Kasetsart J. (Nat. Sci.) 33 : 146 - 158 (1999) ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย.) ปีที่ 33 : 146 - 158 (2542)

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อน

Development of a Mathematical Model for Heat Pump Fruit Drying

วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และ ธนิต สวัสดิ์เสวี

Waraporn Rattanongpisat, Somchart Soponronnarit, and Thanit Swasdisevi

ABSTRACT

A mathematical model for papaya glace′ drying using heat pump has been developed. It comprises of drying rate equation, mass and energy balance equations, thermo-physical property of papaya glace′ equations and heat exchanger equations. Successive substitution method was used for finding the solution. It was found that the model was fairly accurate for predicting final moisture content, air temperature at various parts in the system and temperature of refrigerant especially at low moisture level of papaya glace′.

The mathematical model was then used to find out strategy for drying papaya glace′ with a specific air flow rate of 29.8 kg/h-kg dry papaya glace′. Simulated results showed that drying time and energy consumption was decreased when the drying air temperature was increased. In addition, the appropriate by-pass air ratio was in the range of 86-90 %.

Key words : drying, mathematical model, fruit, heat pump

บทคัดย่อ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยสมการที่ใช้ในแบบจำลองคือ สมการอัตราการอบแห้ง สมการสมดุลมวลและพลังงาน สมการคุณสมบัติทางกายภาพของมะละกอแช่อิ่ม และสมการการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีการคำนวณแบบการแทนค่าอย่างต่อเนื่องถูกนำมาใช้ในการหาคำตอบ จากการหาคำตอบโดยวิธีนี้พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าได้ถูกต้องพอสมควรทั้งความชื้นสุดท้าย อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ

คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140

School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Suksawat 48 Rd.,Bangkok 10140, Thailand.

ในระบบ และอุณหภูมิของสารทำความเย็น โดยเฉพาะที่ความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่อิ่มต่ำ

จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาแนวทางการอบแห้ง เมื่อทำการอบแห้งที่อัตราการไหลจำเพาะของอากาศ 29.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง-กิโลกรัมมะละกอแช่อิ่มแห้ง จากผลการจำลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลงและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้ง โดยสัดส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 86 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์

คำนำ

ปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการอบแห้งมาใช้ลดความชื้นจากวัสดุโดยเฉพาะวัสดุทางการเกษตรได้แก่ ผัก และผลไม้ เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น โดยกระบวนการอบแห้งที่ใช้กันอยู่ทั่วไปได้แก่ การใช้ขดลวดไฟฟ้าเป็นแหล่งความร้อนทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งกำจัดความชื้นออกจากวัสดุโดยใช้เพียงความร้อนสัมผัสเท่านั้น ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนแล้วพบว่าวิธีการหลังเกิดประโยชน์มากกว่า เนื่องจากสามารถใช้ได้ทั้งความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงในส่วนของเครื่องทำระเหยที่เมื่อกำจัดความชื้นจากกระแสอากาศแล้วจะคายความร้อนแฝงกลับมาให้กับระบบอีกครั้ง นับว่ากระบวนการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนมีความคุ้มค่าในการใช้พลังงาน

Britnell *et al.* (1994) ได้ศึกษาการอบแห้งขิงและ มันฝรั่งโดยใช้ปั๊มความร้อนเปรียบเทียบผลที่ได้กับการอบแห้งแบบโรตารีพบว่า การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรโดยใช้ปั๊มความร้อนจะได้คุณภาพที่ดีกว่าทั้งด้าน กลิ่น รสชาติ และ สีสัน Clement *et al.* (1993) ศึกษาการอบแห้งวัสดุประเภทยางแบบต่อเนื่องโดยใช้ปั๊มความร้อนเพื่อหาสมรรถนะของระบบ พบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านเข้าเครื่องทำระเหยมีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์สมรรถนะ (coefficient of performance, COP) มีค่าสูงตามด้วย โดยมีอัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยที่เหมาะสมคือ 60-70 เปอร์เซ็นต์ของอากาศทั้งหมดในระบบ Meyer และ Greyvenstein (1992) ศึกษาด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืชโดยใช้ปั๊มความร้อน เปรียบเทียบกับระบบอบแห้งที่ใช้ขดลวดความร้อนและใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงพบว่า การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในเวลา 1 ปี และทำงานอย่างอื่นควบคู่ไปด้วยเช่น ทำน้ำอุ่นเป็นต้น จะให้ผลตอบแทนคุ้มค่ากว่าการใช้ขดลวดความร้อนและน้ำมันดีเซล Soponronnarit *et al.* (1997) ได้ศึกษาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม สำหรับมะละกอแช่อิ่มในอุโมงค์ และได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีสมมติฐานที่สำคัญคือ มีสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศชื้นและมะละกอแช่อิ่ม โดยใช้สมการคำนวณการแพร่ความชื้นในวัสดุรูปทรงเหลี่ยมพบว่า อัตราการอบแห้งจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าการทดลองเล็กน้อย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อน ซึ่งใช้วิธีการคำนวณแบบการแทนค่าอย่างต่อเนื่องในการหาคำตอบ และศึกษาแนวทางการอบแห้ง จากการปรับค่าอัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยให้เหมาะสม โดยพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Soponronnarit *et al.* (1997) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มในอุโมงค์ โดยมีสมมติฐานคือ มี

สมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศชื้นกับผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยได้นำแบบจำลองนี้มาพัฒนา เพื่อใช้ทำนายการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อน และสมมติฐานที่ตั้งเพิ่มเติมคือ อุณหภูมิที่ผิวท่อเครื่องทำระเหยมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย กำหนดค่า by-pass factor ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องทำระเหย อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ทั้งสอง และความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและออกจาก recuperator มีค่าเท่ากับ 4°C

1.1 **การคำนวณหาความชื้นของมะละกอแช่อิ่ม**

การคำนวณหาความชื้นของมะละกอแช่อิ่มจะใช้สมการแพร่ความชื้นในรูปทรงเหลี่ยม โดยมีรูปแบบดังนี้

$$(8/\pi^2)^3 \sum_{i=0}^{\infty}\sum_{j=0}^{\infty}\sum_{k=0}^{\infty}\left[\left(\frac{1}{(2i+1)^2}\right)\left(\frac{1}{(2j+1)^2}\right)\left(\frac{1}{(2k+1)^2}\right)\right]$$

$$\exp\left[-\left(\frac{(2i+1)^2}{L_x^2}+\frac{(2j+1)^2}{L_y^2}+\frac{(2k+1)^2}{L_z^2}\right)\pi^2 Dt\right] \quad (1)$$

โดยที่ $MR(t) = (M(t)-M_{eq})/(M_{in}-M_{eq})$ (2)

โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) ของศิวะ และ สมชาติ (2533) มาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$D = 0.000917 \exp[-2877.49/(T_{mix}+273)] \quad (3)$$

สมการที่ (3) ใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิ 40-80°C และความชื้นเริ่มต้นไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากการศึกษาของ ศิวะ และ สมชาติ (2533) พบว่า ความชื้นสมดุลของมะละกอแช่อิ่มและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$M_{eq} = CM_{in}RH/[100*(1.01+CRH+2RH-CRH^2+RH^2)] \quad (4)$$

$$C = 163.15 \exp(-0.0647\ T_{mix}) \quad (5)$$

$$M_{in} = 3.1987 + 0.14077\ T_{mix} \quad (6)$$

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ในสมการที่ (1) ถึง (6) มีความหมายดังนี้

MR(t) คือ อัตราส่วนความชื้น, เศษส่วน

M(t) คือ ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{in} คือ ความชื้นเฉลี่ยก่อนการอบแห้ง, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง, เศษส่วน

T_{mix} คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, °C

t คือ เวลาการอบแห้ง, h

L คือ ขนาดมะละกอแช่อิ่ม, m

จากสมการที่ (1) สามารถหาความชื้นเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาน้อย ๆ โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (1) เทียบกับเวลา และใช้วิธี Runge-Kutta

1.2 **การคำนวณสภาวะอากาศหลังการอบแห้ง**

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV1 ในFigure 1 จากหลักการอนุรักษ์มวลได้ว่า ความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากมะละกอแช่อิ่ม เมื่อจัดเทอมต่าง ๆ จะได้

$$W_f = (M_{in}-M_f)\ R + W_{mix} \quad (7)$$

โดยที่ $R = M_p / m_{mix}\Delta t$

จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนธัลปีของกระแสอากาศรวมกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของวัสดุอบแห้งเท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม เมื่อจัดเทอมต่าง ๆ จะได้

$$T_f = (C_aT_{mix}+W_{mix}(h_{fg}+C_vT_{mix})+RC_{pw}\theta-W_fh_{fg}-Q_1)/(C_a+W_fC_v+RC_{pw}) \quad (8)$$

เมื่อ m คือ อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง, kg/h

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหย, kJ/kg

C คือ ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg °C

q คือ อุณหภูมิของมะละกอแช่อิ่มก่อนอบแห้ง, °C

Q_l คือ ความร้อนที่สูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม, kJ/kg dry air

M_p คือ มวลแห้งของผลิตภัณฑ์, kg

R คือ สัดส่วนของมวลแห้งมะละกอแช่อิ่มต่อมวลอากาศแห้ง

T คือ อุณหภูมิ, °C

W คือ อัตราส่วนความชื้น, kg water/kg dry air

สัญลักษณ์กำกับล่าง

a คือ อากาศแห้ง

f คือ อากาศออกจากห้องอบแห้ง

pw คือ มะละกอแช่อิ่ม

v คือ ไอน้ำ

mix คือ อากาศผสมก่อนเข้าห้องอบแห้ง

1.3 **การคำนวณอุณหภูมิของอากาศผสมและการนำอากาศมาใช้ใหม่**

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV4 ใน Figure 1 จากหลักการอนุรักษ์มวลจะได้ว่า มวลของน้ำในลมร้อนก่อนอบแห้งเท่ากับผลรวมของมวลของน้ำในอากาศที่ผ่านการลดความชื้นจากเครื่องทำระเหยกับมวลของน้ำในอากาศร้อนที่เวียนกลับมาใช้ใหม่ เมื่อจัดเทอมแล้วจะได้

$$W_{mix} = RCW_f + (1\text{-}RC)W_{evo} \quad (9)$$

เมื่อ $RC = m_{bp}/m_{mix}$

W_{evo} คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ ขาออกจาก เครื่องทำระเหย, kg water/kg dry air

จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า เอนธัลปีของกระแสอากาศขาเข้าเท่ากับเอนธัลปีของกระแสอากาศขาออกจากปริมาตรควบคุมเมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม จัดเทอมแล้วสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_{cai} = [RC \{C_aT_f+W_f(h_{fg}+C_vT_f)\}+(1\text{-}RC)\{T_{reo}(C_a+W_{evo}C_v)+W_{evo}h_{fg}\} - W_{mix}h_{fg}]/(C_a+W_{mix}C_v) \quad (10)$$

เมื่อ T_{reo} คือ อุณหภูมิของอากาศขาออก recuperator, °C

T_{cai} คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องควบแน่น, °C

1.4 **การคำนวณสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่องทำระเหย**

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV6 ใน Figure 1 จากหลักการอนุรักษ์มวลจะได้ว่า มวลของน้ำในลมร้อนหลังออกจากเครื่องทำระเหยมีค่าเท่ากับผลรวมของมวลของน้ำในอากาศหลังผ่านห้องอบแห้งที่สัมผัสกับขดท่อและอากาศที่ไม่สัมผัสกับขดท่อของเครื่องทำระเหย จัดเทอมแล้วจะได้

$$W_{evo} = BFW_f + (1\text{-}BF)W_{er} \quad (11)$$

จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า เอนธัลปีของอากาศชื้นเท่ากับผลบวกของเอนธัลปีของอากาศแห้งและเอนธัลปีของไอน้ำในอากาศ สามารถแสดงสมการเพื่อหาผลรวมของเอนธัลปีของกระแสอากาศแห้งเพื่อคำนวณอุณหภูมิอากาศขาออกได้ดังนี้

$$T_{eo} = BFT_{ei} + (1\text{-}BF)T_e \quad (12)$$

เมื่อ BF คือ สัดส่วนของอากาศที่ไม่สัมผัสขดท่อสารทำความเย็นมีค่าเท่ากับ 30 %

T_{ei} คือ อุณหภูมิขาเข้าเครื่องทำระเหย, °C

T_{eo} คือ อุณหภูมิขาออกเครื่องทำระเหย, °C

T_e คือ อุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย, °C

W_{er} คือ อัตราส่วนความชื้นอิ่มตัวของอากาศที่ผิวท่อเครื่องทำระเหย, kg water/kg dry air

1.5 **ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า**

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV2 ใน Figure 1 จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการ

เปลี่ยนแปลงเอนธัลปีของกระแสอากาศเท่ากับกำลังงานเพลาที่ขับเคลื่อนพัดลมหลัก แสดงได้ดังนี้

$$W_s = m_{mix}(C_a+W_{mix}C_v)(T_{mix}- T_{cao}) \quad (13)$$

เมื่อ T_{cao} คือ อุณหภูมิของอากาศขาออกจากเครื่องควบแน่น, °C

W_s คือ กำลังงานเพลาขับพัดลม, kJ/h

1.6 **การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน**

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV3 ใน Figure 1 จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนธัลปีของกระแสอากาศเท่ากับความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยเครื่องควบแน่น เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม จะได้

$$Q_{in,cond} = m_{mix}(C_a + W_{mix}C_v)(T_{cao} - T_{cai}) \quad (14)$$

เมื่อ T_{cai} คือ อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องควบแน่น, °C

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV5 จาก Figure 1 จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนธัลปีของกระแสอากาศเท่ากับความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (recuperator or air to air heat exchanger) ทำได้ เขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สายร้อน $Q_{re} = m_p(C_a + W_fC_v)(T_f - T_{ei})$ (15)

สายเย็น $T_{reo} = [Q_{re} / m_p(C_a+W_{evo}C_v)] + T_{eo}$ (16)

เมื่อ Q_{re} คือ ความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำได้, kJ/h

T_{reo} คือ อุณหภูมิขาออก recuperator, °C

T_{ei} คือ อุณหภูมิขาเข้าเครื่องทำระเหย, °C

T_{eo} คือ อุณหภูมิขาออกเครื่องทำระเหย, °C

m_p คือ อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหย, kg/h

จากสมมติฐาน ความแตกต่างของอุณหภูมิเข้าและออกจาก recuperator มีค่าเท่ากับ 4°C จะได้ว่า

$$T_{ei} = T_f - 4 \quad (17)$$

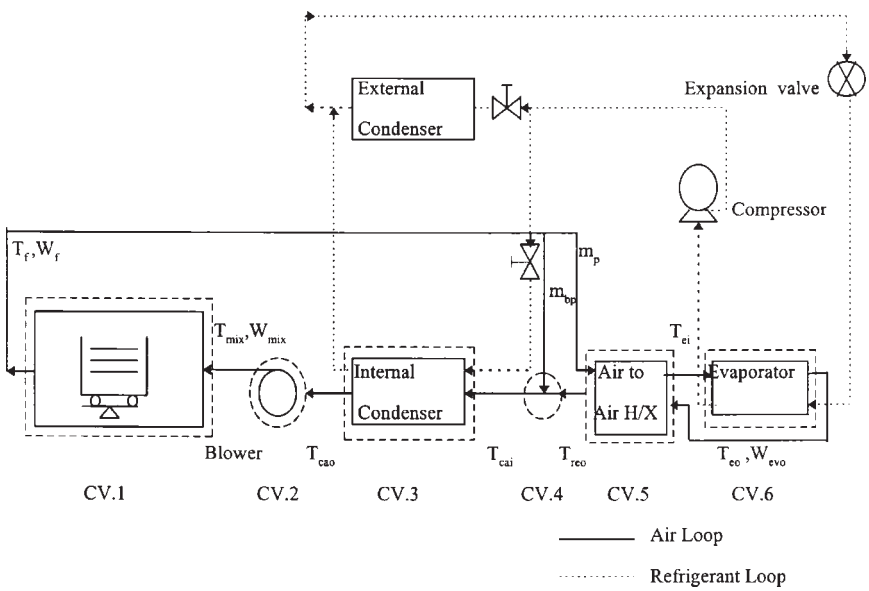


Figure 1 Control volumes of the heat pump drying system.

1.7 **การคำนวณอุณหภูมิสารทำความเย็น**

โดยใช้สมการการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อสารตัวกลางมีการเปลี่ยนเฟส ดังนี้

เครื่องควบแน่น : $T_c = [T_{cai} - T_{cao}\exp((T_{cao} - T_{cai})UA_c/Q_{in,cond})] /[1-\exp((T_{cao} - T_{cai})UA_c/Q_{in,cond})]$ (18)

เครื่องทำระเหย : $T_e = [T_{ei} - T_{eo}\exp((T_{ei} - T_{eo})UA_e/Q_{ev})] /[1-\exp((T_{ei} - T_{eo})UA_e/Q_{ev})]$ (19)

เมื่อ T_c คือ อุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น, °C

T_e คือ อุณหภูมิสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย, °C

1.8 **การคำนวณในส่วนอุปกรณ์ปั๊มความร้อน**

โดยกำหนดให้สมรรถนะการทำงานของเครื่องอัด และสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำระเหยมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย และอุณหภูมิการกลั่นตัวของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น กำหนดความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์อยู่ในรูปโพลีโนเมียล

$$P = A_1+A_2T_e+A_3T_e^2+A_4T_c+A_5T_c^2+A_6T_eT_c+A_7T_e^2T_c+A_8T_eT_c^2+A_9T_e^2T_c^2 \quad (20)$$

$$Q_{ev} = B_1+B_2T_e+B_3T_e^2+B_4T_c+B_5T_c^2+B_6T_eT_c+B_7T_e^2T_c+B_8T_eT_c^2+B_9T_e^2T_c^2 \quad (21)$$

โดย ค่าคงที่ A และ B หาได้จากบริษัทผู้ผลิต

2. ขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณเริ่มต้นโดยสมมติค่า W_f และกำหนดค่า by-pass factor เพื่อคำนวณหาค่า W_{evo} จากสมการที่ (11) แล้วนำค่า W_{evo} ที่ได้ไปคำนวณหา W_{mix} จากสมการที่ (9) นำค่า T_{mix} ที่ทราบแล้วไปคำนวณหาค่า RH แล้วคำนวณค่า M_{eq} จากสมการที่ (4) จากนั้นคำนวณค่า M_f จากอนุพันธ์ที่เทียบกับเวลาของสมการที่ (1) คำนวณหาค่า W_f ใหม่จากสมการที่ (7) และคำนวณหาค่า T_f จากสมการที่ (8) นำค่า T_{mix} และค่า W_f ใหม่ไปคำนวณหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้ง(RH_f) แล้วตรวจสอบค่า RH_f ถ้าค่า RH_f ไม่เป็นจริง (RH_f >1) จะไปคำนวณ subprogram for moisture condensation แต่ถ้า RH_f <1 ก็นำค่า T_e, T_c ที่สมมติไปคำนวณ P จากสมการ (20) และคำนวณ Q_{ev} จากสมการ (21) แล้วคำนวณ Q_c จากนั้นนำค่า W_f สมมติและค่า W_{evo} ไปคำนวณหาค่า T_{ei} , T_{eo} , T_{cai} , T_{cao}, Q_{incond}, Q_{re} และ T_{reo} จากสมการที่ (17), (12), (10), (13), (14), (15) และ (16) ตามลำดับ แล้วคำนวณค่า T_c, T_e ใหม่จากสมการ (18) และ (19) ตามลำดับ ตรวจสอบค่า W_f, T_c และ T_e ถ้าผลต่างระหว่าง W_f ใหม่กับ W_f ที่สมมติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) และผลต่าง T_c, T_e ใหม่กับ T_c, T_e ที่สมมติมีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.1) ก็กลับไปคำนวณใหม่ โดยใช้ค่า W_f, T_c และ T_e ใหม่แทนค่าที่สมมติ แต่ถ้าน้อยกว่าก็ไปคำนวณขั้นต่อไปคือ คำนวณการสิ้นเปลืองพลังงานที่พัดลมหลัก และพลังงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัด แล้วจึงตรวจสอบความชื้นสุดท้ายของมะละกอแช่อิ่มว่าน้อยกว่าค่าความชื้นสุดท้ายที่กำหนดหรือไม่ ถ้ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จะกลับไปคำนวณเริ่มต้นจากข้อ 1. ลงมาใหม่ ถ้ามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนดไว้ก็จบการคำนวณ block diagram การคำนวณแสดงไว้ใน Figure 2 และ computer simulation flow chart แสดงไว้ใน Figure 3

ผลและวิจารณ์

1. การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการทดลองที่อุณหภูมิ 50°C ขนาดชิ้น 1.1x1.2x1.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้น 38.3 %db. ให้มี

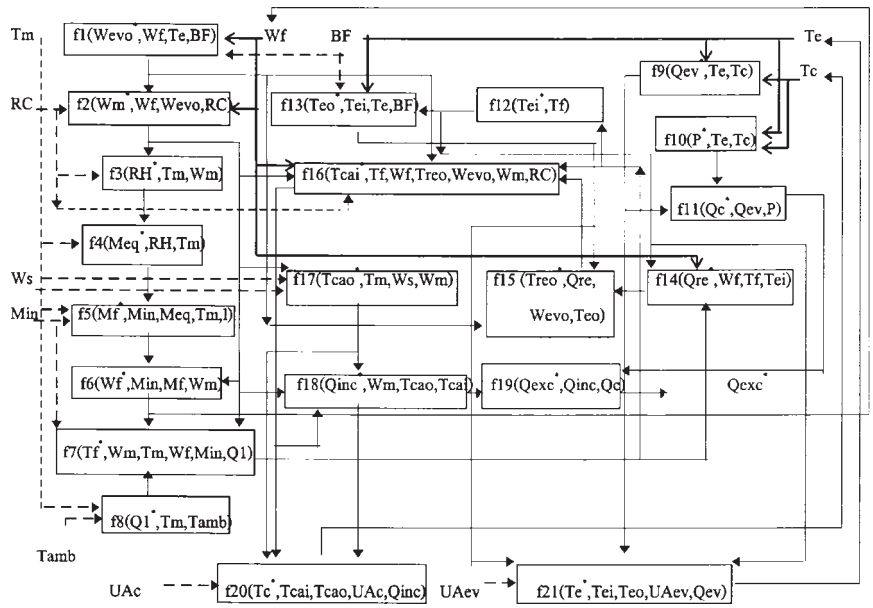


Figure 2 Block diagram of calculation.

ความชื้นสุดท้าย 23 %db. อัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหย 63 % สามารถนำไปเขียนกราฟได้ตาม Figure 4 พบว่าค่าความชื้นเฉลี่ยของมะละกอแช่อิ่มที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ส่วนค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อนำไปเขียนกราฟจะได้ดัง Figure 5 พบว่าอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและขาออกจากอุปกรณ์ต่าง ๆ คือ เครื่องควบแน่น เครื่องทำระเหย และ recuperator ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ทางด้านอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหยและที่เครื่องควบแน่นสามารถนำไปเขียนกราฟได้ดัง Figure 6 พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองจะอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ยของค่าจากผลการทดลอง

2. การหาสภาวะการอบแห้งจากการใช้แบบจำลอง

การหาสภาวะการอบแห้งจะพิจารณาจากค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและค่าความชื้นสุดท้ายจากการคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยที่เหมาะสม ซึ่งทำให้มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด โดยใช้สภาวะการอบแห้งเดียวกันกับ Figure 3 แต่เปลี่ยนปริมาณมะละกอแช่อิ่มไป 3 ค่า คือ 56.5 , 80.1 และ 101.1 กิโลกรัม นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปเขียนกราฟจะได้ดัง Figure 7 - 9 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยที่เหมาะสมอยู่ที่ 90, 88 และ 86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งให้ผลตรงตามทฤษฎี เนื่องจากเมื่อทำการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มปริมาณมากขึ้นย่อมหมายถึงภาระในการกำจัดความชื้นมีค่ามากตามด้วย ส่งผลให้อัตราส่วนอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยมีค่าสูงขึ้นเพื่อที่จะสามารถกำจัดความชื้นออกจากกระแสอากาศได้มาก เพื่อทำให้อากาศมีความแห้งเพียงพอต่อการนำมาอบแห้งใหม่ เมื่อสัดส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยมีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่กล่าวมาข้างต้นไม่ทำให้ประหยัดพลังงานหรือใช้เวลาการอบแห้งต่ำลง เพราะเมื่อสัดส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยมีค่าลดลง หมายถึงปริมาณอากาศที่ไปผ่านเครื่องทำ

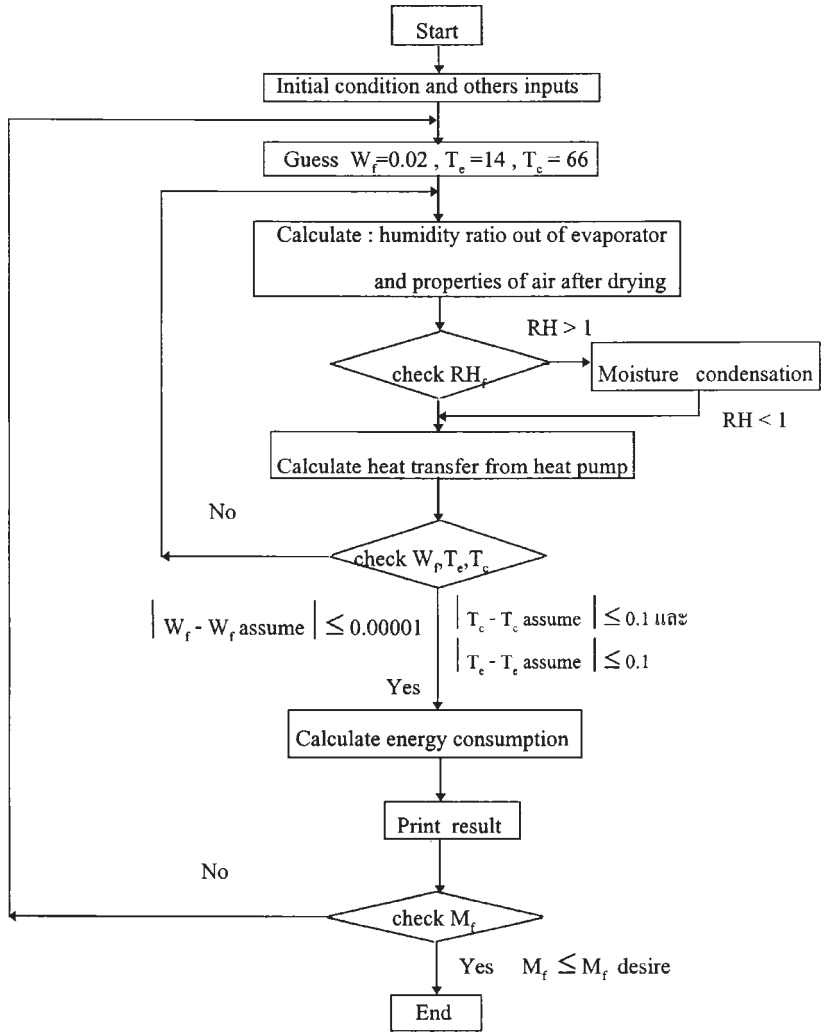


Figure 3 Computer simulation flow chart.

ระเหยเพิ่มขึ้นทำให้เครื่องทำระเหยรับภาระมากขึ้น การกำจัดความชื้นออกจากอากาศทำได้ไม่ดี ดังนั้น เมื่อนำมาผสมเพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้งจึงมีความชื้นสูง ทำให้ต้องใช้เวลาอบแห้งนาน ส่งผลให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับสัดส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยเพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงเช่นเดียวกัน เพราะอากาศที่ไปผ่านเครื่องทำระเหยมีปริมาณน้อย การกำจัดความชื้นออกจากอากาศก็มีค่าน้อยตาม ขณะเดียวกันอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยก็ไม่ได้สัมผัสกับผิวท่อทั้งหมดยังมีอากาศบางส่วนที่ไม่ได้สัมผัสท่อด้วย ทำให้การกำจัดความชื้นออกจากอากาศทำไม่ได้ทั้งหมด แม้ว่าปริมาณอากาศที่ผ่านเครื่องทำระเหยจะน้อยก็ตาม ผลที่ตามมาคือ เมื่อนำไปผสมกับปริมาณอากาศส่วนใหญ่ที่ไม่ได้ผ่านเครื่องทำระเหยซึ่งมีความชื้นสูงจะทำให้ใช้เวลาการอบแห้งยาวนานขึ้น จึงมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานสูง

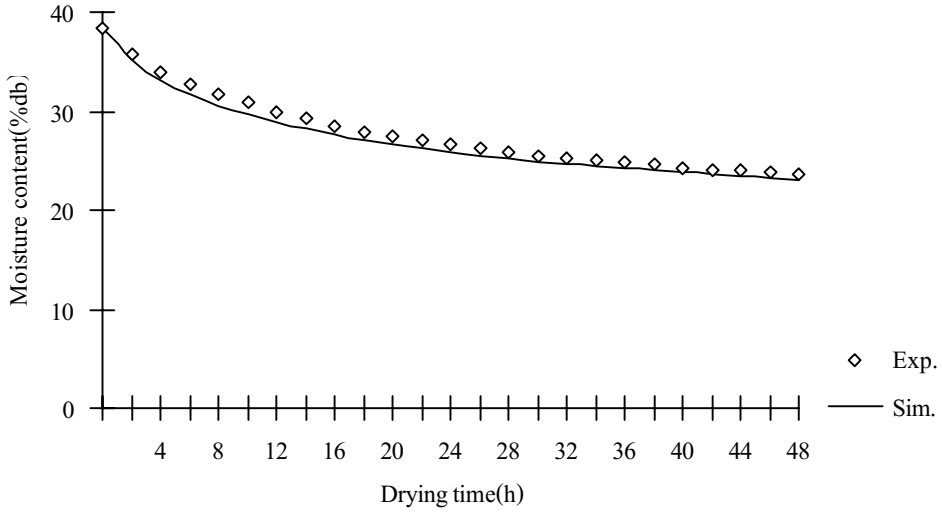


Figure 4 Evolution of simluated and experimental moisture content [Test 3/2] [By-pass air ratio = 63%, Temperature = 50°C, Specific air flow rate =29.83 kg/h-kg dry papaya glace′].

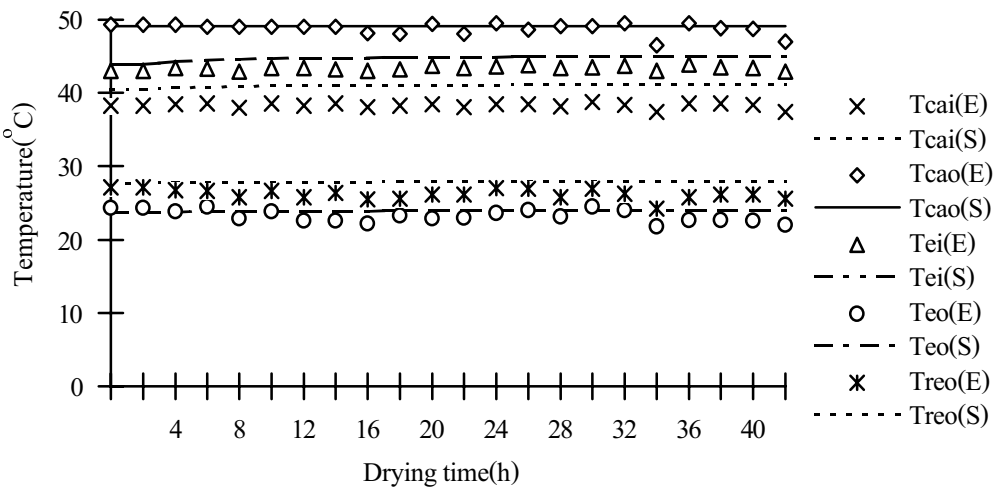


Figure 5 Evolution of air temperature at varios parts in system [Test 3/2] [By-pass air ratio = 63%, Temperature = 50 °C, Specific air flow rate =29.83 kg/h-kg dry papaya glace′].

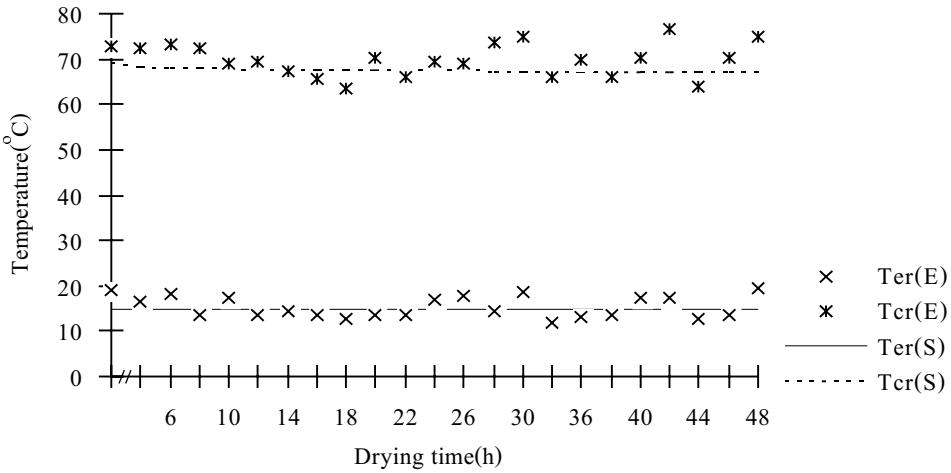


Figure 6 Temperature of refrigerant at condenser and evaporator [Test 3/2] [By-pass air ratio = 63%, Temperature = 50°C, Specific air flow rate =29.83 kg/h-kg dry papaya glace′].

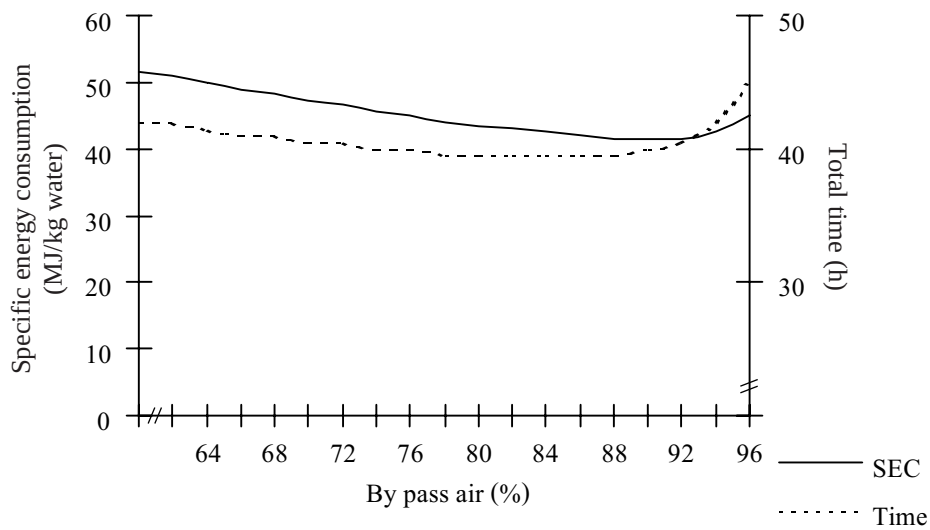


Figure 7 Effect of by-pass air ratio on specific energy consumption, papaya glace′ 56.5 kg [Temperature = 50°C, size = 1.1×1.2×1.3 cm^3, initial moiture content = 38.3 %db. Final moiture content = 23.6 %db.].

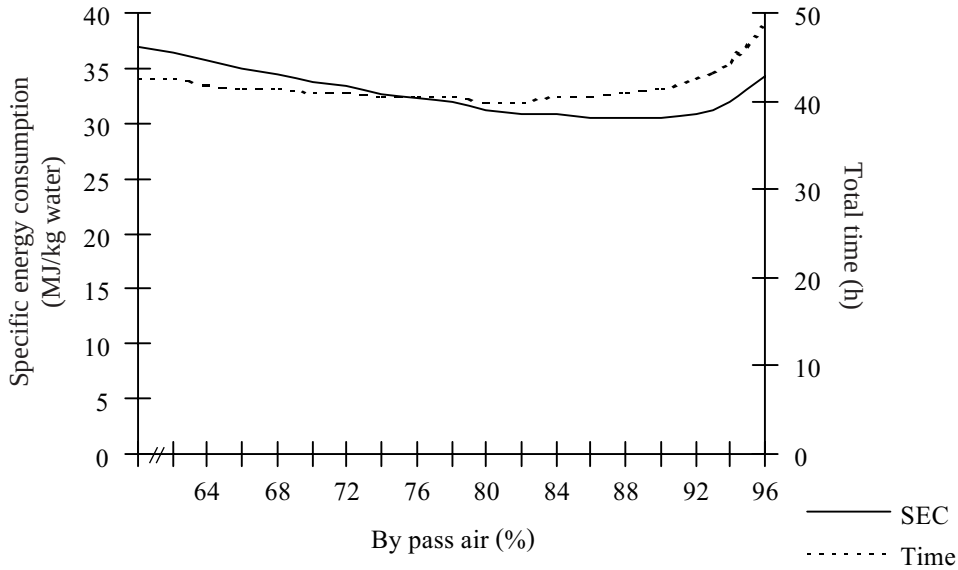


Figure 8 Effect of by-pass air ratio on specific energy consumption, papaya glace′ 80.1 kg [Temperature = 50°C, size = 1.1×1.2×1.3 cm^3, initial moiture content = 38.3 %db. Final moiture content = 23.6 %db.].

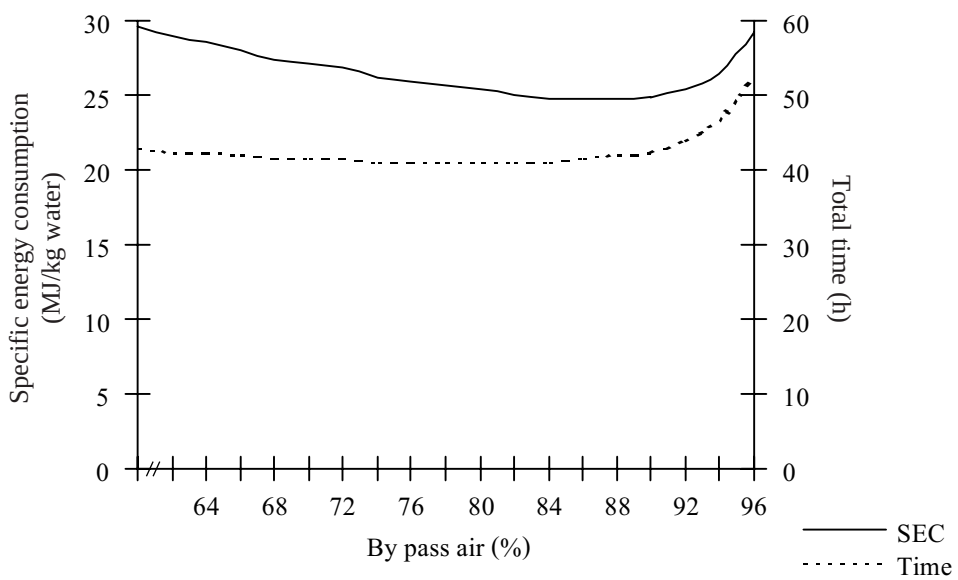


Figure 9 Effect of by-pass air ratio on specific energy consumption, papaya glace′ 101.1 kg [Temperature = 50°C, size = 1.1×1.2×1.3 cm^3, initial moiture content = 38.3 %db. Final moiture content = 23.6 %db.].

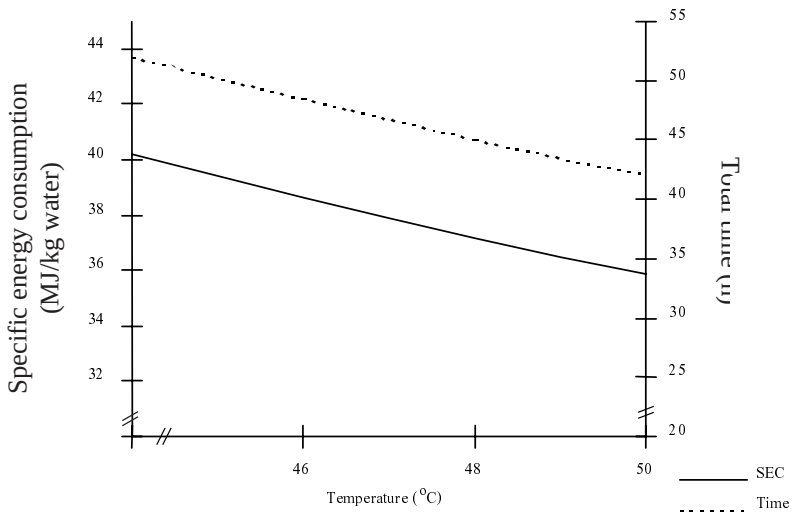


Figure 10 Effect of drying air temperature on specific energy consumption [Temperature = 50°C, size = 1.1×1.2×1.3 cm^3, initial moiture content = 38.3 %db. Final moiture content = 23.6 %db.,By-pass air ratio = 30%].

จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งเมื่อมะละกอแช่อิ่มมีขนาด 1.2×1.3×1.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งมีค่าสูงขึ้นเวลาในการอบแห้งจะสั้นลง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจะมีค่าต่ำลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่มีค่าสูงจะส่งผลให้อากาศอบแห้งมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้สภาวะอากาศอบแห้งที่ไปผ่านมะละกอแช่อิ่มมีสภาพค่อนข้างแห้งสามารถดึงดูดความชื้นจากผลิตภัณฑ์ได้ดี จึงสามารถลดความชื้นของมะละกอแช่อิ่มได้เร็ว และมีความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงใน Figure 10

สรุป

1. จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มโดยใช้ปั๊มความร้อน สามารถทำนายการอบแห้งได้ดีในช่วงที่ความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่อิ่มมีค่าค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถทำนายอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบได้ค่อนข้างดี

2. ในการอบแห้งนั้นควรคำนึงถึงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า แนวโน้มของการปรับค่าอัตราส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหยที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของมะละกอแช่อิ่มที่ใช้ในการอบแห้ง ถ้าจำนวนมะละกอแช่อิ่มที่ใช้อบแห้งมากขึ้น จะส่งผลให้สัดส่วนอากาศที่ไม่ผ่านเครื่องทำระเหย (by-pass air) มีค่าลดลง โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง

86-90 %

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้การสนับสนุนกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีการอบแห้ง ในการดำเนินการวิจัยด้านการอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อน

เอกสารอ้างอิง

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2533. การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม. ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย) 24: 196-207.

Britnell, P., S. Birchall, S. Fitz-Payne, G. Young, R. Mason, and A. Wood. 1994. The application of heat pump dryers in the Australian food industry. Drying Technol. 12: 897-904.

Clements, S., X. Jia, and P. Jolly. 1993. Experimental verification of a heat pump assisted continuous dryer simulation model. Int. J. Energ. Res. 17: 19-28.

Meyer, J.P. and G.P. Greyvenstein. 1992. The drying of grain with heat pump in south Africa: A techno-economic analysis. Int. J. Energ. Res. 14: 397-406.

Soponronnarit, S., A. Nathakaranakule, P. Noosuk, and T. Yoovidhya. 1997. Strategies for papaya glace drying in tunnel. Drying Technol. 15: 151-168.

วันรับเรื่อง : 20 ม.ค. 41
วันรับตีพิมพ์ : 1 ก.ย. 41