของไอน้ำออกจากชิ้นผลิตภัณฑ์มาสู่



อากาศโดยรอบนั้นเป็นไปได้ยากขึ้น เนื่องจากอากาศภายนอกนั้นมีปริมาณน้ำสูงอยู่แล้ว โดยในวันที่ทำการอบอบแห้งนั้น สภาพอากาศไม่เอื้อต่อการอบแห้งมากนักเพราะอากาศมีความชื้นสูง (เดือนตุลาคม-ธันวาคม) และ 3) ในการอบแห้งครั้งนี้ใช้ความเร็วลม 8 m/s ทำให้อากาศที่ถ่ายเทสะดวก ช่วยให้น้ำและไอน้ำเคลื่อนที่ไปที่ผิวผลิตภัณฑ์และระเหยออกจากผิวอาหารได้รวดเร็วขึ้น ถ้าเพิ่มความเร็วมให้สูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น แต่อาจจะมีผลต่อผิวของผลิตภัณฑ์ [27]

2. ประสิทธิภาพการอบแห้งกรณีใช้ตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้งต่างกันมีค่าไม่ต่างกัน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของการอบแห้งนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีของแสงอาทิตย์ที่ได้รับและการสะสมความร้อนของเครื่องอบอากาศ สอดคล้องกับงานวิจัยของภูมิใจ สะอาดใจม [28] และพีรพัฒน์ คงภูผา และคณะ [29] การที่ผลการศึกษาเป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากประสิทธิภาพเครื่องอบแห้งจะขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ผลต่างของอุณหภูมิอากาศและเข้าของเครื่องอบอากาศ ความจุความร้อนของอากาศ และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งครั้งนี้จึงไม่ต่างกัน นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังพบว่าชนิดของตัวรับรังสีกับอุณหภูมิอบแห้งไม่มีผลต่อความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ แต่เฉพาะอุณหภูมิอบแห้งเท่านั้นที่มีผลต่อความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ โดยอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70 °C มีค่าสูงกว่า 50 °C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอำไพศักดิ์ ทีบุญมา และคณะ [30] การที่ผลการศึกษามีลักษณะเช่นนี้เพราะว่าการอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C ปริมาณพลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์มีปริมาณเพียงพอ จึงทำให้ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย แต่ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70

°C ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำให้อินฟราเรดทำงานมากไปด้วย จึงทำให้ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะในการอบที่อุณหภูมิอบแห้งสูงมีค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะของการอบแห้งมากกว่าการอบที่อุณหภูมิลดต่ำ

สรุปผลการวิจัย

ค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ทั้งวันมีค่าอยู่ระหว่าง 666.8-687.1 W/m² ความชื้นและอัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยอบที่อุณหภูมิลดต่ำลงเร็วกว่าและใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่าอุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 50 °C อัตราการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นจะมีอัตราการอบแห้งต่ำ เพิ่มขึ้นในช่วงกลางวันและลดลงเล็กน้อยในช่วงเย็น สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 8.68 X 10⁻⁰⁸-9.85 X 10⁻⁰⁸ m²/s และสมการการอบแห้งของ Page สามารถพยากรณ์การอบแห้งกล้วยได้ ชนิดของตัวรับรังสีและอุณหภูมิอบแห้งต่างกันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งและความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะ ยกเว้นอุณหภูมิอบแห้งเท่านั้นที่มีผลต่อความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะโดยอบที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70 °C มีค่าสูงกว่า 50 °C

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏจตุรธานี



เอกสารอ้างอิง

1. Perera, C, O. and Rahman, M, S. 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. *Trends in Food Science and Technology*. 8: 75-79.
2. Rossi S, J., Neues I, C. and Kicokbusch, T, G. 1992. Thermodynamics and energetic evaluation of a heat pump applied to drying of vegetables. *Drying*. 92: 1475-1483.
3. Sharma, G, P. and Prasad, S. 2001. Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, 50: 99-105.
4. Chu, K, J. and Chou, S, K. 2003. Low cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*. 14: 519-528.
5. Isengard, H, D. 1995. Rapid water determination in foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*. 6(5): 155-162.
6. Sakai, N. and Hanzawa, T. 1994. Applications and advances in far infrared heating in Japan. *Trends in Food Science & Technology*. 5: 357-362.
7. Glouannec, P., Lecharpentier, D., and Noel, H. 2002. Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Applied Thermal Engineering*. 22: 1689-1703.
8. Afzal, T, M. and Abe, T. 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*. 37: 353-365.
9. Fasina, O, O., Tyley, R, T. and Pickard, M, D. 1998. Modeling the infrared radiative heating of agricultural crops. *Drying Technology An International Journal*. 16(9): 2065-2082.
10. Hashimoto, A. and Kameoka, T. 1999. Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials. *Drying Technology An International Journal*, 17: 1613-1626.
11. Sheridan, P. and Shilton, N. 1999. Application of for infrared radiation to cooking of meat Products. *Journal of Food Engineering*. 41: 203-208.
12. Afzal, T, M. and Abe, T. 2000. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. *Computers and Electronics in Agriculture*. 26: 137-145.
13. Condori, M., Echazu, R. and Saravia, M. 2001. Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse dryer. *Renewable Energy*. 22: 447-460.
14. ถาวร อัญทรัพย์ ธีรัฐพล ภูมิสะอาด และ เจริญพร เลิศสถิตธนกร. 2551. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ ชนิดที่มีวัสดุสะสมความร้อนร่วมกับชุดดูดความชื้นสำหรับการอบแห้งผักแต่ใหม่. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*. 32(4): 489-493.
15. Celma, A, R., Rojas, S., Lopez, F., Montero, I. and Miranda, T. 2007. Thin layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. *Journal of Food Engineering*. 80: 1261-1271.



16. Crank, J. 2001. *The mathematics of diffusion*. Oxford, Oxford University Press.
17. Karathanos, V.T., Villalobos, G. and Saravacos, G.D. 1990. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. *Journal of Food Science*. 55(1): 218-231.
18. Basunia, M, A. and T. Abe. 2005. Adsorption isotherms of barley at low and high temperatures. *Journal of Food Engineering*. 66: 129-136.
19. สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา. 2555. การอบแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป.
20. Esper, A. and Muhlbauer, W. 1996. Solar tunnel drying of fruit. *Plant Reseach and Development*. 44: 61-80.
21. Bala, B, K., Mondol., M, R, A. Biswas, B, K. and Das Chowdury, B, L. 2003. Solar Drying of pineapple using solar tunnel dryer. *Renewable Energy*. 28(2): 183-190.
22. Akpınar, E, K. 2004. Energy and exergy analyses of drying of red pepper slices in a convective type dryer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 31(8): 1165-1176.
23. Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idliman, A. and Jamali, A. 2004. Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear pee (*Opuntia ficus indica*). *Energy*. 29(2): 211-224.
24. Doymaz, I. 2007. The kinetics of forced convective air drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*. 79: 243-248.
25. สมชาติ ไสภณรณฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
26. สุภวรรณ ฐิระวณิชย์กุล จุฑารัตน์ ทะสระระ จุไรรัตน์ สุริยงค์ ปิยาภรณ์ ปานกำเนิด และยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล. 2556. การอบแห้งใบเตยและตะไคร้เพื่อผลิตเป็นชาขงสมุนไพรด้วยแหล่งพลังงานความร้อนหลายรูปแบบ. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติครั้งที่ 4 ประจำปี 2556. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
27. วิไล รังสาดทอง. 2547. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ.
28. ภูมิใจ สอาดโคม. 2557. การอบแห้งถ่านอัดแท่งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 9 ประจำปี 2557. วันที่ 16 ธันวาคม 2557. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
29. พีรพัฒน์ คงภูผา อุดมศักดิ์ ตาเป็ย และภูมิใจ สอาดโคม. 2559. ผลของระดับอุณหภูมิในการอบแห้งถ่านอัดแท่งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์”. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร*. 10(1): 77-93.
30. อ่ำไพศักดิ์ ที่บุญมา ธนภัทร สุวรรณภูมิ และสมชาติ ไสภณรณฤทธิ. 2549. การอบแห้งเนื้อด้วยรังสีอินฟราเรด. *KKU Engineering Journal*. 34(2): 189-201.