

การจำลองแบบการอบแห้งผลไม้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์

ณัฐวุฒิ ดุษฎี

จงจิตร หิรัญลาก

พิชัย นามประกาย

ศิริชัย เทพา

คณะพลังงานและวัสดุ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยในตู้อบแบบถาดอยู่กับที่ โดยใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม จากการเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผลการอบแห้งได้ดี เมื่อนำแบบจำลองมาศึกษาหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม พบว่าควรใช้อัตราการไหลของอากาศจำเพาะประมาณ 10 kg/h-kg dry banana และสัดส่วนอากาศเวียนกลับประมาณ 80% ทั้งนี้โดยพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่ำสุด จากการทดลองพบว่าคุณภาพของกล้วยจะยังคงดีอยู่เมื่อใช้อุณหภูมิของอากาศประมาณ 60°C

คำสำคัญ : การอบแห้งกล้วย/แบบจำลองทางคณิตศาสตร์/ความสิ้นเปลืองพลังงาน/อบแห้งแสงอาทิตย์

ABSTRACT

The objective of this study is to develop a mathematical model for banana drying using solar energy as supplemental heat. It was found that results obtained from the model and experiments were agreeable. The model was then used to investigate appropriate drying conditions. Results showed that the specific air flow rate should be around 10 kg/h-kg dry banana and the fraction of air recycled should be around 80%. At these conditions, the specific energy consumption and drying time were at minimum. Experimental results indicated that drying air temperature should be around 60°C if product quality was preserved.

Key words : Banana drying/Mathematical model/Energy consumption/Solar drying

บทนำ

การอบแห้งเป็นวิธีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่เน่าเสียง่าย ไม่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน ให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น และลดการสูญเสีย ผลไม้อบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรชนิดหนึ่งซึ่งมีความต้องการสูงทั้งตลาดภายในและภายนอกประเทศ การอบแห้งเป็นกระบวนการผลิตขั้นตอนหนึ่งซึ่งมีความสำคัญและเสียค่าใช้จ่ายสูง เครื่องอบแห้งแบบตู้เป็นเครื่องอบแห้งแบบหนึ่งซึ่งมีความเหมาะสมในการอบแห้งผลไม้ โดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิความร้อนประมาณ $60-70^{\circ}\text{C}$ ถ้าใช้อุณหภูมิร้อนสูงกว่านี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเข้มซึ่งไม่สวย ผิวเหี่ยวย่นมาก ในเครื่องอบแห้งขนาดเล็ก พลังงานที่ใช้ในการอุ่นอากาศมักได้จากไฟฟ้าหรือ LPG พลังงานแสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ในการอุ่นอากาศได้เช่นกัน ซึ่งจากการศึกษาของ Soponronnarit et al. (1990) พบว่ามีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์สูง แต่เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์มีข้อจำกัดในด้านความไม่แน่นอน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกการพัฒนาตู้อบแห้งผลไม้โดยใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริมและเลือกการศึกษาการอบแห้งกล้วยน้ำว้าเพราะเป็นที่นิยมบริโภคและสามารถหาได้ตลอดทั้งปี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งกล้วยน้ำว้าโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรหลักที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหล และสัดส่วนการนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ ที่มีต่ออัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงาน นอกจากนี้ยังนำเอาแบบจำลองที่ได้มาใช้ในการค้นหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม

การสำรวจเอกสาร

Soponronnarit (1988) และ Soponronnarit (1991) ทำการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งอาจสรุปได้ว่าการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกเป็น

การไหลของอากาศเป็นไปแบบธรรมชาติ และแบบบังคับการไหล หรืออาจแบ่งออกเป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม แบบการไหลตามธรรมชาติต้องการเงินลงทุนน้อย ใช้งานและบำรุงรักษาง่าย แต่อัตราการอบแห้งต่ำ เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศต่ำ แบบการไหลโดยการบังคับสามารถให้อัตราการไหลที่สูงกว่า ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการทำงานได้ดีกว่า จึงมีความเสี่ยงต่อการสูญเสียเนื่องจากสภาวะอากาศไม่ตายน้อยกว่า การใช้แสงอาทิตย์โดยตรงมักให้ประสิทธิภาพของระบบสูงกว่า แต่การควบคุมอุณหภูมิก็มักทำได้ยากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แสงอาทิตย์โดยอ้อม ดังนั้นคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งจึงมักจะดีกว่า นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียคุณภาพได้ง่ายเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรง

การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบไหลตามธรรมชาติ ทั้งแบบใช้แสงอาทิตย์โดยตรง โดยอ้อมและแบบผสมคือมีทั้งโดยตรงและโดยอ้อมที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ผลงานของ Wibulswas et al. (1977), Wibulswas and Thaina (1980) และ Watabutr (1981) ซึ่งพยายามค้นหาแนวทางการออกแบบเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงเช่น สัดส่วนของพื้นที่ของช่องอากาศออกต่อพื้นที่ตัวรับรังสี มุมเอียงของตัวรับรังสี เป็นต้น Exell (1980) พัฒนาเครื่องอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ราคาถูกที่ทำจากแผ่นฟิล์มพลาสติก และได้อธิบายขั้นตอนการคำนวณออกแบบอย่างง่าย ๆ

ส่วนผลงานด้านการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์แบบบังคับการไหลของอากาศ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบใช้แสงอาทิตย์โดยอ้อมและมีบ้างที่เป็นแบบผสมคือมีทั้งโดยตรงและโดยอ้อม สามารถสรุปคร่าว ๆ ได้ว่า ได้มีการพัฒนาและทดสอบเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกในบ้านของเกษตรกรท่าขนาดที่ควรใช้จริง โดย Soponronnarit et al. (1986) และ Thongprasert et al. (1985) และพบว่าเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาและ

ทดสอบเครื่องอบแห้งผลไม้โดย Rakwichian and Sudaprasert (1990) หรือ Assayo (1991) ซึ่งพบว่ามีความเป็นไปได้ทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เช่นกัน ในแง่ของการยอมรับใช้งานนั้นพบว่ามีการใช้เครื่องอบแห้งแบบอากาศไหลตามธรรมชาติและใช้แสงอาทิตย์โดยตรง โดยกลุ่มเกษตรกรกรกล้วยน้ำว้าในอำเภอบางกระทุ่ม จังหวัดพิษณุโลก อย่างไรก็ตามการยอมรับยังนับว่าค่อนข้างน้อย ส่วนเครื่องอบแห้งแบบอากาศไหลโดยการบังคับนั้นพบว่ายังไม่ได้รับการยอมรับในการใช้งานในประเทศไทย

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มียานเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ที่พิจารณาอิทธิพลของตัวแปรเช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลและสัดส่วนเวียนกลับของอากาศที่อบแห้งแล้วพร้อม ๆ กัน ซึ่งตัวแปรตัวสุดท้ายนี้มีผลค่อนข้างมากต่อความเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบดังนั้นในบทความนี้จึงเน้นที่การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีขีดความสามารถดังที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ ในการหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมต่อไป

วิธีการ

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะกล่าวถึงนี้พัฒนาต่อจากผลงานของ Achariyaviriya and Soponronnarit (1989 b) ซึ่งมีสมมุติฐานที่สำคัญคือ ให้มีสมดุลความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์และอากาศที่ใช้ออบแห้ง สมการที่สำคัญของแบบจำลองนี้ประกอบด้วย :

สมการคำนวณความชื้นของกล้วยหนึ่งผล ซึ่งพัฒนาโดย (Achariyaviriya and Soponronnarit (1989 a) สมการนี้เป็นสมการการแพร่ของความชื้นในวัสดุรูปทรงกระบอกสั้นซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการอนุพันธ์ได้ว่า

$$dM/dt = (M_{in} - M_{eq}) (32/\pi^2) \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [1/(2m+1)^2][1/(\lambda_n r_o)^2]$$

$$\exp[-(2m+1)^2 \pi^2 Dt/l^2 - (\lambda_n r_o)^2 Dt/r_o^2].$$

$$[-(2m+1)^2 \pi^2 D/l^2 - (\lambda_n r_o)^2 D/r_o^2]$$

(1)

$$\text{เมื่อ } D = 0.4799 \exp [-4304/(T + 273)](2)$$

$$\text{และ } M_{eq} = \exp\{[\ln(-(T+273) \ln RH)\ln(A/R)]/B\} \quad (3)$$

$$A = 10230$$

$$B = 0.04876$$

สมการ (3) เป็นสมการที่พัฒนาโดย Achariyaviriya and Soponronnarit (1989 a) โดยใช้รูปแบบสมการของ Halsey (1948) สัญลักษณ์ในสมการ (1)-(3) มีความหมายดังนี้

M = ความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{in} = ความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} = ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

D = สัมประสิทธิ์การแพร่, m²/h

t = เวลาการอบแห้ง, h

l = ความยาวของวัสดุทรงกระบอก, m

r_o = รัศมีทรงกระบอก, m

RH = ความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน

T = อุณหภูมิ, °C

R = ค่านิจสาลของก๊าซ (8.314 kJ/kg mole K)

λ_nr_o = รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV2) ในรูปที่ 1 จากหลักการทรงพลังงานจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศ บวกกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของวัสดุอบแห้ง และเครื่องอบแห้ง เท่ากับผลรวมของความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างเครื่องอบแห้งและสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อจัดรูปใหม่สามารถเขียนได้ว่า

$$T_f = [q_2 + C_a T_{mix} + W_{mix}(h_{fg} + C_v T_{mix}) - W_f h_{fg} - \Delta U_p - \Delta U_d] / (C_a + W_f C_v) \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } q_2 = [0.642 - 0.0280 (T_{mix} - T_a) + 0.000332 (T_{mix} - T_a)^2] / m_{mix} \quad (5)$$

สัญลักษณ์ต่าง ๆ ในสมการ (4) และ (5) มีความหมายดังนี้

q_2 = ความร้อนที่สูญเสียต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง, kJ/kg-dry air และหาได้จากการทดลอง ซึ่งพบว่าขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งและอากาศแวดล้อม

ΔU_p = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของกล้วยต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง, kJ/kg-dry air

ΔU_d = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของเครื่องอบแห้งต่อหนึ่งหน่วยมวลอากาศแห้ง, kJ/kg-dry air

C = ความร้อนจำเพาะ, kJ/kg $^{\circ}$ C

T = อุณหภูมิ, $^{\circ}$ C

W = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, kg-H₂O / kg-dry air

h_{fg} = ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, kJ/kg-H₂O

m = อัตราการไหลของมวลแห้ง, kg/s

โดยมีสัญลักษณ์กำกับล่าง :

a = อากาศแห้ง

f = อากาศออกจากเครื่องอบแห้ง

v = ไอน้ำ

mix = อากาศผสมก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV2) ในรูปที่ 1 จากหลักการทรงมวลจะได้ว่าปริมาณน้ำในอากาศ

ที่เพิ่มขึ้น เท่ากับปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกล้วย และเมื่อจัดรูปใหม่ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W_f = (M_i - M_f) R + W_{mix} \quad (6)$$

เมื่อ M_i = ความชื้นเฉลี่ยของกล้วยที่ต้นเวลา Δt , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_f = ความชื้นเฉลี่ยของกล้วยที่ปลายเวลา Δt , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

$$R = m_p / (m_{mix} \Delta t)$$

m_p = มวลแห้งของกล้วย, kg

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV4) ในรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการสมดุลมวลของไอน้ำและสมดุลมวลของอากาศแห้งและสามารถหาได้ว่า

$$W_{mix} = (1 - RC) W_i + RC W_f \quad (7)$$

เมื่อ RC = สัดส่วนการนำเอาอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาใช้ใหม่, m_{rc} / m_{mix}

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV3) ในรูปที่ 1 จากสมดุลพลังงานบนตัวรับรังสี ความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์ เท่ากับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศ รวมกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของตัวรับรังสี เมื่อจัดรูปเสียใหม่สามารถเขียนได้ว่า

$$T_o = (e_c A_c G_T + W_i C_v T_i + C_a T_i - \Delta U_c) / (C_a + C_v W_i) \quad (8)$$

$$\text{โดยที่ } e_c = 15.1 + 1550 m - 12700 m^2 \quad (9)$$

สมการ (9) ได้จากการพล็อตกราฟเข้ากับผลการทดลองหาประสิทธิภาพตัวรับรังสีที่อัตราการไหลและอุณหภูมิต่าง ๆ ค่าประสิทธิภาพในสมการ (9) เป็นค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือ ที่เงื่อนไข

$T_i = T_a$ สัญลักษณ์ต่าง ๆ ในสมการ (8) และ (9) มีความหมายดังนี้

e_c = ประสิทธิภาพตัวรับรังสี, เศษส่วน

ΔU_c = การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของตัวรับรังสี, kJ/kg-dry air

G_T = ฟลักซ์รังสีดวงอาทิตย์, W/m²

โดยที่สัญลักษณ์กำกับล่าง :

c = ตัวรับรังสี

o = หลังออกจากตัวรับรังสี

i = ก่อนเข้าตัวรับรังสี

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV4) ในรูปที่ 1 จากหลักการทรงพลังงาน จะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อน เมื่อจัดรูปใหม่ จะสามารถเขียนสมการสำหรับคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศภายหลังการผสม (T_x) ได้ว่า :

$$T_x = [m_i C_a T_o + m_i W_o (h_{fg} + C_v T_o) + m_{rc} C_a T_f + m_{rc} W_f (h_{fg} + C_v T_f) - m_{mix} W_{mix} h_{fg}] / (m_{mix} C_a + m_{mix} W_{mix} C_v) \quad (10)$$

พิจารณาปริมาตรควบคุม (CV1) ในรูปที่ 1 จากหลักการทรงพลังงาน อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศรวมกับกำลังเพลที่ขับเคลื่อนพัดลม เท่ากับความร้อนที่ให้โดยตัวอุ่นอากาศและความร้อนที่สูญเสียระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อม เมื่อจัดรูปใหม่จะสามารถเขียนได้ว่า

$$Q_h = m_{mix} C_a T_{mix} + m_{mix} C_v T_{mix} - m_{mix} C_a T_x - m_{mix} C_v T_x - W_s + q_1 \quad (11)$$

โดยที่ W_s และ q_1 หาได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอยจากข้อมูลการทดลอง

$$W_s = (0.00632 + 0.285 m + 37.4 m^2) \quad (12)$$

$$q_1 = -0.148 + 0.0160 (T_{mix} - T_a) + 0.000100 (T_{mix} - T_a)^2 + 6.25 m - 23.2 m^2 - 0.620 (T_{mix} - T_a) m - 0.00500 (T_{mix} - T_a)^2 m + 10.8 (T_{mix} - T_a) m^2 + 0.238 (T_{mix} - T_a)^2 m^2 \quad (13)$$

เมื่อ q_1 = อัตราการสูญเสียความร้อน, kW

Q_h = อัตราการสิ้นเปลืองความร้อนโดยตัวอุ่นอากาศ, kW

W_s = กำลังงานเพลสำหรับขับเคลื่อนพัดลม, kW

คุณสมบัติของอากาศชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wilhelm (1976)

ขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณเริ่มต้นที่สมการ (7) โดยสมมติ $W_f = 0.03$ จะคำนวณได้ค่า W_{mix} จากนั้นใช้สมการ (4) คำนวณ T_f โดยที่ T_{mix} ทราบค่าแล้ว จึงคำนวณค่า M_{eq} จากสมการ (3) หลังจากนั้นคำนวณค่า M_f จากสมการ (1) ในรูปของ finite difference และคำนวณค่า W_f ใหม่จากสมการ (6) เมื่อได้ W_f ใหม่แล้วเปรียบเทียบกับค่า W_f ที่สมมุติ ถ้าผลแตกต่างระหว่าง W_f ใหม่กับ W_f ที่สมมุติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.0001) ก็กลับไปคำนวณใหม่โดยใช้ค่าเฉลี่ยของ W_f ถ้ายอมรับได้ ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงานที่ตัวรับรังสีตัวอุ่นอากาศร้อน และงานเพลที่ใช้ขับเคลื่อนพัดลม

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งตัวโปรแกรมเขียนด้วยภาษา PASCAL และสามารถเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป

การทดลอง

รูปที่ 3 แสดงเครื่องอบแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานเสริมที่ใช้ในการทดลองซึ่งประกอบด้วยตัวรับรังสีขนาด 2.5m² ตู้อบขนาด 1×1×0.6m³

ภายในบรรจุภาตสำหรับวางผลิตภัณฑ์จำนวน 8 ภาต
ในการทำงานอากาศที่ไหลเวียนกลับผสมกับอากาศ
ใหม่ที่ไหลผ่านตัวรับรังสี จากนั้นไหลผ่านขดลวดทำ
ความร้อนด้วยไฟฟ้าขนาด 2400 W โดยมีการควบคุม
อุณหภูมิของอากาศก่อนไหลเข้าห้องอบแห้ง ทิศทาง
การไหลของอากาศตั้งฉากกับภาต อากาศที่ผ่าน
ผลิตภัณฑ์แล้วบางส่วนจะถูกปล่อยทิ้ง และบางส่วน
ถูกดูดกลับไปใช้ใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ในการทดสอบนี้ ใช้กล้วยน้ำว่าครั้งละประมาณ
25 kg ในช่วงกลางวันจะทำการเป่าอากาศ แต่ใน
ช่วงกลางคืนจะทำการหมักกล้วย โดยคลุมด้วยผ้า
การหาความชื้นของกล้วยใช้การสุ่มตัวอย่างแล้วนำ
เข้าเตาอบที่ 103°C เป็นเวลา 72h ในแต่ละ
การทดลองจะปรับอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วน
อากาศเวียนกลับและอุณหภูมิของอากาศที่ใช้อบแห้ง
ระหว่างการทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม
อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าตู้อบ และอุณหภูมิอากาศหลัง
ออกจากตู้อบ นอกจากนี้ยังวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก
ของอากาศแวดล้อมและอากาศขาออกจากตู้อบ โดยใช้
thermocouple ต่อเข้ากับ data logger อ่านได้
ละเอียด $\pm 1^{\circ}\text{C}$ สำหรับอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้า
ใช้มาตรไฟฟ้าเป็นตัววัด นอกจากนี้ยังได้ศึกษา
คุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง โดยตรวจสอบ
สีผิวของผลิตภัณฑ์ และความแข็งของผลิตภัณฑ์จาก
การสัมผัส

การทดสอบประสิทธิภาพตัวรับรังสีใช้วิธีการ
ที่คล้ายกับของ ASHRAE STANDARD 93-77
แบบทดสอบกลางแจ้ง

ผลและวิจารณ์

จากการทดลองพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ
 60°C ให้คุณภาพกล้วยดีกว่าอบแห้งที่อุณหภูมิ
 70°C กล่าวคือมีสีเหลืองไม่เข้มเกินไป ผิวเป็นมัน
เยิ้มไม่แห้งและไม่แข็ง

จากการทดลองเช่นกันพบเป็นแนวโน้มว่า
อัตราการไหลจำเพาะที่ไม่สูงเกินไป หรือต่ำเกินไป

คือประมาณ 10-13 kg/h-kg dry banana จะ
ประหยัดพลังงานมากที่สุด และการเพิ่มสัดส่วนเวียน
กลับของอากาศจนถึง 80% มีส่วนช่วยในการประหยัด
พลังงาน

พลังงานที่ใช้ในการอบแห้งแยกเป็นความร้อน
จากขดลวดไฟฟ้า 69-75% ความร้อนจากแสงอาทิตย์
19-25% และไฟฟ้าสำหรับพัดลม 5-7%

จากการเปรียบเทียบความชื้นเฉลี่ยของกล้วย
ที่ได้จากการทดลองอบแห้งครั้งที่ 5 กับผลที่ได้จากการ
จำลองแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความใกล้เคียง-
กัน ดังแสดงในรูปที่ 4 อุณหภูมิกระเปาะแห้งที่ตรง
ทางออกของเครื่องอบแห้งที่คำนวณได้จากแบบจำลอง
มีค่าสูงกว่าของการทดลองเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของ
การอบแห้ง และมีค่าเข้าใกล้ผลการทดลองเมื่อเวลา
การอบแห้งผ่านไปมากกว่าครึ่งทาง ส่วนอุณหภูมิ
กระเปาะเปียกที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกันไม่มาก
นักเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ดังรายละเอียดใน
รูปที่ 5

จากการทดลองพบว่าความสิ้นเปลืองพลังงาน
จำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้ง เนื่อง
จากความชื้นกล้วยลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่ง
สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 7 กล่าวคืออัตราการ
อบแห้งในช่วงความชื้นสูงมีค่าสูงกว่าที่ช่วงความชื้นต่ำ

ผลจากการทดลองไม่สามารถให้ข้อสรุปได้ว่า
เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดควรเป็นเช่นไร
เพราะระหว่างการทดลองไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์หลาย ๆ ตัว เช่น สภาพอากาศแวดล้อม
ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยเป็นต้น จากการเปรียบเทียบ
ผลการทดลองกับผลจากแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่า
แบบจำลองมีความถูกต้องดี ดังนั้นในงานนี้จึงได้ใช้
แบบจำลองสำหรับการศึกษาหาเงื่อนไขการอบแห้ง
ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากความสิ้นเปลืองพลังงาน
และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ส่วนในเรื่องของคุณภาพ
นั้นถือว่าไม่มีเพียงอุณหภูมิเท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพ
ผลิตภัณฑ์ ในการศึกษาที่กำหนดให้อุณหภูมิอบแห้ง
เท่ากับ 60°C ความชื้นเริ่มต้นของกล้วย 250%

มาตรฐานแห้ง ความชื้นสุดท้าย 50% มาตรฐานแห้ง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม เท่ากับ 30°C และ 70% ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงผลการคำนวณตามเงื่อนไขดังที่ ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าอัตราการไหลของอากาศจำเพาะ และสัดส่วนเวียนกลับของอากาศมีผลต่อความสิ้น เปลืองพลังงานรวมจำเพาะ โดยที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะต่ำสุดที่อัตราการไหลจำเพาะประมาณ 10 kg/h-kg dry banana เมื่อเพิ่มสัดส่วนเวียนกลับ ของอากาศ พบว่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ลดลง จนเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นมากกว่า 95% ความสิ้น เปลืองพลังงานจะกลับสูงขึ้น เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ ในการอบแห้งร่วมด้วยดังรูปที่ 9 พบว่าสัดส่วนเวียน กลับของอากาศที่ไม่ทำให้เวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นอยู่ ที่ประมาณ 80% ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าการอบ แห้งกล้วยที่ประหยัดพลังงานและเวลานั้น ควรเลือก อัตราการไหลของอากาศจำเพาะประมาณ 10 kg/ h-kg dry banana และสัดส่วนเวียนกลับของอากาศ ประมาณ 85%

สรุป

จากการศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปสาระที่สำคัญ ได้ดังนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ มีความถูกต้องสูง
2. สามารถนำแบบจำลองมาใช้ในการศึกษา หาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม ซึ่งช่วยในการ ประหยัดพลังงานและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสภาวิจัยแห่งชาติที่ได้ให้ ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- Acharyaviriya, S. and S. Soponronnarit, 1989 a, A study of parameters for the analysis of local banana drying, Thai Engineering Journal 42(4), 80-85 (in Thai).
- Acharyaviriya, S. and S. Soponronnarit, 1989 b, Development of a mathematical model of cabinet drying of papaya glaze, Proc. of the Technical Seminar on Heat, Mass and Momentum Transfer, Chulalongkorn Univ. (in Thai).
- Assayo, M. 1991, Performance evaluation of a solar banana dryer and development of a mathematical model, Master thesis, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok (in Thai.)
- Exell, R.H.B. 1980, Basic design theory for a simple solar rice dryer, Renewable Energy Review Journal, 1(2), 1-14.
- Halsey, F. 1948, Physical adsorption on non-uniform surface, J. Chem. 16, 931-937.
- Rakwichian, W. and B. Sudaprasert, 1990, Development of a fruit solar dryer for the industrial scale, Proceedings of the International Conference on Energy and Environment, 27-30 November 1990, Bangkok, Published by King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok.
- Soponronnarit, S. 1988, Review of research and development work on forced convection solar drying in Thailand, RERIC International Energy Journal 10(1), 19-27.
- Soponronnarit, S. 1991, Solar drying in Thailand, Paper presented at the ASIA ENERGY'91 Conference, 17-20 October 1991, Bangkok.
- Soponronnarit, S., W. Subannapong, J. Tiansuwan, 1990, Studies of bare and glass-cover flat-plate solar air heaters, RERIC International Energy Journal 12(1), 1-19.
- Soponronnarit, S., W. Watabutr, A. Therd- yothin and B. Kunjara, 1986, A drying-storage solar hut: the technical aspect,

Thongprasert, S., M. Thongprasert, S. Boon-
yavanichkul and J. Mahittafongkul,
1985, An economic study on solar rice
dryer, Report submitted to National
Energy Administration, Bangkok (in
Thai).

Watabutr, W. 1981, Performance testing of a
solar cabinet dryer, Master thesis, King
Mongkut's Institute of Technology
Thonburi, Bangkok (in Thai).

Wibulswas, P., S. Opaskiatkul and S. Man-
padungthum, 1977, Performance of a

solar cabinet dryer, Proc. Renewable
Energy and Application, Thai-Japanese
Association of Technology Promotion,
Bangkok.

Wibulswas, P. and S. Thaina, 1980, Compara-
tive performances of cabinet dryers with
separate air heaters, Presented at the
Workshop on fuel and Power to Rural
Communities in the 3rd World, CEGET,
Domaine Universitaire de Bordeaux-
Talence, France, May 1980.

Wilhelm, L.R. 1976. Numerical calculation
of psychrometric properties in SI units,
Trans. ASAE 19(2), 318-321,325.

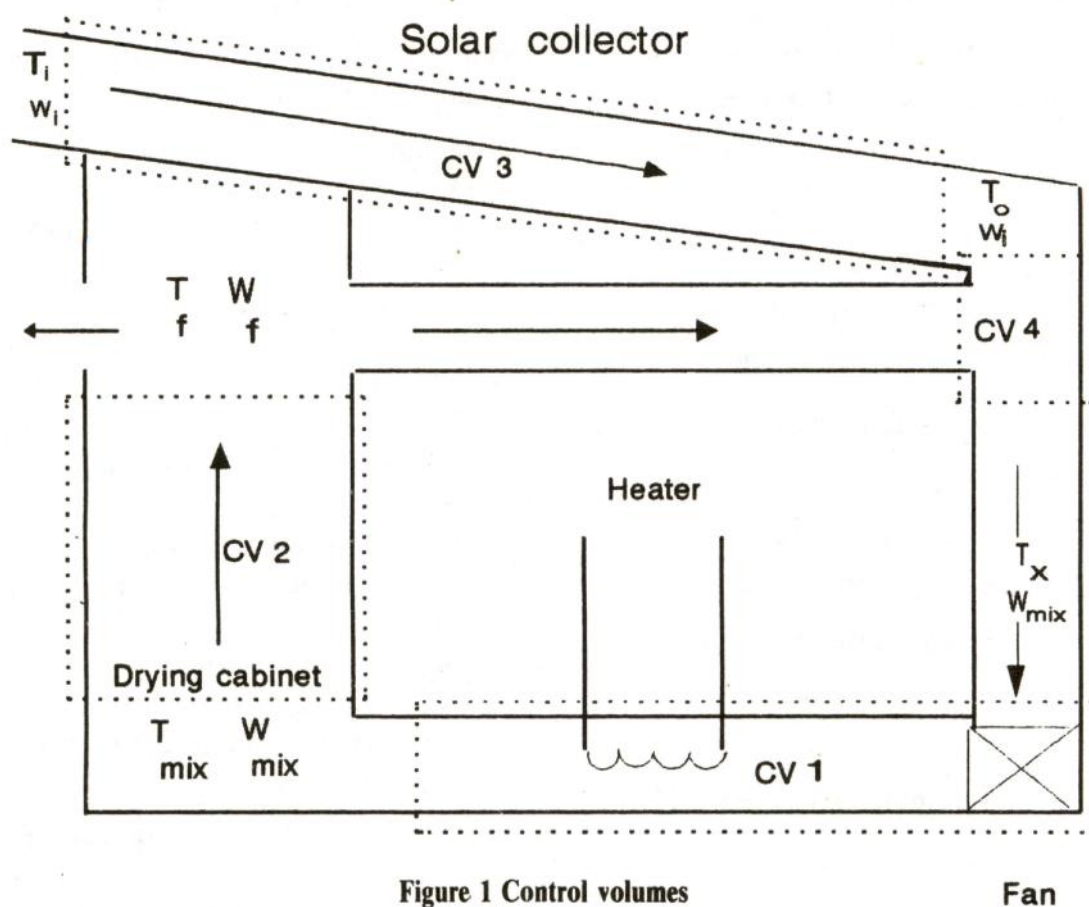


Figure 1 Control volumes

Fan

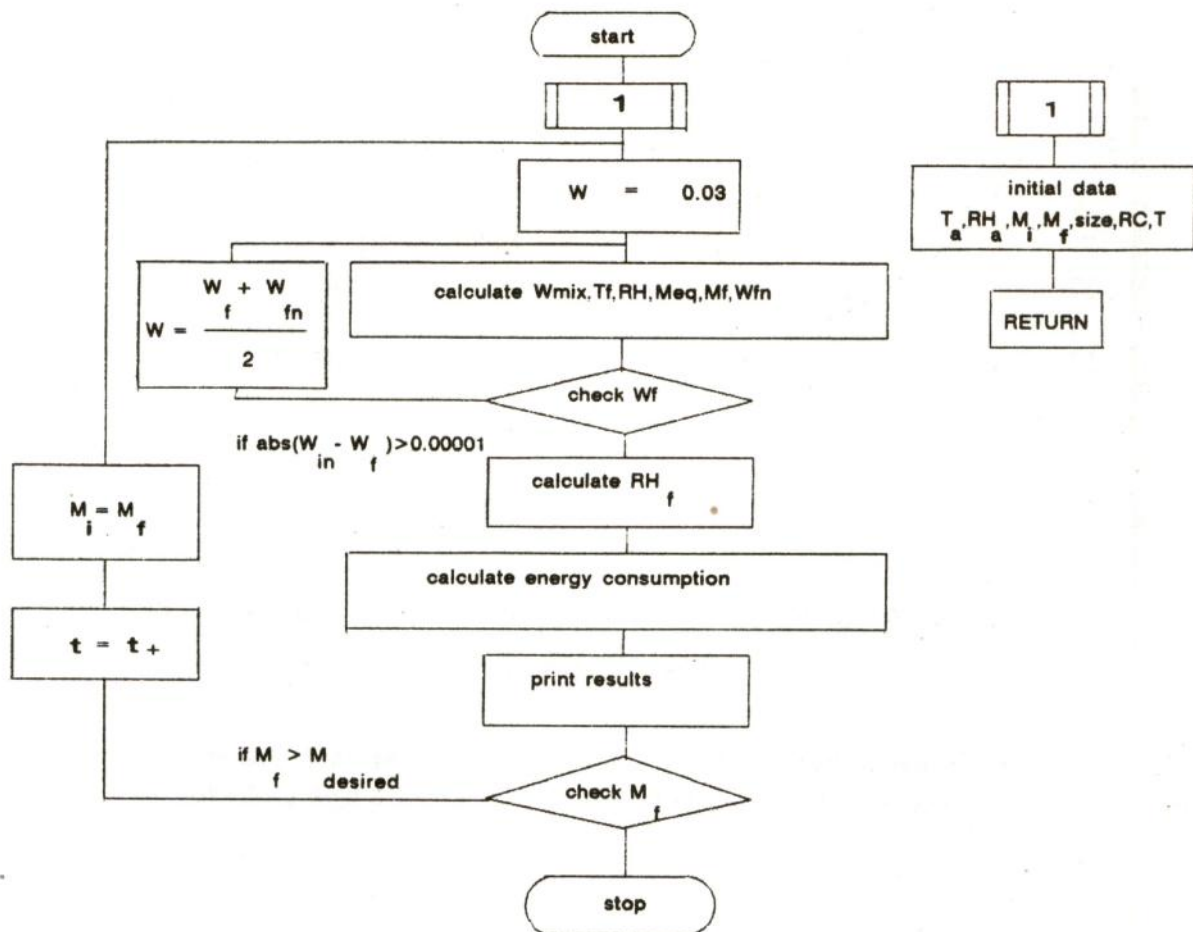


Figure 2 Computer simulation flow chart

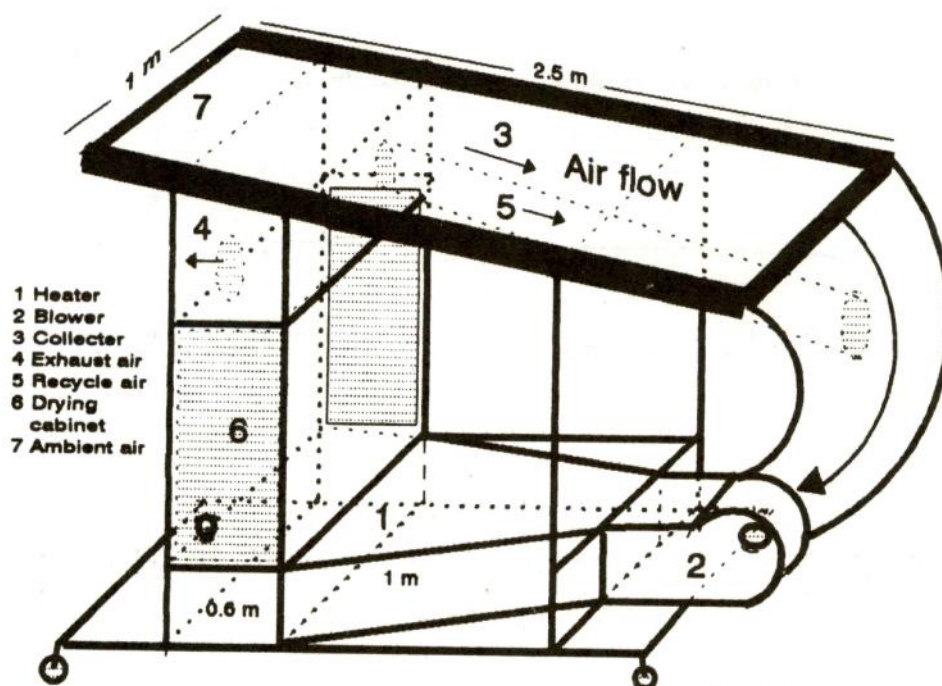


Figure 3 Solar dryer

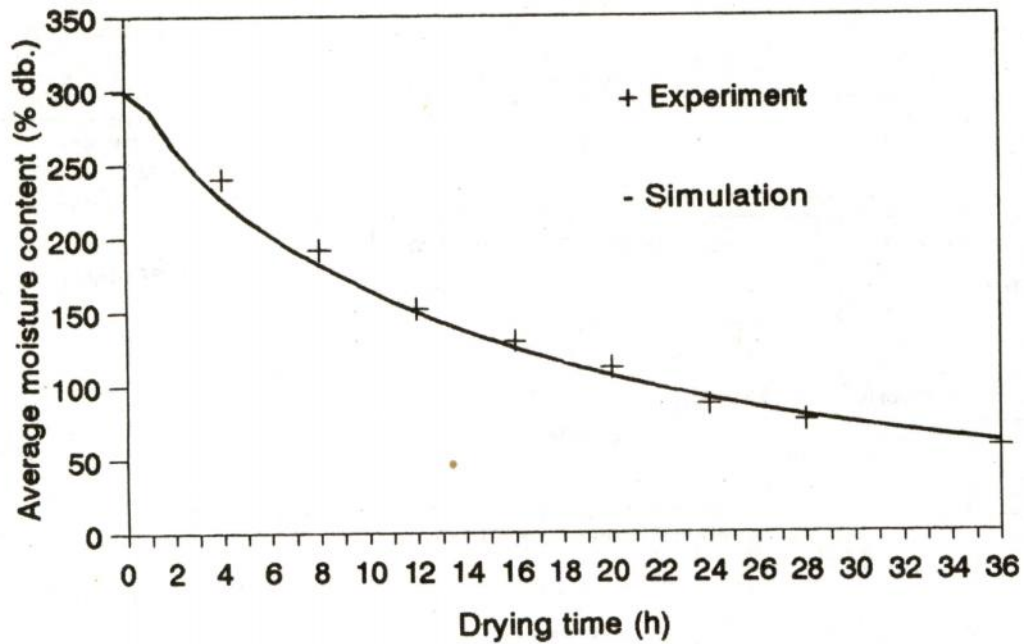


Figure 4 Evolution of simulated and experimental moisture content [Test No. 5, Fraction of air recycled = 80%, Temperature = 60 C] [Specific mass flow rate = 20.8 kg/h-kg dry banana]

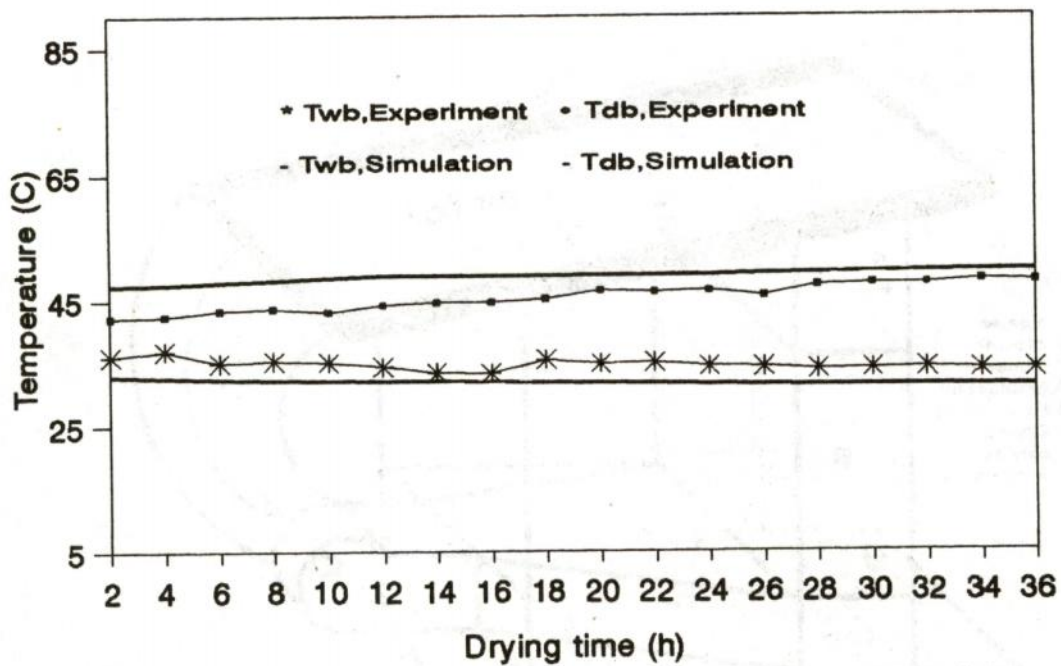


Figure 5 Evolution of outlet temperature
[Test No. 5, Fraction of air recycled = 80%, Temperature = 60 C] [Specific mass flow rate = 20.8 kg/h-kg dry banana]

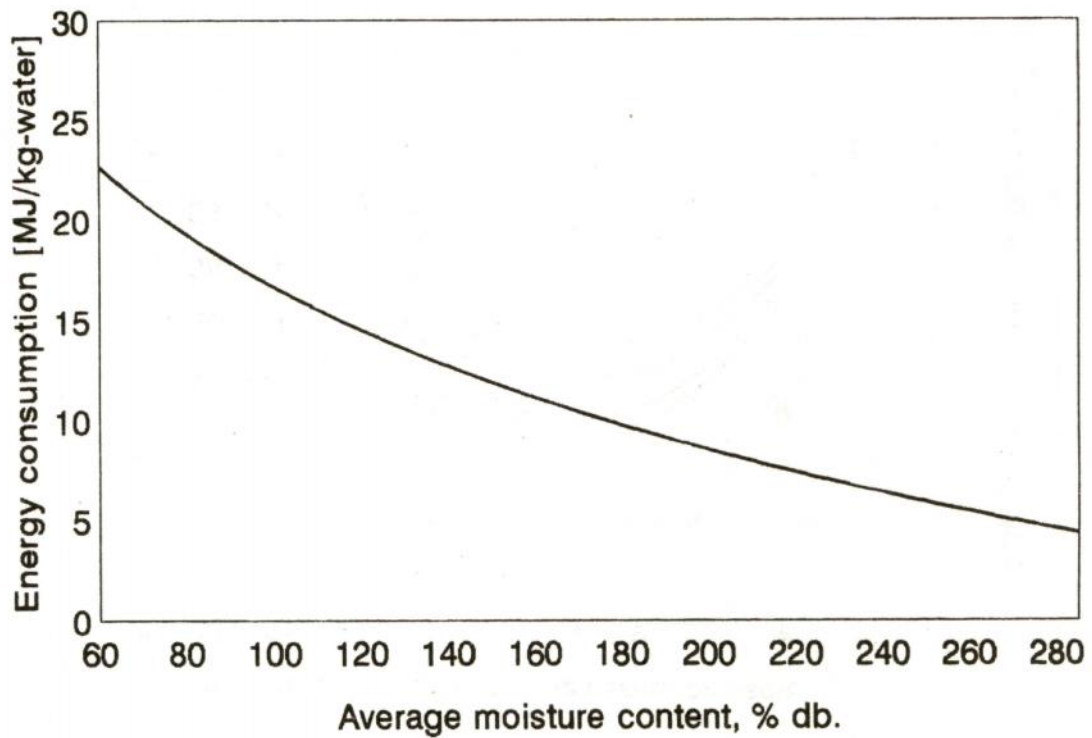


Figure 6 Effect of average moisture content on specific energy consumption
[Test No. 5, Fraction of air recycled = 80%, Temperature = 60 C] [Specific mass flow rate = 20.8 kg/h-kg dry banana]

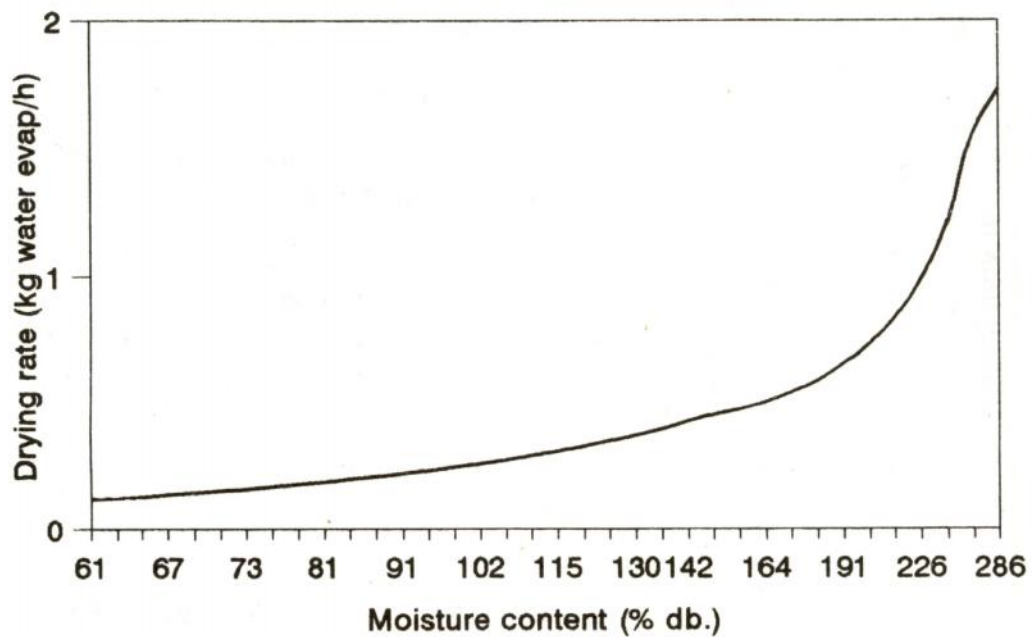


Figure 7 Effect of moisture content on drying rate
[Test No. 5, Fraction of air recycled = 80%, Temperature = 60 C] [Specific mass flow rate = 20.8 kg/h-kg dry banana]

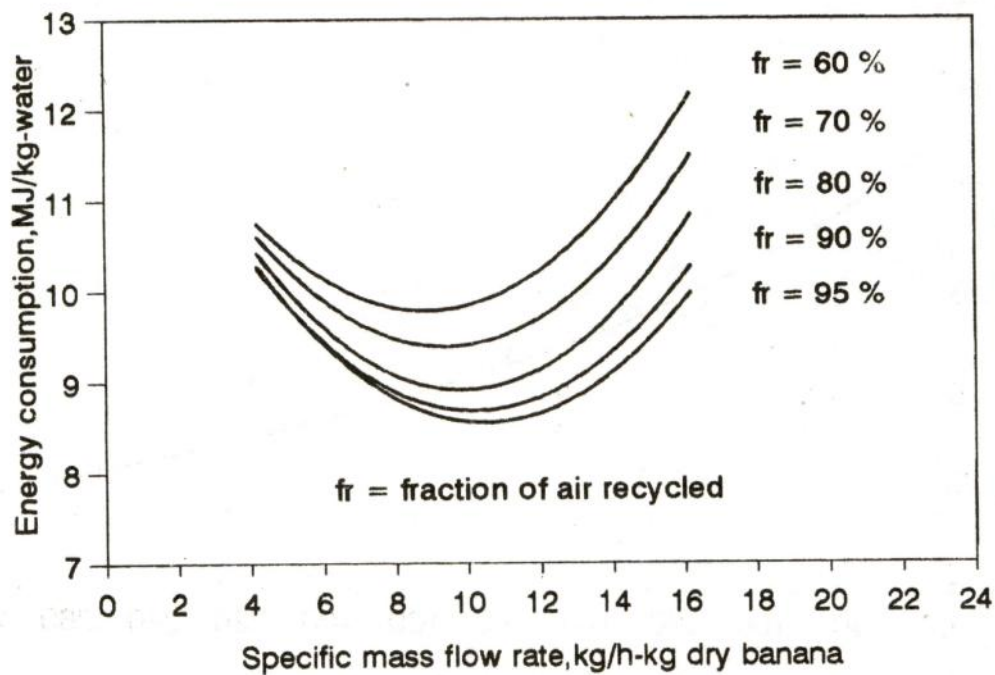


Figure 8 Effect of specific mass flow rate on energy consumption at different fraction of air recycled (Temperature = 60 C)

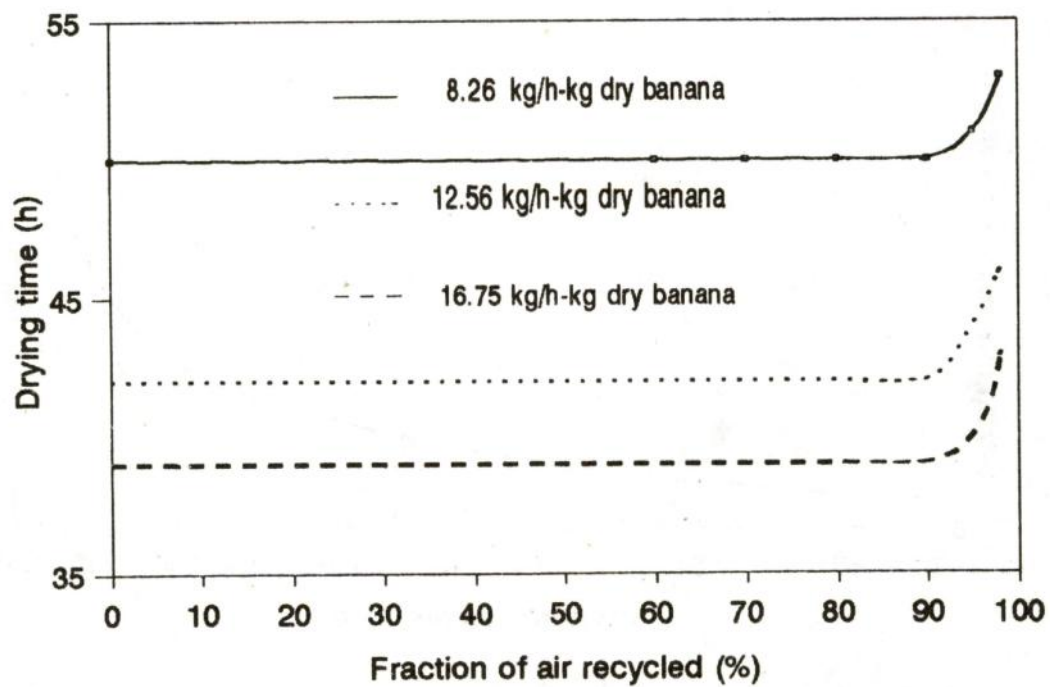


Figure 9 Effect of fraction of air recycled on drying time at different specific mass flow rate (Temperature = 60 C)