

ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งขิงด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องทำความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง

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

คนึงนิตย์ 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

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งขิงด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับเครื่องทำความร้อนโดยใช้อุณหภูมิสูง โดยทำการอบแห้งขิงสด 1000 g ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 567 %db ให้มีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 2 %db ทั้งนี้ทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่ทางเข้าห้องอบแห้ง 3 ค่า คือ 50, 60 และ 70 °C เพื่อศึกษาความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้ง พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70 °C ทำให้ค่าความชื้นของขิงลดลงได้รวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50 °C มีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำที่สุดโดยมีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงที่สุดคือ 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 ย่อยต่อการขนส่ง และสามารถมีผลิตภัณฑ์บริโภคนอกฤดูกาลได้ การอบแห้งมีหลายประเภท ได้แก่ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน การอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ปั๊มความร้อนเป็นการอบแห้งที่มีข้อดี

เนื่องจากการผสมของอากาศจากเครื่องทำระเหย (Evaporator) และอากาศผ่าน (Bypass air) อากาศอบแห้งถูกลดความชื้นและถูกทำให้ร้อนเพื่อให้เป็นสภาวะอากาศที่เหมาะสมสำหรับห้องอบแห้ง

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

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 ทั้งนี้การใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงนี้สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทำความร้อนร่วมด้วย (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

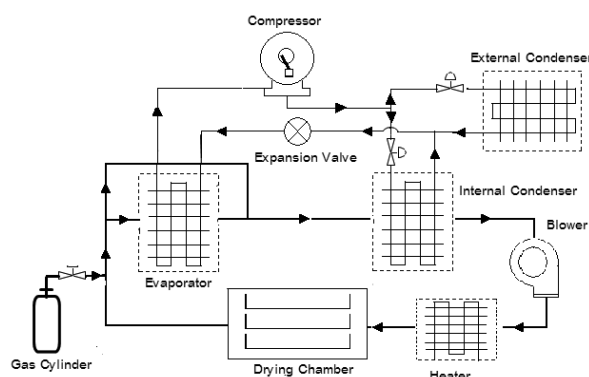


Figure 1 Schematic diagram of closed system heat pump dryer with auxiliary heater

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

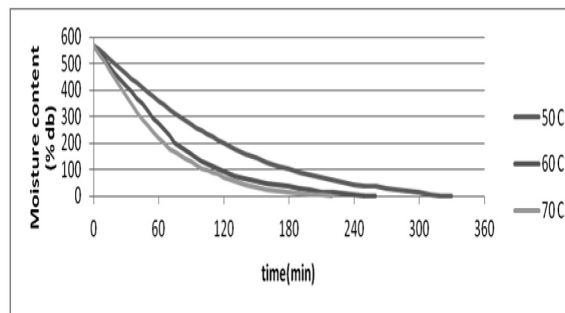


Figure 2 The relationship of the moisture content and time of ginger drying under various temperatures

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

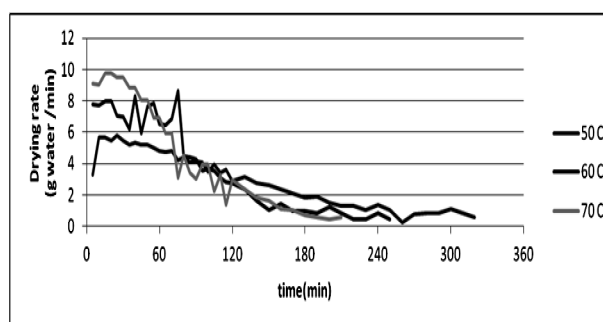


Figure 3 The relationship of the drying rate and time of ginger drying under various temperatures

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

อุณหภูมิอากาศอบแห้งเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความชื้นภายในห้องในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (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 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 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของอุณหภูมิมะหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องทำความร้อนซึ่งมีค่า 4.4 °C รองลงมาคืออุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60 และ 70 °C ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 0.915 และ 1.477 kW ตามลำดับ ที่มีการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างของอุณหภูมิมะหว่างทางเข้าและทางออกของเครื่องทำความร้อนซึ่งมีค่า 8.4 และ 13.6 °C ตามลำดับ

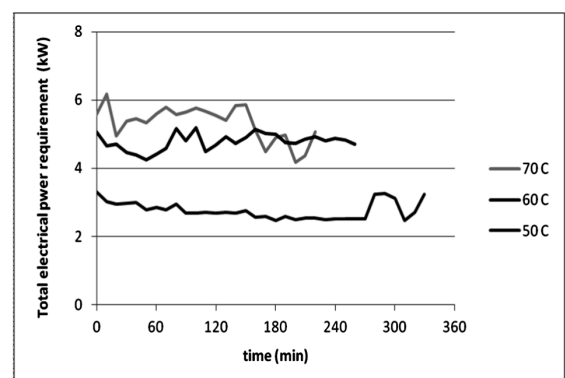
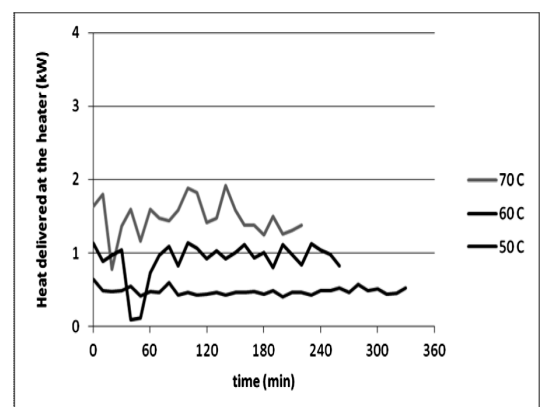
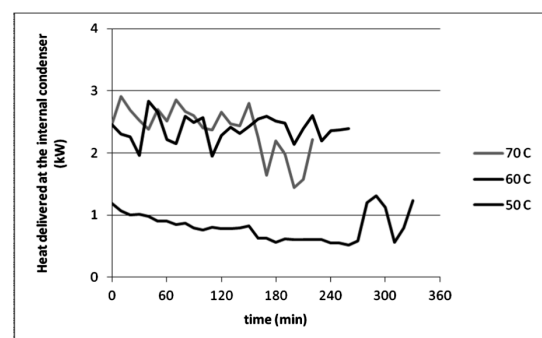


Figure 4 The relationship of power delivery from the internal condenser and the heater and the total power requirement and elapsed time of ginger drying under various temperatures

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

พลังงานที่ต้องการ และอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

พลังงานที่ต้องการสำหรับการอบแห้งซึ่งโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิดสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการและเวลา พบว่าการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ำทำให้พลังงานที่ต้องการสำหรับเครื่องทำความร้อนต่ำ โดยอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 50°C ต้องการพลังงานสำหรับเครื่องทำความร้อนต่ำที่สุดคือ 2.583 kW·h

นิยามอัตราส่วนพลังงานว่าเป็นสัดส่วนของพลังงานที่ต้องการสำหรับเครื่องทำความร้อนต่อพลังงานรวมที่ต้องการ พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้ง 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

ประสิทธิภาพการอบแห้งและค่าพลังงานที่ต้องการของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเพื่ออบแห้งซึ่ง 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 มีค่ากำลังงานที่ถ่ายเทจากคอนเดนเซอร์ตัวในต่ำที่สุดประมาณ 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.