

แนวทางการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่มที่เหมาะสมที่สุด

Optimum Strategies for Pineapple Glace'

มารีนา นุ้ยหมี¹ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์¹ และ บุษยา บุนนาค¹

Marina Nuimeem, Somchart Soponronnarit and Boosya Bunnag

ABSTRACT

A mathematical model for pineapple glace' drying based on thermal equilibrium between the drying air and the product was developed. The effect of temperature on product quality was observed. The effect of temperature, air flow rate and fraction of air recycled on drying time and energy consumption were also observed. The criteria for optimum drying of pineapple glace' in a cabinet dryer were product quality, drying time and energy consumption. Experimental and simulated results showed that a drying temperature of 65°C, a specific air flow rate of about 11 kg dry air/h-kg dry pineapple glace' and about 0.75 of air recycled should be used.

Key words : drying, pineapple glace, strategy, energy consumption, quality

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมของสับปะรดแช่อิ่ม โดยทำการทดลองอบแห้งในตู้อบแห้งแบบถาดอยู่กับที่ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและจากแบบจำลอง พบว่าอัตราการอบแห้งจากการคำนวณใกล้เคียงกับอัตราจากการทดลอง จากการหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับผลการทดลอง โดยพิจารณาจากคุณภาพ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงาน พบว่าสภาวะที่อบแห้งควรมีอุณหภูมิประมาณ

65°ซ อัตราการไหลของอากาศจำเพาะ 11 กิโลกรัมอากาศแห้ง/ชั่วโมง-กิโลกรัมสับปะรดแห้งและสัดส่วนการนำเอาอากาศที่ใช้อบแห้งแล้วมาใช้ใหม่ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ

คำนำ

สับปะรดเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ปกติจะเป็นผลไม้ที่มีปริมาณมากเกินความต้องการ ทำให้สับปะรดมีราคาถูก ถ้าจำหน่ายไม่หมดในเวลาอันควรจะเน่าเสีย ก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้นเพื่อ

¹ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

เป็นการช่วยเหลือเกษตรกร และสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ จึงได้มีการแปรรูปสับปะรดให้เป็นผลิตภัณฑ์ผลไม้ที่สามารถหารายได้ให้แก่ประเทศได้ โดยการทำเป็น สับปะรดแช่อิ่ม ซึ่งในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องผ่านการอบแห้ง โดยอาจอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบตู้ หรือแบบอุโมงค์ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองพลังงาน ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเฉพาะของอากาศและปริมาณ การนำเอาอากาศที่ใช้ออบแห้งแล้วมาใช้ใหม่ การดำเนินการทดลองเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดนั้น จะสิ้นเปลืองเวลา และค่าใช้จ่ายมาก วิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่าย และเวลา ก็คือการจำลองสภาพการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการสำรวจเอกสาร พบว่าการศึกษาการอบแห้ง สับปะรดแช่อิ่มยังมีไม่มากนัก Tanafranca *et al.* (1985) ศึกษากระบวนการผลิตสับปะรดแช่อิ่ม Bhumiratana *et al.* (1985) ศึกษากระบวนการผลิตมะละกอแช่อิ่ม และศึกษา สมการการถ่ายเทมวลระหว่างมะละกอแช่อิ่มและน้ำเชื่อม ด้วย Moy and Kuo (1983) ศึกษาการลดความชื้นมะละกอ ด้วยวิธีการออสโมซิสในขั้นแรก และลดความชื้นขั้นต่อไปด้วยตู้อบลมร้อนในขั้นที่สอง โดยศึกษาเปรียบเทียบ ระหว่างการใช้หรือไม่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในกระบวนการออสโมซิส และกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะอากาศ พบว่าอัตราการลดความชื้นจะสูงขึ้นเมื่อใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แต่คุณภาพของของผลิตภัณฑ์ยังเหมือนเดิม Levi *et al.* (1985) ศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของกระบวนการต่างๆ ก่อนการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลังอบแห้ง อารีย์ และ สมชาติ (2534) ศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งสับปะรดแช่อิ่ม พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์จะลดต่ำลงในช่วงความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 35% แต่มีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 45% ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะ เพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มเพิ่มขึ้น Soponronnarit *et al.* (1992) ศึกษาการพัฒนา

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม ในตู้อบแห้งและศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบผลจากการทดลองและจากการคำนวณ พบว่า อัตราการอบแห้งจากการคำนวณสูงกว่าของการทดลองเล็กน้อย ซึ่งในการศึกษานี้คำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงาน Crank (1975) ให้สมการที่ใช้คำนวณการแพร่ความชื้นในวัสดุรูปทรง infinite slab, infinite cylinder, infinite hollow cylinder และทรงกลม จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ พบว่ายังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมของสับปะรดแช่อิ่ม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาแนวทางการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่ม โดยทำการทดลองในตู้อบแห้ง พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการอบแห้ง และศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมของสับปะรดแช่อิ่ม โดยพิจารณาจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงาน

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Soponronnarit *et al.* (1992) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม ในตู้อบแห้ง โดยมีสมมติฐานที่สำคัญคือมีสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศชื้นกับผลิตภัณฑ์ ในงานวิจัยนี้จะนำแบบจำลองนี้มาดัดแปลงเพื่อใช้ทำนายการอบแห้งสับปะรดแช่อิ่ม

1.1 การคำนวณหาความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม

การคำนวณหาความชื้นของสับปะรดแช่อิ่ม จะใช้สมการแพร่ความชื้นในทรงกระบอกกลวงสั้น โดยมีรูปแบบดังนี้

$$MR(t) = \{32/[\pi^2(r_0^2 - r_1^2)]\} \sum_{n=1}^{\alpha} \sum_{m=0}^{\alpha} [1/2m + 1]^2 \{ [J_0(r_1 \alpha_n) - J_0(r_0 \alpha_n)] / [\alpha_n^2 J_0(r_1 \alpha_n) + \alpha_n^2 J_0(r_0 \alpha_n)] \} \{ \exp[(-D \alpha_n^2 t) - (2m+1)^2 \pi^2 D t / l^2] \} \quad (1)$$

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

จากการนำเอาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) ของ อารีย์ และ สมชาติ (2534) มาใช้ทำนายอัตราการอบแห้ง พบว่าสมการดังกล่าวไม่สามารถทำนายอัตราการอบแห้งได้ถูกต้องสำหรับกรณีความชื้นเริ่มต้นของสับปะรดมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการทดลองเพิ่มเติม และได้พัฒนาสมการขึ้นใหม่ โดยให้สัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (T) และความชื้นเริ่มต้น (M_{in}) ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า

$$D = 7.6085 \times 10^{-7} - 2.2108 \times 10^{-10} M_{in} + 1.3105 \times 10^{-10} M_{in}^2 - 4.5706 \times 10^{-9} T + 4.3287 \times 10^{-10} T^2 + 7.2929 \times 10^{-10} T M_{in} - 5.7446 \times 10^{-14} T^3 M_{in} - 8.7665 \times 10^{-6} T M_{in}^2 + 7.0060 \times 10^{-14} T^2 M_{in}^2$$
 (3)

สมการ (3) ใช้ได้กับช่วงอุณหภูมิ ระหว่าง 50-90 °ซ และความชื้นเริ่มต้นระหว่าง 57-80% มาตรฐานแห้งจากการศึกษาของอารีย์ และ สมชาติ (2534) พบว่าความชื้นสมดุลของสับปะรดแช่อิ่ม มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ดังนี้

$$M_{eq} = \{ \exp[2(A+BRH)] - M_{0.5} \} / [2 \exp(A+BRH)]$$
 (4)

เมื่อ $A = 3.403 - 0.02049T$ (5)

$B = 1/(0.7288 - 0.005960T)$ (6)

$M_{0.5} = 1/(0.1003 - 0.0006300T)$ (7)

สัญลักษณ์ต่างๆ ในสมการ (1)-(7) มีความหมายดังนี้

MR(t) คือ อัตราส่วนความชื้น, เศษส่วน

M(t) คือ ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{in} คือ ความชื้นเฉลี่ยก่อนการอบแห้ง, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, m^2/h

$J_0(r_1 \alpha_n)$ และ $J_0(r_0 \alpha_n)$ คือ ฟังก์ชันของ Bessel อันดับ ศูนย์

α_n คือ พารามิเตอร์ที่สามารถหาได้ใน Crank (1975)

r_1 คือ รัศมีภายในของทรงกระบอกกลวง, m

r_0 คือ รัศมีภายนอกของทรงกระบอกกลวง, m

t คือ เวลาการอบแห้ง, h

l คือ ความหนาของทรงกระบอกกลวง, m

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง, เศษส่วน

T คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, °C

$M_{0.5}$ คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0.50

จากสมการที่ (1) สามารถหาความชื้นเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาน้อยๆ โดยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ (1) เทียบกับเวลา และใช้วิธีของ finite differences

1.2 การคำนวณสภาวะอากาศหลังการอบแห้ง

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV1) ใน Figure 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศบวกกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของวัสดุอบแห้งเท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างเครื่องอบแห้งและสิ่งแวดล้อม เมื่อจัดเทอมต่างๆ จะได้ว่า

$$T_{r1} = [Q_1 + C T_{a, mix} + W_{mix} (h_{fg} + C T_{v, mix}) - W h_{f, fg} - \Delta U_p] / (C_a + W f C_v)$$
 (8)

โดยที่ ΔU_p มีค่าน้อยมากดังนั้นจึงอาจตัดทิ้งได้ และ $Q_1 = UA(\Delta T)/m_{mix}$ (9)

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV2) และ (CV3) ใน

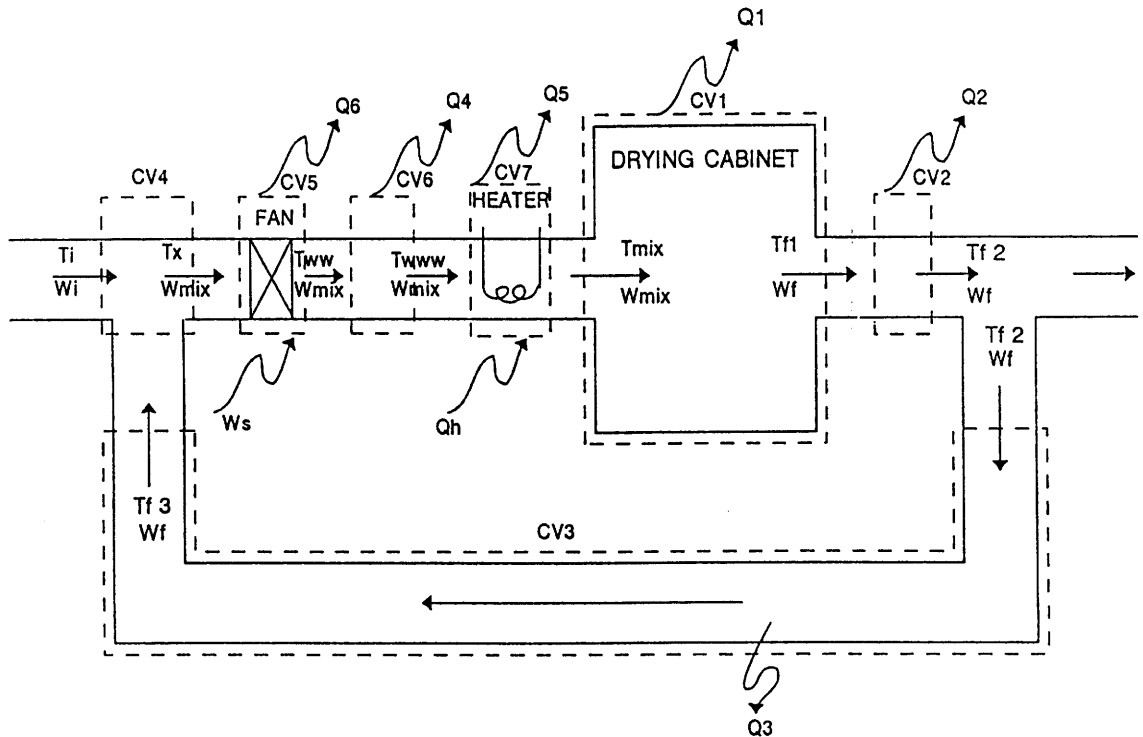


Figure 1 Control volumes.

Figure 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างเครื่องอบแห้งและสิ่งแวดล้อม [เป็นกรณีเฉพาะของสมการที่ (8)] ซึ่งจะทำให้คำนวณการลดลงของอุณหภูมิของอากาศอันเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนได้ ทำให้รู้สภาพของอากาศก่อนไหลเข้าปริมาตรควบคุม (CV4)

สัญลักษณ์ต่างๆ ในสมการ (8) และ (9) มีความหมายดังนี้

- ΔU_p คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของสับประคเข้าต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง, kJ/kg-dry air
- U คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม, kJ/(m²·°C·h)
- A คือ พื้นที่, m²
- T คือ อุณหภูมิ, °C
- ΔT คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิในส่วน

- ที่พิจารณาและอุณหภูมิภายนอก, °C
- Q คือ ความร้อนที่สูญเสียต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง, kJ/kg - dry air
- W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg - H₂O/kg - dry air
- C คือ ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg °C
- h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ, kJ/kg - H₂O
- m คือ อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง, kg/h

- สัญลักษณ์กำกับล่าง :
- a คือ อากาศแห้ง
- f คือ อากาศออกจากห้องอบแห้ง
- p คือ สับประคเข้า
- v คือ ไอน้ำ
- mix คือ อากาศผสมก่อนเข้า

ห้องอบแห้ง

$$\dot{m}_{rc} W_f (h_{fg} + C_v T_{f3}) - \dot{m}_{mix} W_{mix} h_{fg}] / (\dot{m}_{mix} C_a + \dot{m}_{mix} W_{mix} C_v) \quad (13)$$

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV1) ใน Figure 1 จากหลักการทรงมวลจะได้ว่า ปริมาณน้ำในอากาศที่เพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากสับปะรดแช่แข็ง เมื่อจัดเทอมต่างๆ จะได้ว่า

$$W_f = (M_i - M_f)R + W_{mix} \quad (10)$$

$$\text{โดยที่ } R = M_p / (\dot{m}_{mix} \Delta t) \quad (11)$$

เมื่อ M_p คือ มวลของผลิตภัณฑ์, kg

Δt คือ ช่วงเวลาน้อยๆ ที่พิจารณา, h

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV4) ใน Figure 1 จากหลักการทรงมวลมวลน้ำในลมร้อนก่อนอบแห้งเท่ากับผลรวมของมวลของน้ำในอากาศใหม่กับมวลของน้ำในอากาศร้อนที่เวียนกลับมาใช้ใหม่ และมวลของอากาศแห้งก่อนการอบแห้งเท่ากับผลรวมของมวลอากาศแห้งขาเข้ากับมวลของอากาศแห้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ เมื่อจัดรูปสมการจะสามารถเขียนได้เป็น

$$W_{mix} = (1-RC)W_i + RC W_f \quad (12)$$

เมื่อ RC คือ สัดส่วนการนำเอาอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาใช้ใหม่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\dot{m}_{rc}/\dot{m}_{mix}$

1.3 การคำนวณอุณหภูมิของอากาศผสมและการนำเอาอากาศใหม่มาใช้

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV4) ใน Figure 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่า ผลรวมของเอนทัลปีของกระแสอากาศเข้าและออกจาก control volume มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อไม่มีการสูญเสียความร้อน ซึ่งเมื่อจัดเทอมจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{หรือ } T_x = [(\dot{m}_1 C_{T1} + \dot{m}_1 W_1 (h_{fg} + C_v T_1)) + \dot{m}_{rc} C_{T1} +$$

เมื่อ T_x คือ อุณหภูมิของอากาศภายหลังผสม

1.4 ความสิ้นเปลืองความร้อนและไฟฟ้า

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV5) ใน Figure 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม และกำลังงานเพลที่ขับเคลื่อนพัดลม ซึ่งเมื่อจัดเทอมต่างๆ จะได้

$$T_{ww} = (Q_6 + W_i + C_a T_x + W_{mix} C_v T_x) / (C_a + W_{mix} C_v) \quad (14)$$

โดยที่งานเพลที่ใช้ขับเคลื่อนพัดลมต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง (W_s) หาได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยจากข้อมูลการทดลอง T_{ww} คือ อุณหภูมิที่ออกจากพัดลม, °C

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV6) ใน Figure 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม [เป็นกรณีเฉพาะของสมการ (8)] ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม (CV6) ได้

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV7) ใน Figure 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศ เท่ากับผลรวมของความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยตัวอุ่นอากาศ และความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม เมื่อจัดเทอมต่างๆ จะได้ว่า

$$Q_h = C_{a,mix} T_{mix} + W_{mix} (h_{fg} + C_v T_{mix}) - C_{a,ww} T_{ww} - W_{mix} (h_{fg} + C_v T_{ww}) - Q_5 \quad (15)$$

เมื่อ Q_h คือ พลังงานที่ใช้ในตัวอุ่นอากาศต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง, kJ/kg-dry air

T_{www} คือ อุณหภูมิก่อนเข้าตัดอุ่นอากาศ, °ซ

1.5 คุณสมบัติอากาศชื้น

คุณสมบัติอากาศชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wilhelm (1976)

2. ขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณเริ่มต้นที่สมการ (12) โดยสมมุติค่า $W_f + 0.02$ จะคำนวณได้ค่า W_{mix} จากนั้นใช้สมการ (9) คำนวณค่า T_{f1} , คำนวณค่า T_{f2} , และ T_{f3} จากสมการสมดุลพลังงานตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากนั้นคำนวณค่า T_f จากสมการ (13), คำนวณค่า T_{ww} จากสมการ (14)

และคำนวณค่า T_{www} ได้จากสมการสมดุลพลังงานตามที่กล่าวมาแล้ว

ค่า T_{mix} เป็นค่าที่รู้แล้ว จึงคำนวณค่า RH ได้แล้วคำนวณค่า M_{eq} จากสมการ (4) หลังจากนั้นไปคำนวณค่า M_f จากอนุพันธ์ที่เทียบกับเวลาของสมการ (1) และคำนวณ W_f ใหม่จากสมการ (10) เมื่อได้ค่า W_f ใหม่แล้ว เปรียบเทียบกับค่า W_f ที่สมมุติมาก่อน

ถ้าผลต่างระหว่าง W_f ใหม่ กับ W_f ที่สมมุติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) ก็กลับไปคำนวณใหม่โดยใช้ค่า W_f ใหม่แทนค่าที่สมมุติมาก่อน ถ้าผลต่างระหว่าง W_f ใหม่กับ W_f ที่สมมุติน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) ก็คำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์ลมร้อนที่ออก

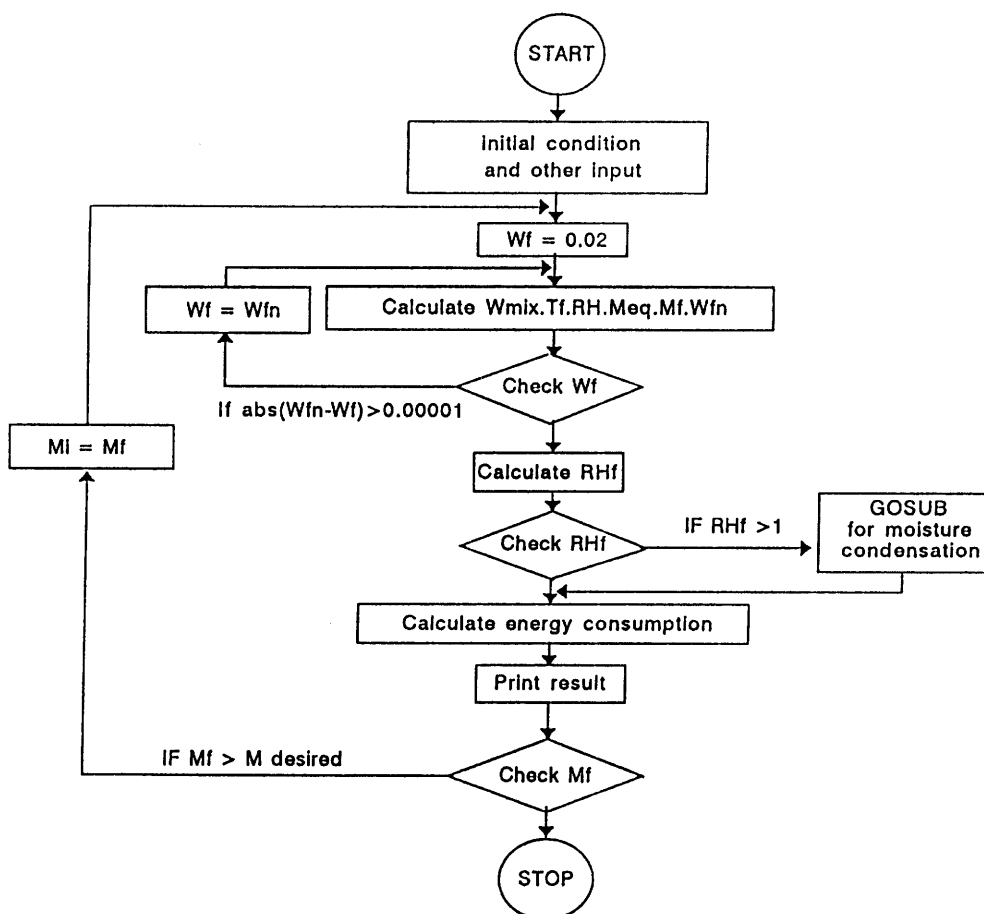


Figure 2 Computer simulation flow chart.

จากเครื่องอบแห้ง (RH) แล้วตรวจสอบค่า RH ถ้าค่า RH เป็นจริง ($RH < 1$) ก็ทำการคำนวณขั้นต่อไป แต่ถ้า RH ไม่เป็นจริง ($RH > 1$) ก็ไปคำนวณ subprogram moisture condensation (Soponronnarit, 1987) แล้วจึงคำนวณขั้นต่อไป คือคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงาน แล้วจึงแสดงผลการคำนวณ (ดูแผนผังการคำนวณใน Figure 2)

3. วิธีการทดลอง

ใช้สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียร์หั่นเป็นแว่นกลม เจาะแกนออก มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6 เซนติเมตร และหนาประมาณ 1 เซนติเมตร นำมาล้างด้วยไอน้ำประมาณ 15 นาที แล้วทำให้เย็นทันที หลังจากนั้นนำไปแช่ในน้ำเชื่อมซึ่งมีความเข้มข้นเริ่มต้น 45 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิน้ำเชื่อมประมาณ 90 องศาเซลเซียส เพิ่มความเข้มข้นของน้ำเชื่อมทุกๆ วัน วันละ 10 องศาบริกซ์ จนกระทั่งความเข้มข้นสุดท้ายเป็น 10 องศาบริกซ์ เติมน้ำโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ 0.1% โดยน้ำหนักของน้ำเชื่อม (Tanafranca et al., 1985) ความชื้นเริ่มต้นของสับปะรดเชื่อมที่เตรียมได้มีค่าประมาณร้อยละ 65 มาตรฐานแห้ง

แต่ละครั้งจะทำการอบแห้งสับปะรดเชื่อมประมาณ 5 กิโลกรัม แบ่งใส่ถาดอบปรับอัตราการไหลของอากาศและอุณหภูมิอบแห้งภายในตู้อบแห้งให้ได้ตามต้องการ จึงใส่ถาดอบสับปะรดเชื่อมในตู้อบแห้ง ระหว่างการทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าตู้อบ และอุณหภูมิอากาศออกจากตู้อบ นอกจากนี้วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อมและอากาศขาออกจากตู้อบ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด Chromel-Alumel ต่อเข้ากับ data logger อ่านได้ละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ วัดอุณหภูมิทุกๆ ครึ่งชั่วโมง ตลอดการทดลองเก็บตัวอย่างของสับปะรดเชื่อมทุกๆ ถาดอบ ทุกๆ 5 ชั่วโมงจาก 3 บริเวณ คือ ที่ริมถาดอบทั้งสองด้าน และตรงกลางถาดอบ ทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ สามารถอ่านได้ละเอียด ± 0.01 กรัม บันทึกความสิ้นเปลืองพลังงานที่อ่านได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าทุกๆ 5 ชั่วโมง ทำการอบแห้งจนได้ความชื้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ

23 มาตรฐานแห้ง ซึ่งน้ำหนักของสับปะรดเชื่อมหลังอบแห้ง นำตัวอย่างเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ $0.3 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นของสับปะรดเชื่อมต่อไป ส่วนอัตราการไหลของอากาศนั้นหาได้โดยการวัดความเร็วลมด้วย hot wire anemometer สามารถอ่านได้ละเอียด ± 0.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งได้สอบเทียบกับ pitot static tube แล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หลังการอบแห้ง โดยการตรวจสอบสีของผลิตภัณฑ์โดยใช้ R.H.S. Color chart และวัดคุณภาพด้านอื่น เช่น วิตามินซี, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และน้ำตาล

ผลและวิจารณ์

1. การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 65°C โดยนำไปเขียนกราฟจะได้ตาม Figure 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความชื้นเฉลี่ยของสับปะรดเชื่อมที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลอง

ส่วนค่าอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้ง โดยนำไปเขียนกราฟจะได้ตาม Figure 4 พบว่า อุณหภูมิที่ออกจากเครื่องอบแห้งที่ได้จากแบบจำลอง ทั้งอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกใกล้เคียงกับการทดลอง โดยจากแบบจำลองสูงกว่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย ทั้งอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่ได้จากแบบจำลองสูงกว่าของการทดลอง

2. ลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง

จากการอบแห้งสับปะรดเชื่อมที่สภาวะต่างๆ จำนวน 5 ถาด ซึ่งวางซ้อนกันภายในบริเวณตู้อบแห้ง โดยทำการทดลองเก็บตัวอย่างจาก 3 บริเวณ คือบริเวณ a, b และ c ทุกๆ 5 ชั่วโมง นำมาเขียนกราฟจะได้ตาม Figure 5 พบว่า ความชื้นของสับปะรดเชื่อมที่อยู่บริเวณด้านริม

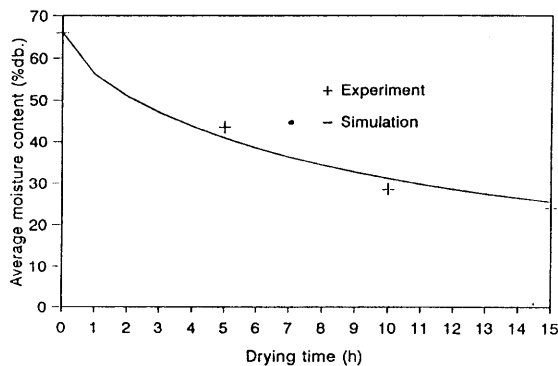


Figure 3 Evolution of simulated and experimental moisture content [Test No.3]
[Fraction of air recycled = 73%, Temperature = 66°C]
[Specific mass flow rate = 45.4 kg/h-kg dry pineapple glaze'].

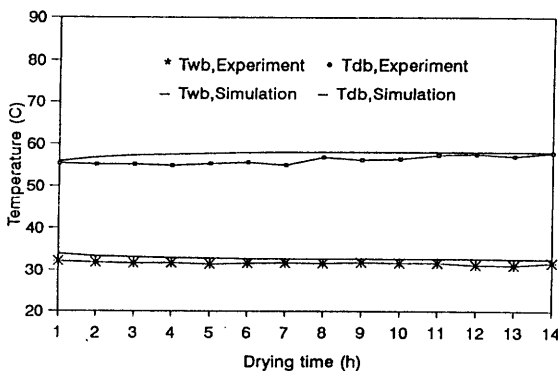


Figure 4 Evolution of outlet temperature [Test No.3]
[Fraction of air recycled = 73%, Temperature = 66°C]
[Specific mass flow rate = 45.4 kg/h-kg dry pineapple glaze'].

ของถาดอบซึ่งสัมผัสกับลมร้อนก่อน จะมีความชื้นลดลงมากกว่าตรงกลางของถาดอบ และด้านริมของถาดอบอีกด้านหนึ่ง และที่แต่ละชั้นของถาดอบแม้จะเป็นบริเวณเดียวกันก็ตาม ปรากฏว่าความชื้นลดลงไม่เท่ากันเนื่องจากการกระจายของลมร้อนยังไม่ดีพอ

เงื่อนไขของสับปะรดแช่อิ่ม เช่นความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มในช่วงเวลาต่างๆ ขณะทำการอบแห้ง มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง เมื่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

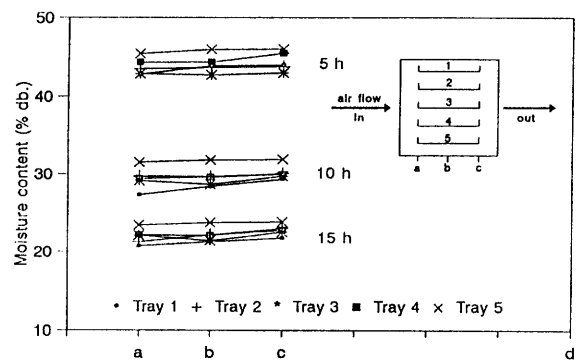


Figure 5 Moisture gradient along air flow direction [Test No.3]
[Fraction of air recycled = 73%, Temperature = 66°C]
[Specific mass flow rate = 45.4 kg/h-kg dry pineapple glaze'].

เพิ่มขึ้นความชื้นของสับปะรดแช่อิ่มลดลงทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งย่อมมีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานคือเมื่ออัตราการอบแห้งลดลงจะทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานเพิ่มมากขึ้น

3. คุณภาพของผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิลมร้อนที่มีต่อคุณภาพของสับปะรดแช่อิ่ม โดยสังเกตจากสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อนต่างๆ พบว่าสีของสับปะรดแช่อิ่มที่อบที่อุณหภูมิ 80°C (ใน 5 ชั่วโมงแรก) 65°C ในเวลาต่อมา จะมีสีเข้มกว่าและผิวแข็งกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับของสับปะรดแช่อิ่มที่อบที่อุณหภูมิ 65°C ตลอดการทดลอง ซึ่งมีสีและความแข็งของผิวใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด ส่วนปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ ปริมาณน้ำตาลรวมที่มีอยู่ในสับปะรดแช่อิ่มอบแห้ง กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดให้มีได้ไม่เกิน 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำการอบแห้งนี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับปริมาณวิตามิน C ปรากฏว่าตรวจไม่พบในทุกๆ ตัวอย่าง รายละเอียดผลการทดลองด้านคุณภาพมีปรากฏใน Table 1

Table 1 Qualities of pineapple glace' from experiments and from local market.

Drying temp.	R.H.S. color chart	Total Sugar (%)	SO ₂ (mg/kg)	Vitamin C (mg/kg)	Appearance of pineapple glace'
48°C	14-A	90.46	138	none	yellow, dry on outer surface, somewhat soft and succulent
65°C	15-A	87.83	38	none	yellow, dry on outer surface, somewhat soft and succulent
80°C (5 h)	17-B	N.A.	31	none	yellow, dry and hard on outer surface
65°C TAVEEPOL Co.,Ltd.	13-B	84.31	250	none	yellow, dry on outer surface, somewhat soft and succulent
SAKULSUK Co.,Ltd.	15-A	83-69	N.A.	none	yellow, dry on outer surface, somewhat soft and succulent

Table 2 Experimental results of pineapple glace' drying.

Description	Test no.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Drying air condition										
temperature (°C)	48.4	68.5	66.0	68.7	68.2	68.9	69.8	69.9	80.0,	90.0,
specific mass flow rate									65.0	68.0
(kg dry air/h·kg dry product)	114.2	42.9	45.4	20.0	18.0	18.2	8.2	7.5	8.4	9.4
fraction of air recycled (%)	31.0	61.0	73.0	79.0	80.0	81.1	74.0	87.0	87.0	87.0
Ambient condition										
temperature (°C)	31.3	31.2	31.4	31.3	31.4	31.7	31.3	31.4	31.6	31.7
relative humidity (%)	65.0	64.0	65.0	68.0	68.0	66.0	66.0	68.0	70.0	70.0
Condition of pineapple glace'										
before drying (%db.)	48.4	67.0	66.0	66.0	58.0	64.0	65.0	61.0	67.7	69.7
after drying (%db.)	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	22.7	23.0	23.0
initial weight (kg)	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.8	4.8	4.7	4.5	4.0
Specific energy consumption										
Heater (MJ/kg-H ₂ O evap.)	132.8	48.4	42.6	31.0	32.3	30.6	27.0	24.8	21.5	22.4
Motor (MJ/kg-H ₂ O evap.)	15.4	7.4	8.7	9.2	11.0	9.2	3.8	3.5	3.2	2.9
Total (MJ/kg-H ₂ O evap.)	148.2	55.8	51.3	40.2	43.3	39.8	30.8	28.3	24.7	25.3
Specific primary energy consumption (MJ/kg-H₂O evap.)										
	172.8	67.6	65.2	54.9	60.9	54.5	36.9	34.7	29.8	29.9
Drying time (h)	20.0	13.5	13.5	10.0	10.0	10.0	15.0	18.0	13.0	14.0

4. การหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม

จากผลการทดลอง 10 ครั้ง โดยแปรค่าอุณหภูมิ อัตราการไหลและอัตราส่วนเวียนกลับ ได้แนวโน้มชัดเจน และสอดคล้องกับผลจากการจำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปว่าตัวแปรทั้งสามมีผลต่อคุณภาพเวลาการอบแห้ง และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง รายละเอียดของผลการทดลองแสดงอยู่ใน Table 2 อย่างไรก็ตามเรายังไม่สามารถสรุปหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมจากการทดลองได้ ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นช่วยในการศึกษานี้

โดยกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้ ความชื้นเริ่มต้น

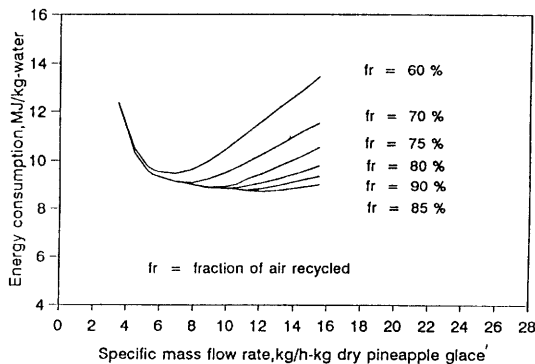


Figure 6 Effect of specific mass flow rate on energy consumption at different fraction of air recycled
[Temperature = 65°C, Thickness of pineapple glaze' = 1 cm].

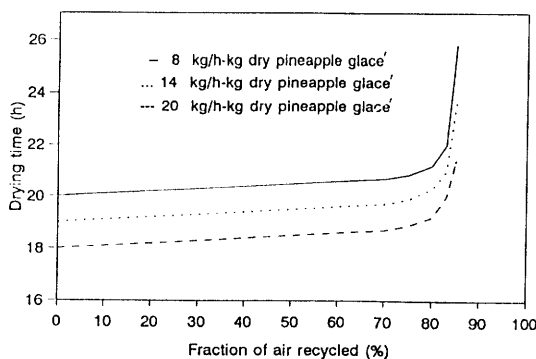


Figure 7 Effect of fraction of air recycled on drying time at different specific mass flow rate
[Temperature = 65°C, Thickness of pineapple glaze' = 1 cm].

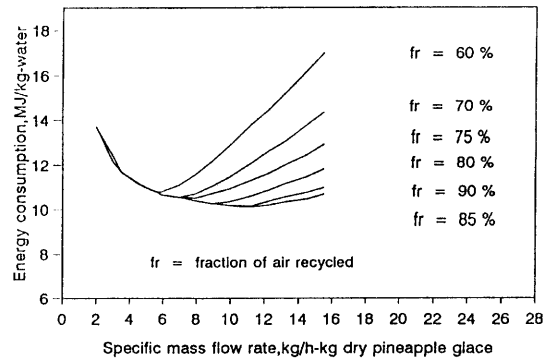


Figure 8 Effect of specific mass flow rate on energy consumption at different fraction of air recycled
[Temperature = 65°C, Thickness of pineapple glaze = 2cm].

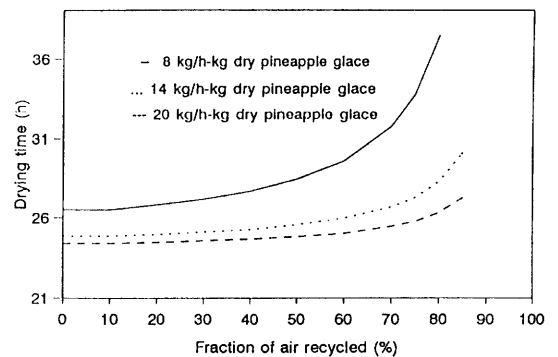


Figure 9 Effect of fraction of air recycled on drying time at different specific mass flow rate
[Temperature = 65°C, Thickness of pineapple glaze = 2 cm].

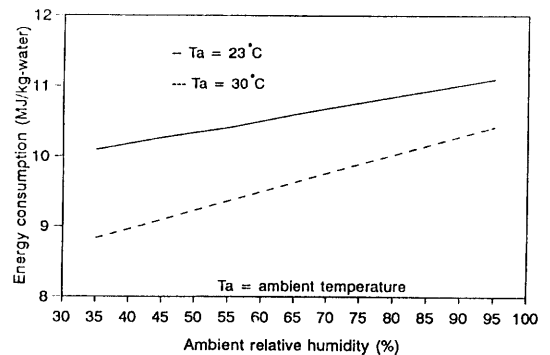


Figure 10 Effect of ambient relative humidity on energy consumption at different ambient temperature [Fraction of air recycled = 80%]
[Specific mass flow rate = 12.05 kg/h-kg dry pineapple glaze].

ของสับปะรดเชื่อมร้อยละ 65 มาตรฐานแห้ง, ความชื้นครั้งสุดท้าย 23% มาตรฐานแห้ง น้ำหนักก่อนอบแห้ง 10 กิโลกรัม มวลแห้ง 6.06 กิโลกรัม อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นอากาศแวดล้อมเท่ากับ 30°C และ 0.02 กิโลกรัม/กิโลกรัมอากาศแห้งตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิที่ใช้อบแห้ง คืออุณหภูมิ 65°C เพราะจากผลการทดลองผลิตภัณฑ์ที่ได้ใกล้เคียงกับท้องตลาดมากที่สุด ซึ่งผลจากการคำนวณอยู่ใน Figures 6-10 พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแบ่งออกได้เป็นไฟฟ้าซึ่งใช้ขับเคลื่อนและความร้อนที่ใช้ในการอุ่นอากาศให้ร้อน เนื่องจากในการอบแห้งแบบดุ้นใช้ไฟฟ้าน้อยมาก ดังนั้นจึงขอเสนอเฉพาะในรูปแบบพลังงานรวมเท่านั้น

Figure 6 แสดงผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C ความหนาของสับปะรดเชื่อม 1 เซนติเมตร พบว่าที่อัตราส่วนอากาศเวียนกลับคงที่ค่าหนึ่ง จะมีช่วงอัตราการไหลเฉพาะของอากาศที่ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด ถ้าอัตราการไหลเฉพาะของอากาศมีค่าน้อยหรือมากกว่านี้ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้นสำหรับกรณีที่อัตราการไหลเฉพาะมีค่าสูง เนื่องจากสภาวะอากาศภายหลังการอบแห้งยังมีความชื้นในอากาศต่ำอยู่และอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการสูญเสีย ในทางตรงกันข้ามเมื่ออัตราการไหลเฉพาะของอากาศมีค่าต่ำเกินไป สภาวะอากาศภายหลังการอบแห้งจะมีความชื้นสูง และอุณหภูมิต่ำ ทำให้เวลาที่ใช้ในการอบแห้งมากดัง Figure 7 เป็นผลทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมาก

จาก Figure 7 เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่าค่อนข้างคงที่เมื่อสัดส่วนการนำเอาอากาศที่ใช้ออบแห้งแล้วมาใช้ใหม่มีค่าไม่สูงกว่าร้อยละ 70 จากนั้นจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้นหากพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานร่วมกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง อาจสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C คือที่ อัตราการไหลเฉพาะของอากาศประมาณ 11 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมสับปะรดแห้ง โดยใช้ค่าสัดส่วนการนำเอาอากาศที่ใช้ออบแห้งแล้วประมาณร้อยละ 75 จะได้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะประมาณ 9.5 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และเวลาที่ใช้ออบแห้งประมาณ 20

ชั่วโมง

Figure 8-9 แสดงผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C แต่ความหนาของสับปะรดเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เซนติเมตร ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับกรณีที่สับปะรดเชื่อมหนา 1 เซนติเมตร แต่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมากกว่าที่ เป็นเช่นนี้เพราะว่าการแพร่ความชื้นในชั้นสับปะรดที่หนากว่าจะใช้เวลามากกว่าชั้นที่บาง กว่า ดังนั้นจึงสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่า

Figure 10 แสดงอิทธิพลของสภาวะอากาศภายนอกที่ใช้ในการอบแห้งที่มีผลต่อค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงหรือความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะสูงขึ้นทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือความชื้นสัมพัทธ์สูงจะมีความสามารถในการรับน้ำที่ระเหยออกจากสับปะรดเชื่อมได้น้อย ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งมาก ซึ่งมีผลทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงด้วย

สรุป

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งสับปะรดเชื่อมสามารถทำนายการอบแห้งได้ดีพอสมควร โดยที่อัตราการอบแห้งช่วงแรกจะลดลงเร็วกว่าการทดลองเล็กน้อยและในช่วงท้ายจะกลับกัน ในการอบแห้งนั้นควรคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสมควรอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C อัตราการไหลเฉพาะของอากาศประมาณ 11 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมสับปะรดแห้ง และสัดส่วน การนำเอาอากาศที่อบแห้งแล้วมาใช้ใหม่ประมาณร้อยละ 75

เอกสารอ้างอิง

อารีย์ เทียนไชย และสมชาติ โสภณธณฤทธิ 2534, การศึกษาหาพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งสับปะรดเชื่อม, วิทยาการเกษตรศาสตร์ (วิทย.), 25

- (2) : 206-218.
- Bhumiratana, S., S. Tripetchkul, T. Yoovidhya, B. Boonnag and N. Patamayothin. 1988. Inplant improvements of papaya glace' production, Annual Report, ASEAN Food Technology Research and Development Project, ASEAN Working Group on Food Technology Research and Development, Bangkok, 17 p.
- Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion, 2 nd ed., Clarendon Press, Oxford, 414 p.
- Levi, A., S. Gagel, and B.J. Juven, 1983, Intermediate-moisture tropical fruit products for developing countries I, technology data on papaya, Journal of Food Technology, 18 : 667-685.
- Moy, J.H., and M.J.L. Kuo, 1985, Solar osmotic dehydration of papaya, Journal of Food Engineering, 8 : 23-24.
- Soponronnarit, S. 1987. Drying in bulk storage of high moisture grain in the kingdom of Thailand, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok, Final Report.
- Soponronnarit, S., S. Achariyaviriya and P. Tasaso. 1992. Optimum strategies for drying papaya glace', ASEAN Food Journal, 7 (1) : 17-23.
- Tanafranca, D.E., L.B. Farre, L.C. Angeles and M.R. Soriano, 1985, Dehydration technologies of some Phillippine fruits, Proc. Food Research and Technology, 5th ASEAN Working Group, Bangkok, 109-110.
- Wilhelm, L.R. 1976, Numerical calculation on psychrometric properties in SI units, Trans. ASEA, 19 (2) : 318-321, 325.