

ความสัมพันธ์พลังงานในการอบแห้งซึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องทำความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง

Energy Consumption of Ginger Drying using a Heat Pump Dryer with Auxiliary Heater at High Temperature

คณินนิตย์ จัปใจเหมาะ,¹ ณัฐพล ภูมิสะอาด,² ละมุล วิเศษ,³

Khanuengnit Chapchaimoh,¹ Nattapol Poomsa-ad,² Lamul Wiset³

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์พลังงานในการอบแห้งซึ่งด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องทำความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง โดยทำการอบแห้งซึ่งสด 1000 g ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 567 %db ให้มีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 2 %db ทั้งนี้ทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ทางเข้าห้องอบแห้ง 3 ค่า คือ 50, 60 และ 70 °C เพื่อศึกษาความสัมพันธ์พลังงานในการอบแห้ง พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70 °C ทำให้ค่าความชื้นของซึ่งลดลงได้รวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C มีความสัมพันธ์พลังงานต่ำที่สุดโดยมีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงที่สุดคือ 0.329 kg water/kW·h

คำสำคัญ: พลังงานที่ต้องการ กำลังงานที่ต้องการ เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน เครื่องทำความร้อน

Abstract

This research paper aims to investigate the energy consumption of a heat pump dryer with auxiliary heater for ginger drying at high temperature. Fresh ginger of 1000 g weight was dried from approximately 567 down to 2 % dry basis. The inlet air drying temperatures at the drying chamber of 50, 60, and 70 °C were varied to observe the energy consumed in drying. The results showed that the inlet air temperatures of 60 and 70 °C affected the moisture content of the ginger by promoting rapid reduction. It also illustrated that the inlet air drying temperatures at the drying chamber of 50 °C needed the least energy consumption with the highest specific moisture extraction rate of 0.329 kg water/kW·h.

Keywords: Energy requirement, Power requirement, Heat pump dryer, Heater

บทนำ

การอบแห้งเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลควบคู่กัน วัสดุทางการเกษตรหลายชนิดจำเป็นต้องผ่านการทำให้แห้งซึ่งจะทำให้เกิดผลดีหลายอย่าง เช่น ยืดอายุการเก็บรักษา ง่ายต่อการขนส่ง และสามารถมีผลิตภัณฑ์บริโภคนอกฤดูกาลได้ การอบแห้งมีหลายประเภท ได้แก่ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน การอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งที่มีข้อดี

เนื่องจากการผสมของอากาศจากเครื่องทำระเหย (Evaporator) และอากาศผ่าน (Bypass air) อากาศอบแห้งถูกลดความชื้นและถูกทำให้ร้อนเพื่อให้เป็นสภาวะอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องอบแห้ง

การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนนั้นโดยทั่วไปใช้อุณหภูมิอบแห้งในช่วง 10-65 °C¹ เช่น ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C ในการอบแห้งแมคคาเดียได้โดยไม่ทำให้เกิดสีน้ำตาล(Browning)² อย่างไรก็ตามการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิอบแห้งต่ำแม้เป็น

¹ นิสิตปริญญาเอก, ² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ³ อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Doctoral's degree student, ² Assist. Prof., ³ Lecturer, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kamraing Sub-District, Kantarawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

Corresponding author; knnit@hotmail.com

ข้อดีในการอบแห้งอาหาร แต่ก็อาจทำให้อัตราการอบแห้งต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้³ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงสามารถการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนใช้อุณหภูมิในช่วง -20 -100 °C ทั้งนี้การทำให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงนี้สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทำความร้อนร่วมด้วย (auxiliary heating)¹

ปั๊มความร้อนที่มีสารทำความเย็น R-22 สามารถทำอุณหภูมิอากาศอบแห้งได้ไม่เกิน 55 °C เช่น การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งผลไม้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 45-55 °C⁴ นอกจากนี้ยังมีรายงานการอบแห้งไม้แผ่นด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิอบแห้ง 40 °C⁵ ส่วนการศึกษาการอบแห้งขิงด้วยปั๊มความร้อนมักใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 35, 45 และ 55 °C² ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งโดยใช้เครื่องทำความร้อน(Heater) ร่วมกับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนจึงน่าจะส่งผลให้เกิดอัตราการอบแห้งสูงโดยมีสัดส่วนการใช้พลังงานไม่สูงนัก

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งขิงด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องทำความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้ใช้เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิดที่มีห้องอบแห้งขนาด 0.5 m x 0.5 m x 1.0 m และอัตราเร็วอากาศ 0.4 m/s ในการอบแห้งขิง แผนผังของเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิดแสดงดัง Figure 1

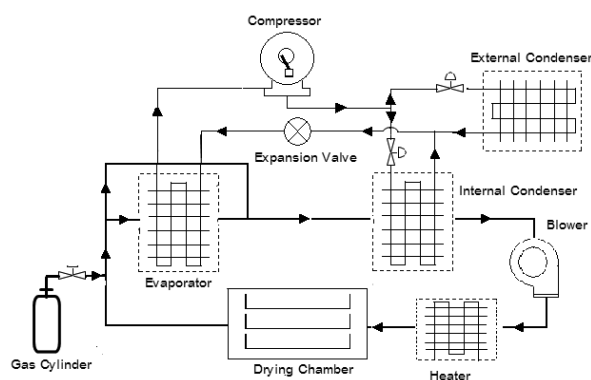


Figure 1 Schematic diagram of closed system heat pump dryer with auxiliary heater

นำขิงสด 1000 g มาทำการอบแห้งสดจากความชื้นประมาณ 567 ให้เหลือ 2 %db โดยทำการหาค่าความชื้น

เริ่มต้นของขิงด้วยวิธี Oven method ที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h ทำการบันทึกเวลาและน้ำหนักของขิงทุก 5 min เป็นเวลา 120 min หลังจากนั้นจึงบันทึกข้อมูลดังกล่าวนี้ทุก 10 min จนกระทั่งถึงค่าความชื้นดังกล่าวข้างต้น ทำการวัดอุณหภูมิอากาศทั้งที่ทางเข้าและทางออกของเครื่องควบแน่นตัวใน(Internal condenser) และเครื่องทำความร้อน ทดสอบโดยแปรค่าอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ คำนวณค่าความชื้น อัตราการอบแห้ง ความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวใน ความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อน กำลังงานรวมที่ต้องการ พลังงานรวมที่ต้องการ อัตราส่วนพลังงาน และอัตราการระเหย น้ำจำเพาะสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

ความชื้น

$$\%db = [(M_w - M_d) / M_d] \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ M_w คือ มวลของวัสดุ, kg

M_d คือ มวลของวัสดุแห้ง, kg

อัตราการอบแห้ง

$$\text{Drying rate} = (m_{t-dt} - m_t) / dt \quad (2)$$

เมื่อ m_{t-dt} คือ มวลของวัสดุที่เวลา t-dt, kg

m_t คือ มวลของวัสดุที่เวลา t, kg

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH)

$$RH = (W' / W_s) \times 100, \% \quad (3)$$

เมื่อ W' คือ อัตราส่วนผสมจริงของอากาศ (Actual mixing ratio of the air)

$$W' = \{ [C_p (T - T_{wb})] - [L_v (E_{swb} / P_{atm})] \} / \{ [(-C_{pv}) (T - T_{wb})] - L_v \} \quad (4)$$

เมื่อ C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้งที่ความดันคงที่ (= 1.005 J/g)

T คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, °C

T_{wb} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C

L_v คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

(= 2500 J/g)

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล

(= 1013 mbar)

C_{pv} คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำที่ความดันคงที่

(= 4.186 J/g)

$$E_{swb} = 6.11 \times 10^{(7.5 T_{wb} / (237.7 + T_{wb}))} \quad (5)$$

เมื่อ E_{swb} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, mbar

$$W_s = P_s / P_{atm} \quad (6)$$

$$P_s = 6.11 \times 10^{(7.5 T / (237.7 + T))} \quad (7)$$

เมื่อ P_s คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, mbar

อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio, kg water/kg dry air)

$$W_1 = 0.62189(RH/100)P_{vs} / (P - RH \cdot P_{vs}) \quad (8)$$

$$P_{vs} = P_s / 10, \text{ kPa} \quad (9)$$

$$P = P_{atm} / 10, \text{ kPa} \quad (10)$$

ค่าความจุความร้อน

ความจุความร้อนของอากาศแห้ง (Specific heat of air, kJ/kg·K)

$$C_{pa} = 0.287\{3.653 + [(-1.337)T/10^3] + [(3.294/10^6)T^2] + [(-1.913/10^9)T^3] + [(0.2763/10^{12})T^4]\} \quad (11)$$

ความจุความร้อนของไอน้ำในอากาศ (Specific heat of vapor, kJ/kg·K)

$$C_{pv} = 0.4615\{4.070 + [(-1.108)T/10^3] + [(4.152/10^6)T^2] + [(-2.964/10^9)T^3] + [(0.807/10^{12})T^4]\} \quad (12)$$

ความจุความร้อนของอากาศอบแห้ง (Specific heat of drying air, kJ/kg·K)

$$C_p = C_{pa} + (W_1 C_{pv}) \quad (13)$$

ความร้อน (Heat, kW)

$$\text{Power} = mC_p(T_{in} - T_{out}) \quad (14)$$

อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ (SMER, kg water/kW·h)

$$\text{SMER} = \text{Water Evaporated} / \text{Total Power} \quad (15)$$

ผลและวิจารณ์

ความชื้น

หลังจากการอบแห้งซึ่งสดด้วยเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิด ทำการคำนวณค่าความชื้นของซิงจากสมการ (1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นและเวลาแสดงดัง Figure 2

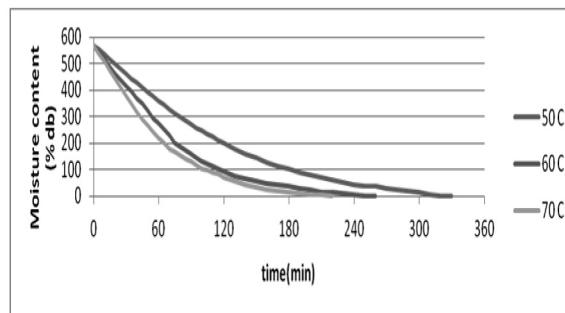


Figure 2 The relationship of the moisture content and time of ginger drying under various temperatures

อุณหภูมิอากาศอบแห้งคือ 50 °C ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุดคือ 330 min ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70 °C ใช้เวลา 260 และ 220 min ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงสามารถถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70 °C มีแนวโน้มของเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งคล้ายกัน⁶ ซึ่งทำการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิของไทยด้วยอากาศร้อนโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

อัตราการอบแห้ง

การอบแห้งซึ่งด้วยเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิด ทำการคำนวณค่าอัตราการอบแห้งของซิงจากสมการ (2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการอบแห้งและเวลาแสดงดัง Figure 3

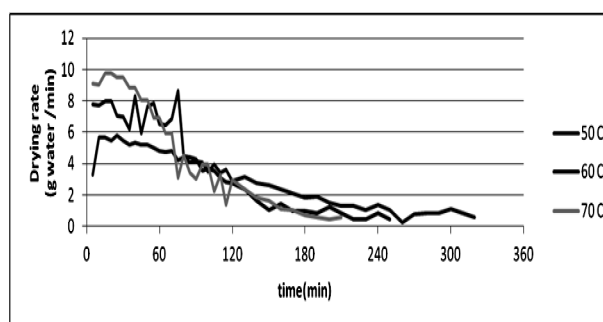


Figure 3 The relationship of the drying rate and time of ginger drying under various temperatures

ทุกอุณหภูมิอากาศอบแห้งมีผลทำให้ได้ค่าอัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงของการอบแห้ง โดยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50, 60 และ 70 °C ให้ค่าอัตราการอบแห้งประมาณ 5.12, 7.32 และ 8.30 g water/min ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate period) มีการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้น⁷ ต่อจากนั้นอัตราการอบแห้งซึ่งมีค่าลดลงในทุก

อุณหภูมิอากาศอบแห้งเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในห้องในช่วอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period)⁷

กำลังงานรวมที่ต้องการ

กำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการสำหรับการอบแห้งซึ่งโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิดประกอบด้วยความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวใน ความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อน กำลังไฟฟ้าของพัดลมและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศ (Compressor) แต่เนื่องจากในแต่ละการทดลองมีกำลังไฟฟ้าของพัดลมและกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดอากาศคงที่ 0.362 และ 1.115 kW ตามลำดับ ดังนั้นกำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการจึงขึ้นอยู่กับความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในและความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อน โดยคำนวณค่ากำลังงานจากสมการ (3) – (14) ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในและเครื่องทำความร้อน และกำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการและเวลาแสดงดัง Figure 4

ความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในอยู่ในช่วง 1.183 และ 0.569 kW โดยความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70°C มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 1.953-2.843 และ 1.444-2.851 kW ตามลำดับ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C ทำให้มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในมีค่าน้อยที่สุดคือประมาณ 0.732 kW นอกจากนี้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70°C ทำให้มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในประมาณ 2.389 และ 2.377 kW ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างทางเข้าและทางออกของคอนเดนเซอร์ตัวใน ซึ่งอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C มีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างทางเข้าและทางออกของคอนเดนเซอร์ตัวในน้อยที่สุดคือ 6.7°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70°C มีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างทางเข้าและทางออกของคอนเดนเซอร์ตัวในใกล้เคียงกันคือ 21.8 และ 21.7°C ตามลำดับ

ส่วนค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อนมีค่าเริ่มต้น 0.645 kW และคงที่ประมาณ 0.5 kW โดยการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ทำให้มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อนมีค่าเริ่มต้น 1.134 kW ส่วนที่ 30 และ 40 min มีค่า 1.036 และ 0.087 kW ตามลำดับ แล้วจึงเพิ่มขึ้นเป็น 1.134 kW ที่ 100 min หลังจากนั้นจึงคงที่ประมาณ 1 kW ตลอดการทดสอบ ในทำนองเดียวกันอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C ทำให้มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อนมีค่าเริ่มต้น 1.634 kW หลังจากนั้นจึงลดลงจาก 1.797

kW ที่ 10 min เป็น 0.773 kW ที่ 20 min หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นเป็น 1.590 kW ที่ 40 min ต่อจากนั้นจึงเปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ 1.5 kW ตลอดการทดสอบ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C ทำให้มีค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อนมีค่าต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเฉลี่ย 0.480 kW เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องทำความร้อนซึ่งมีค่า 4.4°C รองลงมาคืออุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70°C ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 0.915 และ 1.477 kW ตามลำดับ ที่มีการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของอุณหภูมิมระหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องทำความร้อนซึ่งมีค่า 8.4 และ 13.6°C ตามลำดับ

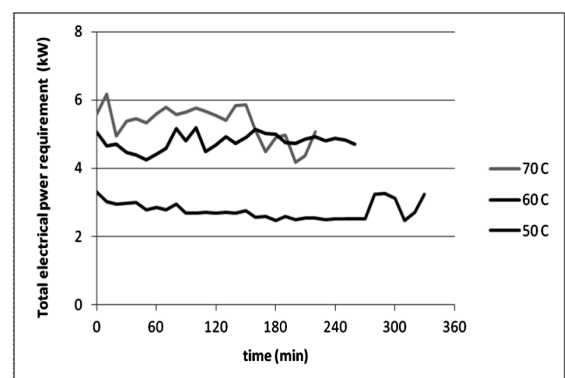
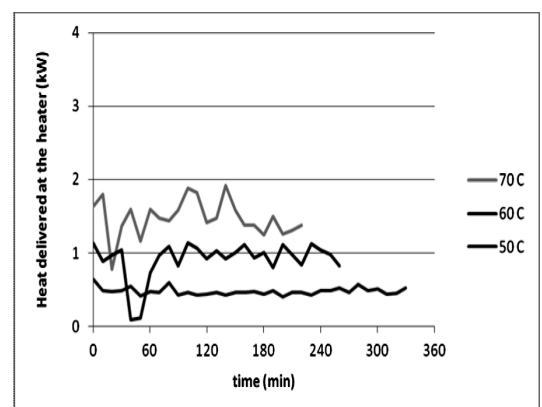
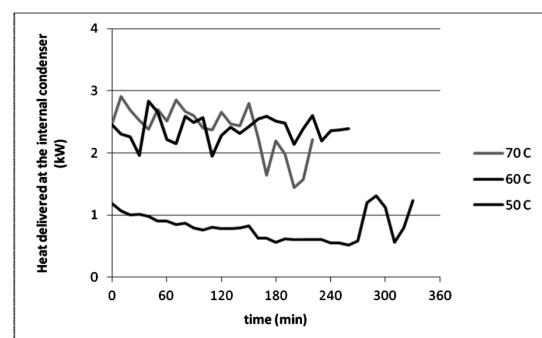


Figure 4 The relationship of power delivery from the internal condenser and the heater and the total power requirement and elapsed time of ginger drying under various temperatures

ดังนั้นเมื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการการอบแห้งซึ่งด้วยเครื่องอบแห้งด้วยปั้มความร้อนแบบระบบปิด จึงพบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C มีค่ากำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการน้อยที่สุดคือประมาณ 2.689 kW ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70°C มีค่ากำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการประมาณ 4.780 และ 5.331 kW ตามลำดับ

พลังงานที่ต้องการ และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

พลังงานที่ต้องการสำหรับการอบแห้งซึ่งโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยปั้มความร้อนแบบระบบปิดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการและเวลา พบว่าการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำทำให้พลังงานที่ต้องการสำหรับเครื่องทำความร้อนต่ำ โดยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C ต้องการพลังงานสำหรับเครื่องทำความร้อนต่ำที่สุดคือ 2.583 kW·h

นิยามอัตราส่วนพลังงานว่าเป็นสัดส่วนของพลังงานที่ต้องการสำหรับเครื่องทำความร้อนต่อพลังงานรวมที่ต้องการ พบว่าแม้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C จะต้องการพลังงานสำหรับเครื่องทำความร้อนสูงที่สุดคือ 20.296 kW·h แต่ร้อยละของอัตราส่วนพลังงานก็มีค่าใกล้เคียงกับการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C ซึ่งเป็นร้อยละของอัตราส่วนพลังงานที่ต่ำที่สุดคือ 17.79 %

นอกจากนี้เมื่อทำการคำนวณค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะจากสมการ (16) พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C ทำให้มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงที่สุดคือ 0.329 kg water/kW·h ทั้งนี้อุณหภูมิอากาศอบแห้งยิ่งต่ำก็ยิ่งทำให้มีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูง ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาการอบแห้งปลา^๑ ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าพลังงานรวมที่ต้องการต่ำสุดดังกล่าว พลังงานที่ต้องการและอัตราการระเหยน้ำจำเพาะในการอบแห้งซึ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดัง Table 1

Table 1 The energy requirement and energy ratio of ginger drying under various temperatures

inlet air temperature (°C)	energy requirement of the heater (kW·h)	total energy requirement (kW·h)	energy ratio (%)	SMER (kg water/kW·h)
50	2.583	14.522	17.79	0.329
60	3.870	20.296	19.07	0.058
70	5.301	19.184	27.63	0.048

สรุป

ประสิทธิภาพการอบแห้งและค่าพลังงานที่ต้องการของเครื่องอบแห้งแบบปั้มความร้อนเพื่ออบแห้งซึ่ง โดยทำการอบแห้งซึ่งสดจากความชื้นประมาณ 567 เป็น 2 %db ด้วยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50, 60 และ 70°C สามารถสรุปได้ดังนี้ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70°C ทำให้ค่าความชื้นของซึ่งลดลงได้รวดเร็ว โดยใช้เวลา 260 และ 220 min ตามลำดับ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50, 60 และ 70°C ให้ค่าอัตราการอบแห้งประมาณ 5.12, 7.32 และ 8.30 g water/min ตามลำดับ ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ต่อจากนั้นอัตราการอบแห้งซึ่งมีค่าลดลงในทุกอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C มีค่าพลังงานที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในต่ำที่สุดประมาณ 0.732 kW และมีค่ากำลังงานที่ถ่ายเทจากเครื่องทำความร้อนต่ำที่สุดเฉลี่ย 0.480 kW ทำให้มีค่ากำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการต่ำที่สุดประมาณ 2.689 kW จึงมีค่าพลังงานที่ต้องการสำหรับเครื่องทำความร้อนต่ำที่สุดคือ 2.583 kW·h โดยมีค่าร้อยละของอัตราส่วนพลังงานต่ำที่สุดคือ 17.79 % และมีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงที่สุดคือ 0.329 kg water/kW·h

คำขอบคุณ

ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Chua KJ, Chou SK, Yang WM. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy* 2010;87:3611-24.
- Colak N, Hepbasli A. A review of heat pump drying: Part 1-Systems, models and studies. *Energy Conversion and Management* 2009;50:2180-6.
- Perera CO, Rahman MS. Heat pump dehumidifier drying of food. *Trends in Food Science & Technology* 1997; 8:75-9.
- Teeboonma U, Tiansuwan J, Soponronnarit, S. Optimization of heat pump fruit dryers. *Journal of Food Engineering* 2003; 59:369-77.
- Ceylan I, Aktas M, Dogan H. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. *Applied Thermal Engineering* 2007; 27:216-22.

6. Doungporn S., Poomsa-ad. N, Wiset L. Drying equations of Thai Hom Mali paddy by using hot air, carbon dioxide and nitrogen gases as drying media. *Food Bioproducts Processing* 2012; 90:187-98.
7. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ:สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2540.
8. Shi QL, Xu, CH, Zhao Y, Li ZJ, Wang XY. Optimization of processing parameters of Horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 2008; 87:74-81.