

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มในอุโมงค์

Factors Affecting Papaya Glace' Drying in Tunnel

ปิยรัตน์ หนูสุก¹ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์² ทิพาพร อยู่วิทยา¹
และ อติศักดิ์ นาถกรณกุล²

Piyarat Noosuk, Somchart Soponronnarit, Tipaporn Yoovidhya,
and Adisak Nathakaranakule

ABSTRACT

The strategies for papaya glace' drying in tunnel were investigated. This experiment was performed at the fourth Royal Project Food Processing Section. The optimum conditions of drying, corresponding mathematical models were also evaluated. The criteria set for this study included low drying time, low specific energy consumption and acceptable qualities of papaya glace'. The drying rate obtained from the model of batch tunnel dryer were close to the experimental ones. From the mathematical models, it was found that the optimum conditions of the first step of drying for the dimension of papaya glace' of $3.1 \times 7.8 \times 1.4 \text{ cm}^3$ and drying temperature of 70°C were specific air flow rate of $12 \text{ kg/h-kg dry papaya glace'}$ and air recycled of about 70 %. In the second step of drying for the dimension of papaya glace' of $0.98 \times 0.98 \times 0.98 \text{ cm}^3$ and drying temperature of 55°C , it was found that the optimum drying conditions were specific air flow rate of $10 \text{ kg/h-kg dry papaya glace'}$ and air recycled of about 80 %.

Key words: papaya glace', tunnel drying, drying

บทคัดย่อ

การศึกษาหาวิธีการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มที่เหมาะสมที่ใช้เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่

เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะค่า และคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าอัตราการอบแห้งจากการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลอง

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Suksawat Bangkok 10140, Thailand

² สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Department of Energy Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Suksawat Bangkok 10140, Thailand

จากการศึกษาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองพบว่าสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม สำหรับการอบแห้งในช่วงแรก ที่ขนาดมะละกอแช่แข็ง $3.1 \times 7.8 \times 1.4$ ซม.³ และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C คือที่อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 12 กิโลกรัม/อากาศแห้ง/ชั่วโมง-กิโลกรัมมะละกอแช่แข็งแห้ง และอัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 70% สำหรับการอบแห้งในช่วงที่สอง ได้นำมะละกอแช่แข็งจากช่วงแรกมาลดขนาดเป็น $0.98 \times 0.98 \times 0.98$ ซม.³ พบว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 55°C สภาวะที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งคือ อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 10 กิโลกรัม/อากาศแห้ง/ชั่วโมง-กิโลกรัมมะละกอแช่แข็งแห้ง และอัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 80%

คำนำ

มะละกอเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งปลูกง่ายได้ผลเร็วแต่ถ้ามีปริมาณมากเกินไปความต้องการราคาจะถูก และถ้าจำหน่ายไม่หมดในเวลาอันควรจะเน่าเสีย ก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้นได้มีการนำมะละกามาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ โดยการทำเป็นมะละกอแช่แข็งอบแห้ง ซึ่งอาจอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบตู้ (cabinet dryer) หรือถ้าผลิตเป็นจำนวนมากในระดับโรงงานอุตสาหกรรมก็จะใช้เครื่องอบแห้งที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นแบบอุโมงค์ (tunnel dryer) สำหรับการอบแห้งในอุโมงค์สามารถแบ่งได้เป็น การอบแห้งแบบเป็นงวด การอบแห้งแบบไหลตามและแบบไหลสวนทางของอากาศและผลิตภัณฑ์ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศและปริมาณการนำเอาอากาศที่ใช้ออบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ การดำเนินการทดลองเพื่อหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมนั้นจะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่าย

อย่างมาก ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาก็คือ การจำลองสภาพการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Soponronnarit *et al.* (1992) ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะละกอแช่แข็งในตู้อบแห้งและศึกษาหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสม จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลจากการคำนวณ พบว่าอัตราการอบแห้งจากการคำนวณสูงกว่าของการทดลองเล็กน้อย ในการศึกษาครั้งนี้จนถึงเวลาที่ใช้อบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่าควรอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ใช้อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ $35 \text{ kg/h-kg dry papaya glace}$ (และสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 80-85% Gentry *et al.* (1965) ศึกษาการอบแห้งลูกพรุนในอุโมงค์อบแห้ง พบว่าการอบแห้งในอุโมงค์แบบไหลตามสามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงถึง 90°C แต่สำหรับการอบแบบไหลสวนทางนั้นใช้อุณหภูมิอบแห้งได้ สูงเพียง 71°C จึงจะไม่ทำให้คุณภาพของลูกพรุนสูญเสียไป จากการที่การอบแห้งแบบไหลตามสามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งได้สูงกว่า จึงทำให้เวลาที่ใช้อบแห้งน้อยกว่าและกำลังการผลิตมากกว่าแบบไหลสวนทาง 37% แต่สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าแบบไหลสวนทาง 12% Bertin *et al.* (1980) ศึกษาการอบแห้งลูกพรุนแบบกึ่งต่อเนื่องในอุโมงค์แบบไหลตาม จากการเปรียบเทียบผลจากการทดลองกับผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าอุณหภูมิของอากาศและความชื้นของลูกพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปในขณะอบแห้งมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าเมื่อระยะเวลาในอุโมงค์เพิ่มขึ้น อุณหภูมิของอากาศและความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาหาวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะละกอแช่แข็งแบบเป็นงวดในอุโมงค์ ซึ่งทำการทดลองในอุโมงค์

อบแห้งของโรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ 4 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการอบแห้งและศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากเวลาที่ใช้ออบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของผลิตภัณฑ์

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การทดลอง

ใช้มะละกอแช่อิ่ม (ซึ่งมีกระบวนการผลิตตามโรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ 4) เป็น ผลไม้สำหรับการทดลอง โดยนำมะละกอแช่อิ่มเรียงลงในถาดอบแห้งที่วางอยู่ในรถเข็น ซึ่งรถเข็นแต่ละคันสามารถวางถาดอบแห้งได้ 9 ถาด จากนั้นนำรถเข็นเข้าอุโมงค์อบแห้ง ซึ่งสามารถบรรจุรถเข็นได้ทั้งหมด 10 คัน (Figure 1) การอบแห้งนี้เป็นการอบแห้งแบบเป็นวงวน ซึ่งแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วงดังนี้ ในช่วงแรกเป็นการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มขนาดชิ้นใหญ่ โดยใช้อุณหภูมิสำหรับอบแห้ง $65-70^{\circ}\text{C}$ และในช่วงที่สองเป็นการนำมะละกอแช่อิ่มที่ผ่านการอบแห้งใน

ช่วงแรกมาหั่นเล็กลงเป็นลูกเต๋า แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $55-60^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในการอบแห้งทั้งสองช่วงนี้ มีการสลับรถเข็นภายในอุโมงค์เมื่ออบแห้งไปได้เป็นเวลาประมาณครึ่งหนึ่งของเวลาที่ใช้ออบแห้งทั้งหมด โดยย้ายรถเข็นที่อยู่ในตำแหน่งต้นของอุโมงค์ไปยังตำแหน่งท้ายของอุโมงค์ และนำรถเข็นที่ตำแหน่งท้ายอุโมงค์ไปอยู่ที่ตำแหน่งต้นของอุโมงค์แทน ทำการวัดความเร็วของอากาศขาเข้า ที่ท่ออากาศเวียนกลับและที่ท่อทางออกของอุโมงค์ โดยใช้เครื่อง Hot wire anemometer ค่าความถูกต้อง 2% และวัดอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอากาศภายในอุโมงค์ที่ถาดอบแห้งชั้นที่ 1, 5 และ 9 ของรถเข็นตำแหน่งที่ 1, 4, 7 และ 10 (นับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน) (Figure 2) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ค่าความถูกต้อง 1°C ต่อเข้ากับเครื่อง Data logger และบันทึกค่าทุก ๆ ชั่วโมงตลอดการทดลอง ทำการเก็บตัวอย่างมะละกอแช่อิ่มไปหาความชื้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิภายในอุโมงค์อบแห้ง โดยนำไปอบใน Hot air oven ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับการเก็บตัวอย่างมะละกอแช่อิ่มเพื่อหาความชื้น

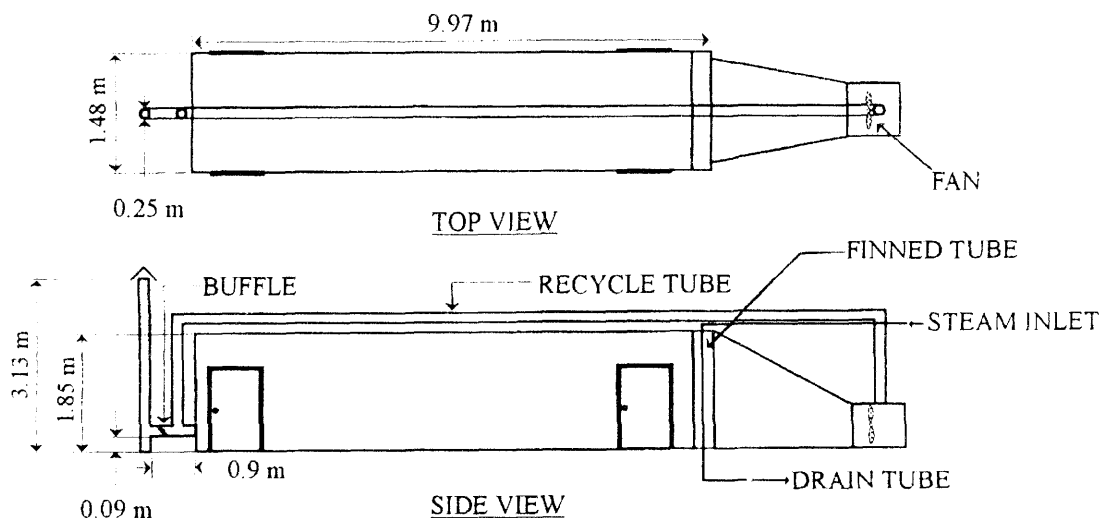


Figure 1 Layout and dimension of a tunnel dryer at the Royal Project Food Processing Section, Factory: Lahansai.

นี้สามารถเก็บตัวอย่างได้เพียงสามช่วงเวลา คือก่อนอบแห้ง ที่ครึ่งเวลาการอบแห้ง(ชั่วโมงที่ 13) ก่อนสลับรถเข็นและเมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง(ชั่วโมงที่ 27) ทั้งนี้ขั้นตอนและวิธีการทดลองเป็นไปตามวิธีการผลิตของโรงงานหลวง นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาถึงคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มหลังอบแห้ง โดยการตรวจสอบสี โดยใช้ R.S.H. Color chart และวัดคุณภาพด้านเคมี ได้แก่ ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง ปริมาณน้ำตาล และปริมาณกรด

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งในอุโมงค์

ในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองของ Soponronnarit (1988) มาใช้ทำนายการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มในอุโมงค์ โดยมีข้อสมมุติฐานที่สำคัญคือ มีสมดุลทางความร้อนระหว่างอากาศชื้นและมะละกอแช่อิ่ม การไหลของอากาศเป็นแบบลูกสูบหรือจุด และมีการเคลื่อนที่ของอุณหภูมิ ภายในอุโมงค์อบแห้งในทิศทางตามแนวยาวของอุโมงค์เพียงทิศทางเดียว

การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มาทำนายการอบแห้งมะละกอแช่อิ่ม กระทำได้โดยแบ่งอุโมงค์อบแห้งออกเป็นส่วนบางหลาย ๆ ส่วน (Figure 3) จากนั้นพิจารณาที่ส่วนบาง ณ ส่วนใดส่วนหนึ่ง ในอุโมงค์อบแห้งในช่วงเวลาหนึ่ง (Figure 4) ซึ่งแบ่งขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้

2.1 การคำนวณความชื้นของมะละกอแช่อิ่มหลังการอบแห้ง

คำนวณหาความชื้นของมะละกอแช่อิ่ม โดยใช้สมการการแพร่ความชื้นรูปทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$MR(t) = [8 / \pi^2]^3 \sum_{i=0}^{\alpha} \sum_{j=0}^{\alpha} \sum_{k=0}^{\alpha} [1 / (2j+1)^2 \cdot 1 / (2j+1)^2 \cdot 1 / (2k+1)^2]$$

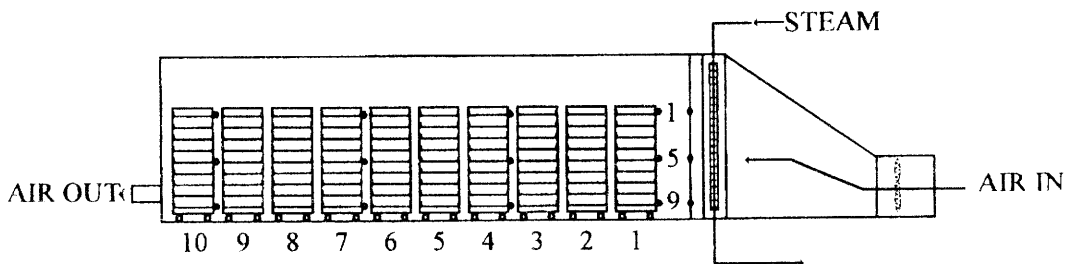
$$\exp[-(2i+1)^2/l_x^2 + (2j+1)^2/l_y^2 + (2k+1)^2/l_z^2] \pi^2 D t] \quad (1)$$

จากการศึกษาของ ศิวะ และสมชาติ (2533) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมะละกอแช่อิ่ม ในช่วงอุณหภูมิ 40-80°C เป็นไปดังสมการ

$$D = 0.000917000 \exp[-2877.49/(T+273)] \quad (2)$$

และจากการศึกษาของ ศิวะ และสมชาติ (2533) พบว่าความชื้นสมดุลของมะละกอแช่อิ่ม มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศดังสมการ

$$RH / [(1-RH)(M_{eq})] = [1 / (M_m C)] + [(C-1)(RH) / (M_m C)] \quad (3)$$



- = Positions for measuring inlet air temperature in front of heat exchanger
- = Positions for measuring air temperature and moisture content of papaya glaze'

Figure 2 Positions of measuring air temperature and moisture content of papaya glaze' in tunnel dryer.

เมื่อ $C = 163.15 \exp(-0.064700 T)$ (4)

$M_m = 3.1987 + (0.14077 T)$ (5)

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ในสมการ (1)-(5) มีความหมายดังนี้

MR(t) คือ อัตราส่วนความชื้น (เศษส่วน) = $(M(t) - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$

M(t) คือ ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใดๆ (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

M_{in} คือ ความชื้นเฉลี่ยก่อนการอบแห้ง (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/h)

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ทศนิยม)

T คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง ($^{\circ}C$)

t คือ เวลาการอบแห้ง (h)

L คือ ขนาดของมะละกอแช่แข็ง (m)
จากสมการที่ (1) สามารถหาความชื้นเฉลี่ยที่

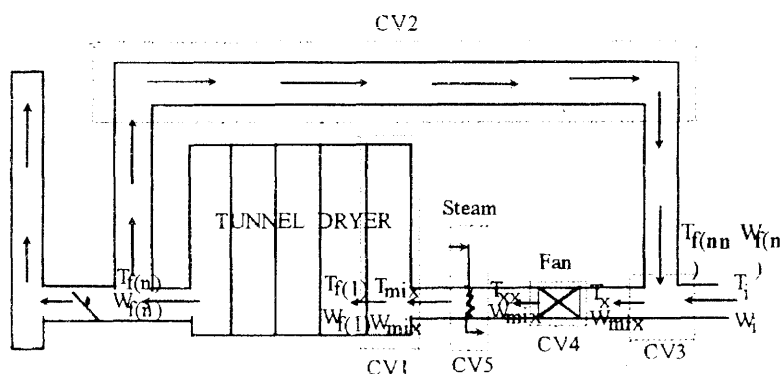


Figure 3 Control volume of tunnel dryer.

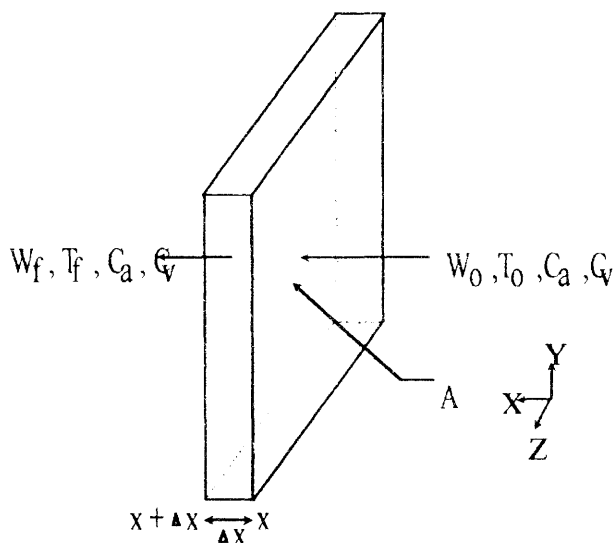


Figure 4 Thin layer of control volume 1 (CV1).

เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ โดยหาอนุพันธ์ของสมการ (1) เทียบกับเวลา และใช้วิธีของ Runge-Kutta (Gerald and Wheatley, 1984)

2.2 การคำนวณสภาวะอากาศภายหลังการอบแห้ง

พิจารณาที่ส่วนของชั้นบางของปริมาตรควบคุม (CV1) (Figure 4) สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักทรงมวลและทรงพลังงานดังนี้ ความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากมะละกอแช่

$$W_f - W_o = (M_o - M_f)R \quad (6)$$

เมื่อ W คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศ ($\text{kg-H}_2\text{O/kg-dry air}$)

R คือ อัตราส่วนของมวลผลไม้แห้งต่อมวลอากาศแห้ง

และผลรวมของความแตกต่างของเอนทัลปีของกระแสอากาศชื้นที่ไหลเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของมะละกอแช่กับความร้อนที่สูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม

$$C_a T_o + W_o(h_{fg} + C_v T_o) + RC_{pw}\theta - C_a T_f - W_f(h_{fg} + C_v T_f) - RC_{pw}T_f = Q_1 \quad (7)$$

เมื่อ h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg)

C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของมะละกอแช่ ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$)

θ คือ อุณหภูมิของมะละกอแช่ก่อนอบแห้ง ($^\circ\text{C}$)

Q_1 คือ การสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (kJ/kg dry air)

สัญลักษณ์กำกับล่าง : a คือ อากาศแห้ง

v คือ ไอน้ำ

o คือ อากาศขาเข้าส่วนของชั้นบาง

f คือ อากาศขาออกจากส่วนของชั้นบาง

pw คือ มะละกอแช่

ขั้นตอนการคำนวณนี้ จะพิจารณาที่ส่วนบางส่วนหนึ่ง ๆ เท่านั้น และสมมติว่าอากาศตรงทางออกของส่วนบางส่วนแรก เป็นอากาศตรงทางเข้าของส่วนบางส่วนถัดไป การคำนวณเช่นนี้จะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงส่วนสุดท้ายของอุโมงค์อบแห้ง หลังจากนั้นก็จะเพิ่มช่วงเวลาการอบแห้งขึ้นอีกครั้งละ Δt การคำนวณจะสิ้นสุดเมื่อเวลาการอบแห้งรวมมากกว่าหรือเท่ากับเวลาที่ตั้งไว้

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV2) ใน Figure 3 จากหลักการทรงพลังงาน จะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศที่เข้าและออกจากปริมาตรควบคุมเท่ากับความร้อนที่สูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม

$$C_a T_{f(n)} + W_{f(n)}(h_{fg} + C_v T_{f(n)}) - C_a T_{f(nn)} - W_{f(n)}(h_{fg} + C_v T_{f(nn)}) = Q_2 \quad (8)$$

เมื่อ Q_2 คือ การสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม (kJ/kg dry air)

2.3 การคำนวณความชื้นและอุณหภูมิของอากาศผสมและการนำอากาศมาใช้ใหม่

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV3) ใน Figure 3 จากหลักทรงมวลของน้ำในลมร้อนก่อนอบแห้งเท่ากับผลรวมของมวลของน้ำในอากาศใหม่กับมวลของน้ำในอากาศร้อนที่เวียนกลับมาใช้ใหม่ เมื่อจัดรูปสมการสามารถเขียนได้เป็น

$$W_{mix} = (1 - RC)W_i + RC W_{f(n)} \quad (9)$$

โดยที่ RC คือ สัดส่วนการนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาใช้ใหม่ = $mrc / mmix$

m คือ อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง (kg/h)

และจากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่าเอนทัลปี

ของกระแสอากาศเข้าเท่ากับเอนทัลปีของกระแสอากาศออกจากปริมาตรควบคุม เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$T_x = (m_i C_a T_i + m_i W_i (h_{fg} + C_v T_i) + m_{rc} C_a T_{f(nn)} + m_{rc} W_{f(n)} (h_{fg} + C_v T_{f(nn)}) - m_{mix} W_{mix} h_{fg}) / (m_{mix} C_a + m_{mix} W_{mix} C_v) \quad (10)$$

เมื่อ T_x คือ อุณหภูมิของอากาศผสมก่อนเข้าพัดลม ($^{\circ}\text{C}$)

สัญลักษณ์กำกับล่าง : rc คือ อากาศที่เวียนกลับมาใช้ใหม่

I คือ อากาศแวดล้อม

mix คือ อากาศผสมก่อนเข้าอุโมงค์อบแห้ง

2.4 แบบจำลองการสิ้นเปลืองไฟฟ้า

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV4) ใน Figure 3 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศ เท่ากับกำลังงานของเพลลาที่ขับเคลื่อนพัดลม เมื่อสมมุติค่าความร้อนที่สูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมมีค่าน้อยมาก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_{mix} (C_a + W_{mix} C_v) (T_{xx} - T_x) = W_s \quad (11)$$

เมื่อ T_{xx} คือ อุณหภูมิของอากาศออกจากพัดลม ($^{\circ}\text{C}$)

W_s คือ กำลังงานเพลลาสำหรับขับเคลื่อนพัดลม (kJ/h)

2.5 แบบจำลองการสิ้นเปลืองความร้อน

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV5) ใน Figure 3 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วยตัวอุ่นอากาศ เมื่อสมมุติค่าความร้อนที่สูญเสียระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมมีค่าน้อย

มาก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m_{mix} (C_a + W_{mix} C_v) (T_{mix} - T_{xx}) = Q_h \quad (12)$$

เมื่อ T_{mix} คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแหล่งให้ความร้อน ($^{\circ}\text{C}$)

Q_h คือ ความร้อนที่ได้รับจากแหล่งความร้อน (kJ/h)

2.6 คุณสมบัติอากาศชื้น

คุณสมบัติอากาศชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wilhelm (1976)

3. ขั้นตอนการคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

แบ่งอุโมงค์อบแห้งออกเป็นส่วนบางหลาย ๆ ส่วน ($i = n$) แล้วคำนวณทีละส่วน ($i = 1$ ถึง n) การคำนวณเริ่มต้นที่สมการ (9) โดยสมมุติค่า $W_{f(n)} = 0.02$ แล้วคำนวณหาค่า W_{mix} โดยกำหนดค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้ง T_{mix} และใช้ค่า W_{mix} ที่คำนวณได้จะสามารถหาค่า $RH_{(i)}$ ของอากาศอบแห้งได้ คำนวณค่า $M_{eq(i)}$ จากสมการ (3) จากนั้นคำนวณค่า $M_{f(i)}$ จากอนุพันธ์ที่เทียบกับเวลาของสมการ (1) และคำนวณค่า $W_{f(i)}$ จากสมการ (6) ใช้สมการ (7) คำนวณค่า $T_{f(i)}$ แล้วตรวจสอบค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนที่ออกจากส่วนของชั้นบาง ($RH_{f(i)}$) ถ้าค่า $RH_{f(i)}$ เป็นจริง ($RH_{f(i)} < 1$) ก็ทำการคำนวณขั้นต่อไป แต่ถ้าค่า $RH_{f(i)}$ ไม่เป็นจริง ($RH_{f(i)} > 1$) ก็ไปคำนวณ Procedure for moisture condensation (Soponronnarit, 1987) จากนั้นทำการตรวจสอบค่า i ถ้าค่า $i < n$ ทำการคำนวณต่อไป โดยให้แทนค่าอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่เข้าสู่ส่วนของชั้นบางถัดไป ($T_{O(i+1)}$ และ $W_{O(i+1)}$) ด้วยค่าอุณหภูมิและ อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ออกจากส่วนของชั้นบางส่วนแรกที่อยู่ติดกัน ($T_{f(i)}$ และ $W_{f(i)}$) ตามลำดับ ถ้า $i > n$ ทำการเปรียบเทียบค่า $W_{f(n)}$ ที่คำนวณได้กับค่า $W_{f(n)}$ ที่สมมุติขึ้น ถ้าผลต่างระหว่าง $W_{f(n)}$ ที่คำนวณได้ กับค่า $W_{f(n)}$ ที่สมมุติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) ให้กลับไป

คำนวณใหม่ โดยใช้ค่า $W_{f(n)}$ ที่คำนวณได้ แทนค่าที่สมมุติขึ้น ถ้าผลต่างระหว่าง $W_{f(n)}$ ที่คำนวณได้กับ $W_{f(n)}$ ที่สมมุติน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) ให้คำนวณขั้นต่อไป คือคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า โดยใช้สมการ (11) และคำนวณค่าความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน โดยใช้สมการ (12) แล้วจึงแสดง

ผลการคำนวณ จากนั้นตรวจสอบเวลาที่ใช้อบแห้ง (Ti) หรือความชื้นสุดท้าย (RMF) ว่าเท่ากับค่าที่ต้องการหรือไม่ ถ้าไม่เท่าให้กลับไปคำนวณซ้ำตั้งแต่เริ่มต้น (สมการ 9) จนได้ค่าความชื้นสุดท้ายเท่ากับค่าที่ต้องการ หรือสิ้นสุดเวลาการอบแห้ง ดูแผนผังการคำนวณ Figure 5

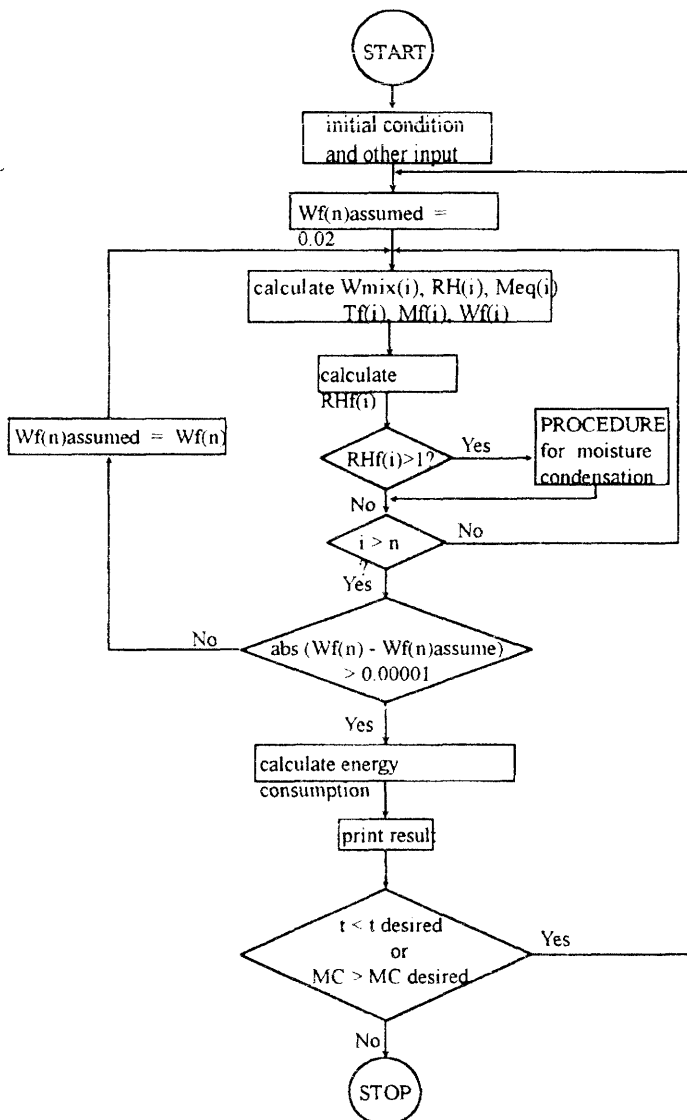


Figure 5 Computer simulation flow chart for batch tunnel drying.

4. การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม

ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาช่วยในการคำนวณหาสภาวะอบแห้งที่เหมาะสม โดยใส่ค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ อุณหภูมิที่ใช้อบแห้งและอัตราส่วนเวียนกลับของอากาศ สำหรับค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา คือเวลาที่ใช้อบแห้งและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้งที่ต่ำ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลและวิจารณ์

1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศและความชื้นของมะละกอแช่อบในอุโมงค์

จากการทดลองอบแห้งมะละกอแช่อบในอุโมงค์ (Table 1) เมื่อเขียนกราฟระหว่างอุณหภูมิของอากาศและความชื้นของมะละกอแช่อบกับตำแหน่งต่าง ๆ ของรถเข็นในอุโมงค์อบแห้ง ที่ช่วงครึ่งเวลาของการอบแห้ง และที่เวลาสุดท้ายของการอบแห้ง ดังแสดงใน Figures 6 และ 7 พบว่าอุณหภูมิของอากาศและการ

Table 1 Experimental results of papaya glaze' drying.

Description	Test No.				
	1	2	3	4	5
Ambient condition					
Average temperature (°C)	25.9	25.5	29.6	28.8	30.7
Average relative humidity (%)	67.7	81.0	80.1	71.8	70.6
Condition of papaya glaze'					
Average moisture before drying (% db)	64.0	62.2	60.6	32.8	29.1
Average moisture after drying (% db)	39.9	38.9	35.8	16.9	14.3
Initial weight (kg)	933.7	849.6	958.3	549.5	520.0
Dimension (cm ³)	6x9.1x1.5	3.1x7.8x1.4	3.4x8.1x1.4	0.98x0.98x0.98	0.98x0.98x0.98
Drying air condition					
Average temperature (°C)	70.0	69.0	71.0	56.0	55.0
Specific mass flow rate (kg dry air/h·kg dry papaya glaze')	17.2	18.8	15.1	15.3	15.2
Fraction of air recycled (%)	43.0	45.0	43.0	42.0	43.0
Specific energy consumption					
Heater (MJ/kg-H ₂ O evap.)	19.6	16.4	16.6	20.4	21.8
Motor (MJ/kg-H ₂ O evap.)	1.7	1.4	1.4	2.6	2.7
Total (MJ/kg-H ₂ O evap.)	21.3	17.8	18.0	23.0	24.5
Specific primary energy consumption					
Heater (MJ/kg-H ₂ O evap.)	19.6	16.4	16.6	20.4	21.8
Motor (MJ/kg-H ₂ O evap.)	4.3	3.7	3.7	6.7	6.9
Total (MJ/kg-H ₂ O evap.)	23.9	20.1	20.3	27.1	28.7
Drying time (h)	27	18	22	18	17

ลดลงของความชื้นของมะละกอเชื่อมในแนวดิ่งจาก ถาดอบแห้งด้านบนของรถเข็นสูงกว่าถาดอบแห้งด้านล่าง ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของลมร้อนที่ออกจาก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่อุโมงค์อบแห้งมีค่า ไม่สม่ำเสมอ และอาจเนื่องจากการกระจายลมร้อน

ภายในอุโมงค์อบแห้งไม่ดีพอ และพบว่าอุณหภูมิของ อากาศภายในอุโมงค์อบแห้งลดลงเมื่อระยะห่างของ รถเข็นจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เพราะการส่งผ่านความร้อนของอากาศไปยังรถเข็นใน ตำแหน่งที่ห่างออกไปมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ความชื้น

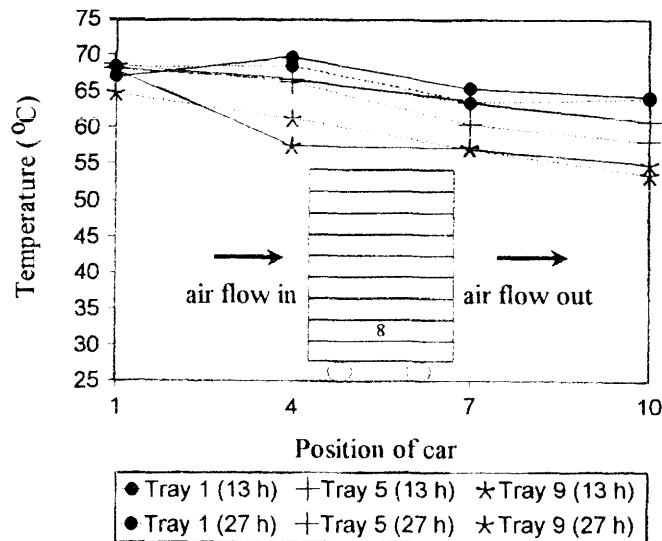


Figure 6 Temperature gradient of air along positions of trays and cars in tunnel dryer (Test No.1).

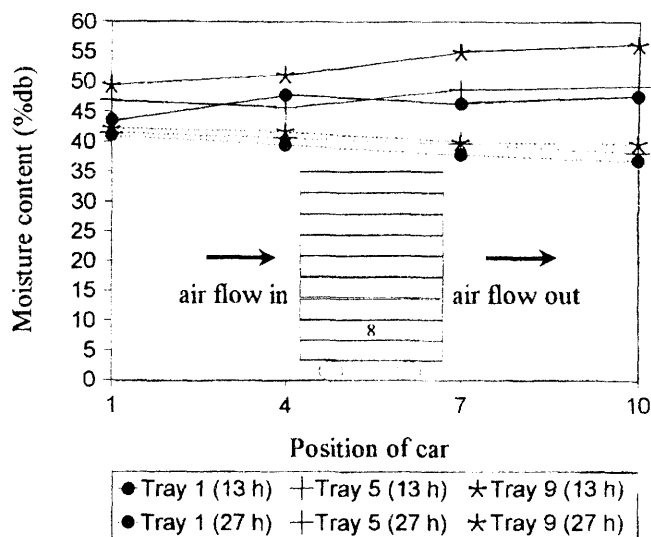


Figure 7 Moisture gradient of papaya glaze' along positions of trays and cars in tunnel dryer (Test No.1).

ของมะละกอแช่ร้อนในรถเข็นตำแหน่งที่ห่างออกไปมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องมีการสลับรถเข็นภายในอุโมงค์อบแห้งเพื่อให้รถเข็นที่อยู่ห่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วงแรกเข้ามาอยู่ใกล้มากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ความชื้นของมะละกอแช่ร้อนมีค่าใกล้เคียงกันตลอดทั้งอุโมงค์อบแห้ง

สำหรับเงื่อนไขของมะละกอแช่ร้อน ซึ่งได้แก่ขนาดและความชื้นของมะละกอแช่ร้อน จะมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ซึ่งพบว่ามะละกอแช่ร้อนที่มีขนาดชื้นที่ใหญ่ใช้เวลานานกว่าขนาดชื้นเล็ก จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากกว่า และถ้าความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่ร้อนมีค่าค่อนข้างต่ำก็ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าต่ำด้วย ซึ่งมีผลทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากด้วย

2. คุณภาพของผลิตภัณฑ์

คุณภาพของมะละกอแช่ร้อนอบแห้ง ที่ได้จากการอบแห้งทั้ง 2 ช่วง ข้างต้น มีสีส้มปนแดงเข้มปานกลาง ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลอินเวอร์ต ปริมาณกรด พบว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมผลไม้แห้ง ดังแสดงใน Table 2

3. การเปรียบเทียบการอบแห้งจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณ

โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับผลที่ได้จากการทดลอง โดยนำไปเขียนกราฟได้ตาม Figures 8 และ 9 พบว่าความชื้นเฉลี่ยของมะละกอแช่ร้อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยเฉพาะในช่วงเวลาแรกของการอบแห้งก่อนสลับรถเข็น ส่วนช่วงเวลาหลังให้ค่ามากกว่าการทดลอง

4. การหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสม

ในการศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมนั้น พิจารณาจากเวลา ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยมีหลักเกณฑ์ว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้น ความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำ และคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ในส่วนนี้จะศึกษาหาเวลาที่ใช้ในการ อบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบ่งการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง โดยกำหนดเงื่อนไขการอบแห้งจากข้อมูลการผลิตจริงของโรงงาน ดังนี้ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ อบแห้ง 70°C อุณหภูมิอากาศภายนอก 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 70% ความชื้นเริ่มต้นของมะละกอแช่ร้อน 60% มาตรฐานแห้ง ความชื้นสุดท้ายหลังอบแห้ง 38 % มาตรฐานแห้ง น้ำหนักมะละกอแช่ร้อนก่อนอบแห้ง 1000 กิโลกรัม ช่วงที่ 2 ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 55°C อุณหภูมิอากาศ ภายนอก 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 70% ความชื้นเริ่มต้น

Table 2 Qualities of papaya glace' produced at the Royal Project Food Processing Section.

Test No.	Total sugar (%)	Invert sugar(%)	SO2 (mg/kg)	Acid (%)	Color (R.H.S. Color chart)
1	66	32.80	246.50	0.24	34-B
2	60	34.88	220.36	0.26	34-B
3	66	32.58	256.68	0.22	34-B
4	66	33.03	191.23	0.28	34-B
5	65	34.60	196.62	0.24	34-B
Standard	60-70	30-35	< 300	0.30	-

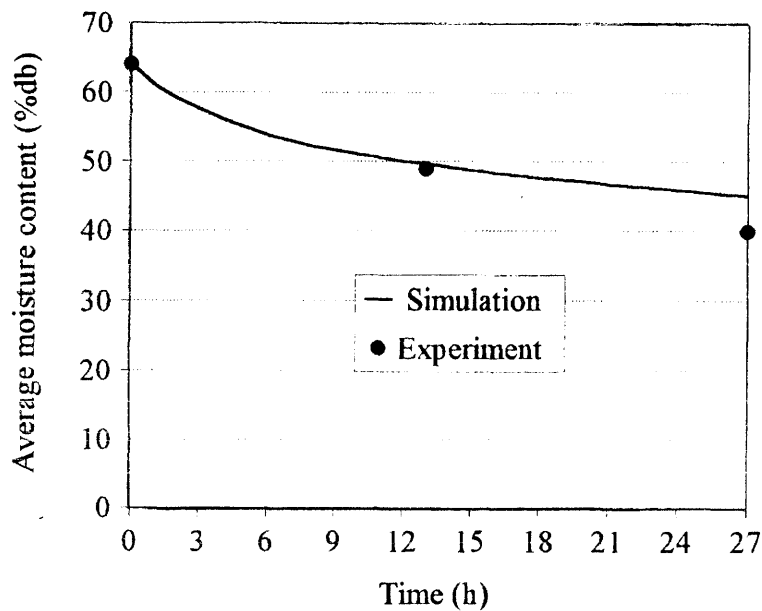


Figure 8 Comparison between simulated and experimental average moisture content of papaya glace'. (Test No.1, Fraction of air recycled = 43%, Specific air flow rate = 17.2 kg/h-kg dry papaya glace').

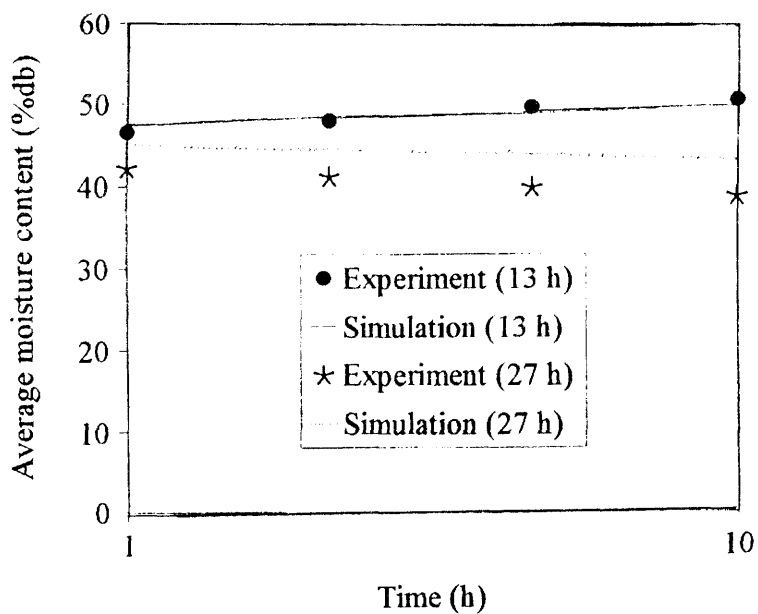


Figure 9 Comparison between simulated and experimental average moisture content of papaya glace'. (Test No.1, Fraction of air recycled = 43%, Specific air flow rate = 17.2 kg/h-kg dry papaya glace').

ของมะละกอแช่อิ่ม 38% มาตรฐานแห้ง ความชื้นสุดท้ายหลังอบแห้ง 23% มาตรฐานแห้ง น้ำหนักมะละกอแช่อิ่มก่อนอบแห้ง 500 กิโลกรัม

Figure 10 แสดงผลการอบแห้งช่วงที่ 1 สำหรับขนาดมะละกอแช่อิ่ม $3.1 \times 7.8 \times 1.4$ ซม.³ พบว่าเมื่ออัตราการไหลเฉพาะของอากาศลดลง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงด้วย จนกระทั่งถึงอัตราการไหลเฉพาะของอากาศค่าหนึ่ง เมื่อลดอัตราการไหลเฉพาะของอากาศลงอีกค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะกลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความชื้นในอากาศมีค่ามากทำให้การอบแห้งเกิดได้ช้าลง และจาก Figure 11 เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ออบแห้ง พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนเวียนกลับของอากาศมีค่าสูงกว่า 70% ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะร่วมกับเวลาที่ใช้ออบแห้ง อาจสรุปได้ว่าสถานะที่เหมาะสมที่ควรใช้ออบแห้ง คือที่อัตราส่วนอากาศเวียนกลับประมาณ 70% อัตราการไหลเฉพาะของอากาศประมาณ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมมะละกอแช่อิ่มแห้ง ซึ่งใช้เวลาอบแห้งประมาณ 26 ชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปฏุมุมิทั้งหมด 8.3 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย ซึ่งแบ่งเป็นความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ปฏุมุมิของไฟฟ้า 0.9 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของความร้อน 7.4 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสถานะที่ทางโรงงานผลิตจริง (ที่อัตราส่วนอากาศเวียนกลับประมาณ 43 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลเฉพาะของอากาศประมาณ 16 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมมะละกอแช่อิ่มแห้ง) คาดว่าถ้าใช้สถานะที่คำนวณจากแบบจำลองจะสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปฏุมุมิทั้งหมดประมาณ 6.6 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

เมื่อมะละกอแช่อิ่มมีขนาดชิ้นใหญ่ขึ้นเป็น $6 \times 9.1 \times 1.5$ ซม.³ พบว่าเงื่อนไขของสถานะที่เหมาะสม

สำหรับการอบแห้งไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะใกล้เคียงกัน แต่เวลาที่ใช้ออบแห้งเพิ่มขึ้นตามขนาดของมะละกอแช่อิ่ม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์

Figure 12-13 แสดงผลการอบแห้งในช่วงที่สอง ซึ่งเป็นการนำชิ้นมะละกอแช่อิ่มที่อบแห้งแล้วในช่วงแรกมาลดขนาดลงเป็น $0.98 \times 0.98 \times 0.98$ ซม.³ พบว่าสถานะที่เหมาะสมที่ควรใช้สำหรับอบแห้งในช่วงนี้คือที่อัตราส่วนอากาศเวียนกลับประมาณ 80% อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมมะละกอแช่อิ่มแห้งซึ่งใช้เวลาอบแห้งประมาณ 21 ชั่วโมง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปฏุมุมิทั้งหมด 9.3 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย ซึ่งแบ่งเป็นความ สิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปฏุมุมิของไฟฟ้า 1 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของความร้อน 8.3 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย เมื่อเปรียบเทียบกับสถานะที่ทางโรงงานผลิตจริง ถ้าใช้สถานะที่คำนวณจากแบบจำลองจะสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะปฏุมุมิทั้งหมดประมาณ 11.3 เมกกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย

Figure 14 แสดงผลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงหรือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงขึ้น ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำหรือความชื้นสัมพัทธ์สูงมีความสามารถในการรับน้ำที่ระเหยออกจากมะละกอแช่อิ่มได้น้อยทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งมาก ซึ่งมีผลให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงด้วย

สรุป

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มในอุโมงค์สามารถทำนายการอบ

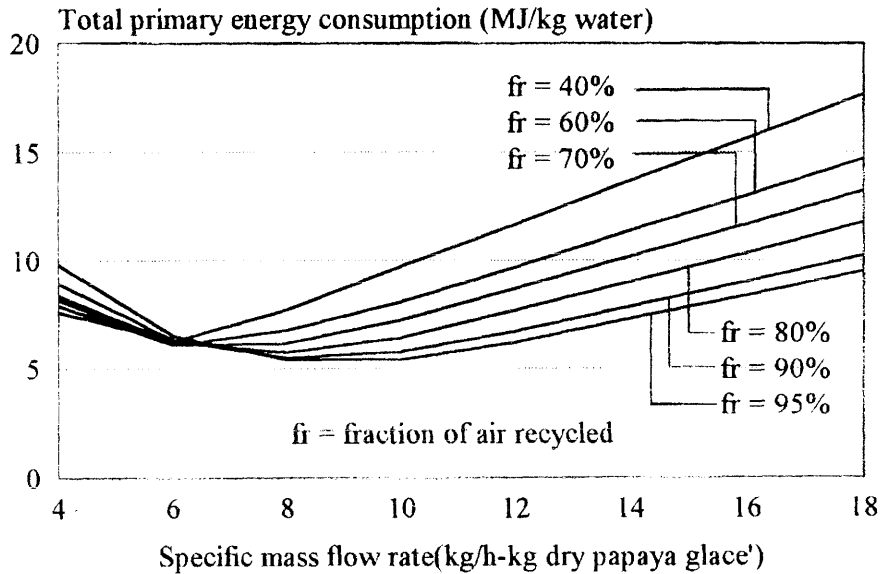


Figure 10 Effect of specific air flow rate on total primary energy consumption at different fraction of air recycled, simulation results

(Drying air temperature = 70°C, Initial moisture content of papaya glace' = 60% db, Final moisture content of papaya glace' = 38% db, Dimension of papaya glace' = 3.1×7.8×1.4 cm³).

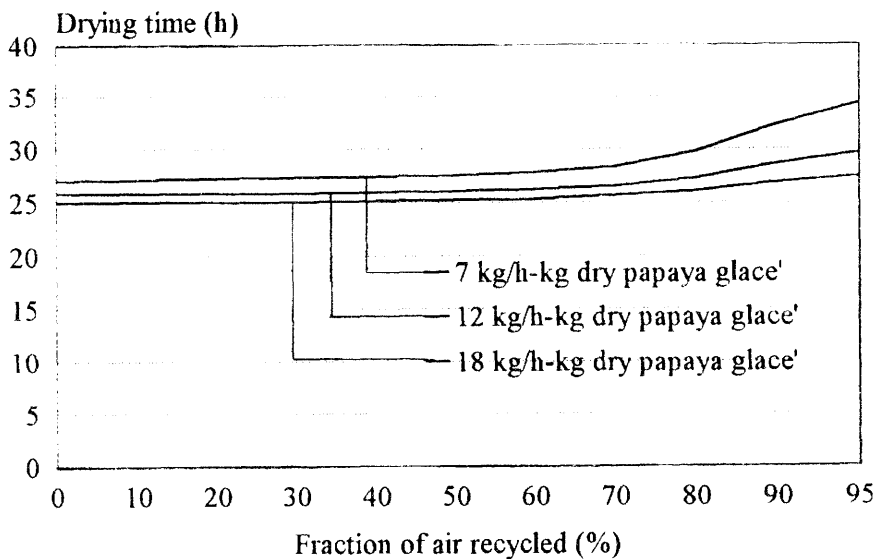


Figure 11 Effect of fraction of air recycled on drying time at different specific air flow rate, simulation results

(Drying air temperature = 70°C, Initial moisture content of papaya glace' = 60% db, Final moisture content of papaya glace' = 38% db, Dimension of papaya glace' = 3.1×7.8×1.4 cm³).

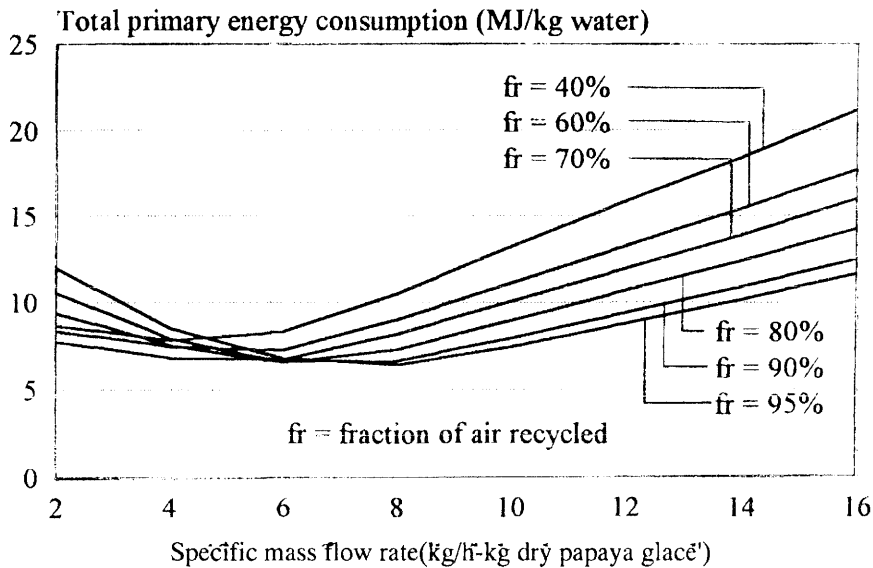


Figure 12 Effect of specific air flow rate on total primary energy consumption at different fraction of air recycled, simulation results

(Drying air temperature = 55°C, Initial moisture content of papaya glace' = 38% db, Final moisture content of papaya glace' = 23% db, Dimension of papaya glace' = 0.98×0.98×0.98 cm³).

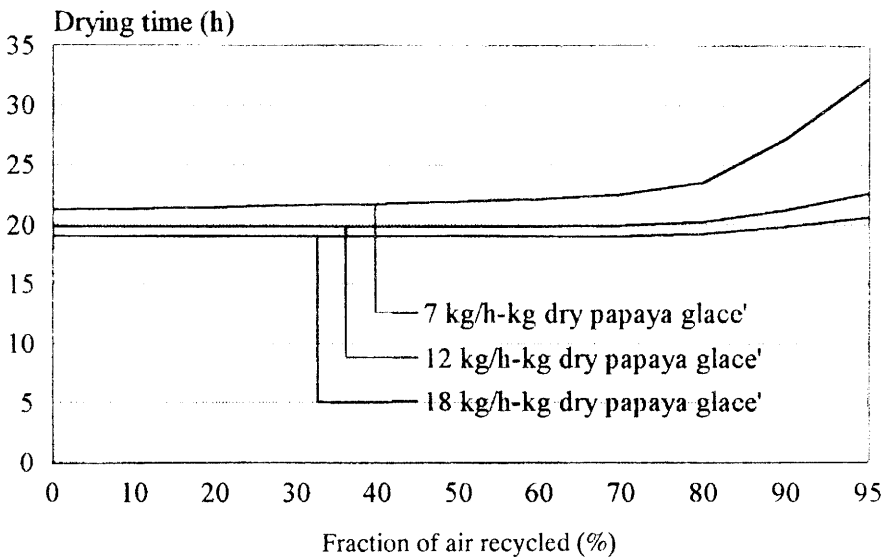


Figure 13 Effect of fraction of air recycled on drying time at different specific air flow rate, simulation results

(Drying air temperature = 55°C, Initial moisture content of papaya glace' = 38% db, Final moisture content of papaya glace' = 23% db, Dimension of papaya glace' = 0.98×0.98×0.98 cm³).

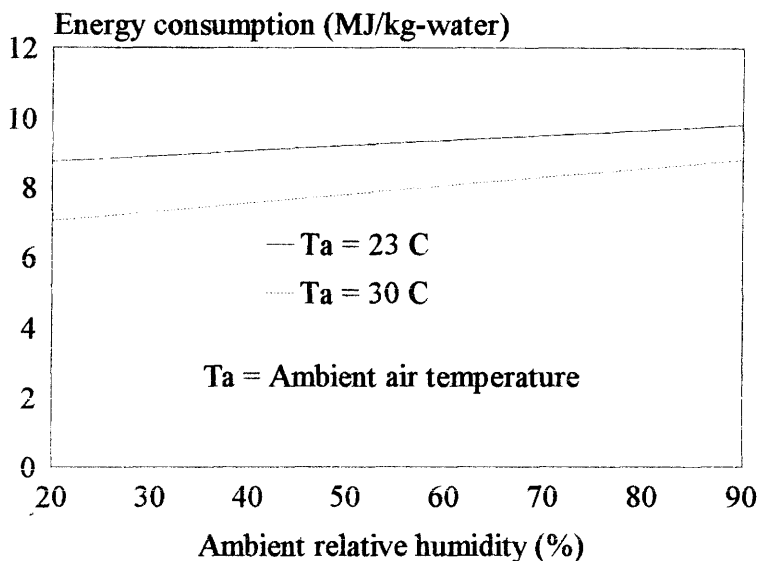


Figure 14 Effect of ambient relative humidity on total primary energy consumption, simulation results (Drying air temperature = 70°C, Fraction of air recycled = 70%, Specific air flow rate = 12 kg/h-kg dry papaya glaze', Initial moisture content of papaya glaze' = 60% db, Final moisture content of papaya glaze' = 38% db, Dimension of papaya glaze' = 3.1×7.8×1.4 cm³).

แห้งได้ดีพอสมควร โดยที่อัตราการอบแห้งช่วงแรกจะใกล้เคียงกับการทดลองและในช่วงท้ายลดลงช้ากว่าการทดลอง ในการอบแห้งควรคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและการสิ้นเปลืองพลังงาน ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งมะละกอแช่อบแบบเป็นงวดในช่วงแรก ที่ขนาดมะละกอแช่อบ 3.1×7.8×1.4 ซม.³ และอุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70°C คือที่ อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 12 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมมะละกอแช่อบแห้ง อัตราส่วนอากาศเวียนกลับ 70% สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งช่วงที่ 2 ที่ขนาดมะละกอแช่อบ 0.98×0.98×0.98 ซม.³ และที่อุณหภูมิอบแห้ง 55°C คือที่อัตราการไหลเฉพาะของอากาศ 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัมมะละกอแช่อบแห้ง สัดส่วนอากาศเวียนกลับ 80%

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณรัฐบาลแคนาดา ที่ให้ทุนสนับสนุนผ่าน CIDA และโรงงานหลวงอาหารสำเร็จรูปที่ 4 อำเภอละหานทราย จังหวัดบุรีรัมย์ ที่ให้ความร่วมมือระหว่างการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ศิระ อัจฉริยะวิริยะ และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2533. การศึกษาพารามิเตอร์สำหรับ วิเคราะห์การอบแห้งมะละกอแช่อบ, ว. เกษตรศาสตร์ (วิทย์.) 24: 196-207.
- Bertin, R., F. Pierronne, and M. Combarous. 1980. Modeling and Simulation a Distributed Parameter Tunnel Dryer, J. of Food Science, 45: 122-137.

- Gentry, J.P., M.W. Miller, and L.L. Claypool. 1965. Engineering and Fruit Quality Aspects of Prune Dehydration in Parallel and Counter Flow Tunnel. *Food Technology*. 9: 121-124.
- Gerald, C.F. and P.O. Wheatley. 1984. *Applied Numerical Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. 312 p.
- Soponronnarit, S. 1987. Drying in bulk storage of high moisture grain in Kingdom of Thailand. King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok. 384 p.
- Soponronnarit, S. 1988. Energy Model of Grain Dryer System. *Asean Journal Science Technology Development*. 5: 43-68.
- Soponronnarit, S., S. Achariyaviriya, and P. Tasaso. 1992. Optimum Strategies for Drying Papaya Glace', *ASEAN Food Journal*. 7: 17-23.
- Wilhelm, L.R. 1976. Numerical calculation on psychrometric properties in SI units. *Trans. ASEA*. 19: 318-312; 325.