

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอบแห้งปลาไหล โดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ

Mathematical Model for Tilapia Nilotica Drying

Using Forced Circulation Solar Dryer

ธนกร หอมจำปา ทรงสุภา พุ่มชุมพล อำไพศักดิ์ ทีบุญมา*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Tanagorn Homchampa Songsupa Pumchumpol Umphisak Teeboonma*

Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchamrap, Ubon Ratchathani 34190

Tel: 0-4535-3308 E-mail: umphisak@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่มีต่ออัตราการอบแห้งและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งปลาไหลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ ในการศึกษาได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีเงื่อนไขการอบแห้ง คือ อัตราการไหลของอากาศ 20-60 kg/h สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 0-0.9 และพลังงานตกกระทบ 400-800 W/m² แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลอง พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะทำให้อัตราการอบแห้งลดลง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ จะทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลง

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่

Abstract

The purpose of this work was to study the effects of air flow rate and recycle air ratio on drying rate and specific energy consumption of Tilapia

Nilotica drying using forced circulation solar dryer.

To achieve this objective, mathematical model was developed. Drying conditions were as follows; air flow rates of 20-60 kg/h, recycle air ratios of 0-0.9 and heat flux of 400-800 W/m². Developed mathematical model was validated with the experimental result. It was found that the simulation results were in reasonable agreement with experimental results. Furthermore, it showed that the increase of air flow rate resulted in the decrease of drying rate. However, the specific energy consumption was increased. It should be noted that the increase of recycle air ratio caused the increase of drying rate and the decrease of specific energy consumption.

Keywords: Forced circulation solar dryer, mathematical model, recycle air ratio

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการอบแห้งมาใช้ลดความชื้นผลผลิตทางการเกษตร [1] เช่น นำปลาไหลมาแปรรูปเป็นปลาไหลเส้นแดดเดียว เพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น ลดปัญหาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรล้นตลาด และสร้างมูลค่าเพิ่ม ซึ่งการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรสามารถทำได้หลายวิธี [2] เช่น การอบแห้งด้วยไอ

น้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสุญญากาศ การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์เป็นวิธีที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรมทางการเกษตรขนาดเล็ก [3] และได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นมาหลายรูปแบบ เช่น เครื่องอบแห้งที่ใช้แสงอาทิตย์ร่วมกับก๊าซแอลพีจี [4] เครื่องอบแห้งที่ใช้แสงอาทิตย์ร่วมกับขดลวดไฟฟ้า [5] ซึ่งช่วยให้เกษตรกรได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี ลดเวลาในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานจากไฟฟ้า ก๊าซแอลพีจี ฟืน และน้ำมันเตา ส่งผลให้ต้นทุนการอบแห้งเพิ่มขึ้นร้อยละ 20-60 [6] ทำให้ราคาผลิตภัณฑ์อบแห้งมีราคาสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งปลาแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับ และมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ สำหรับนำไปใช้ในการหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมต่อไปในอนาคต ซึ่งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะช่วยให้สามารถหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมได้โดยไม่ต้องดำเนินการทดลอง อีกทั้งเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดต้นทุนการผลิต

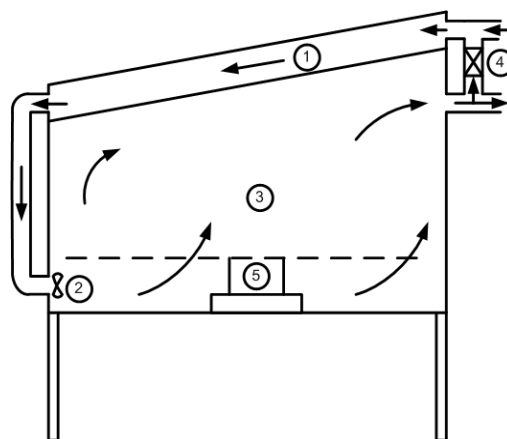
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับมีลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบ คือ แผงเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบขนาดพื้นที่ 0.60 m^2 ปิดทับด้วยกระจกใสหนึ่งชั้นหนา 3 mm แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ใช้แผ่นไม้อัดทาสีดำด้านติดตั้งทำมุมเอียง 14 องศา กับแนวระดับ ตู้อบแห้งลักษณะทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ด้านหลังมีประตูเปิด-ปิด สำหรับนำผลิตภัณฑ์อบแห้งเข้า-ออก ใช้พัดลมแบบแนวแกนเพื่อใช้ขับอากาศให้เกิดการหมุนเวียน โดยมีแฉกเปอร์สำหรับปรับสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่

หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ คือ อากาศจากแวดล้อมภายนอกจะผสมกับอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากนั้นอากาศผสมจะไหลเข้าสู่แผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ หลังจากนั้นพัดลมจะดูดอากาศร้อนไหลผ่านผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้ง โดยภายในห้องอบแห้งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมๆ กัน

ระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศ ซึ่งทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นอากาศร้อนบางส่วนจะนำกลับมาใช้ใหม่และบางส่วนปล่อยสู่ภายนอก ลักษณะการทำงานจะหมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ



รูปที่ 1 ชุดทดลองประกอบด้วย 1) แผงเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ 2) พัดลม 3) ห้องอบแห้ง 4) แฉกเปอร์ 5) โหลดเซลล์

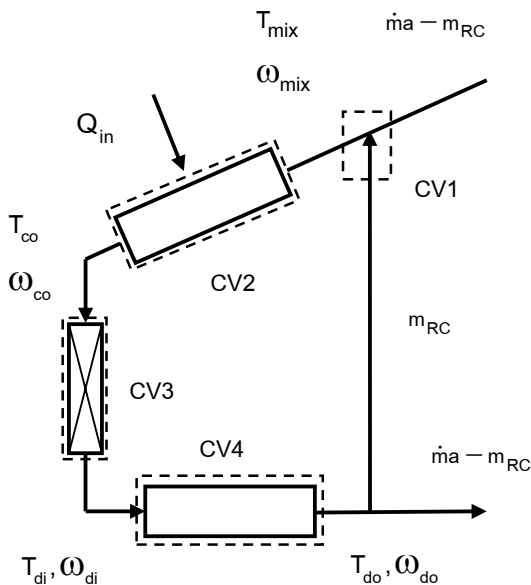
2.2 วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งในงานวิจัยนี้คือ ปลานิล โดยจะเริ่มจากชำแหละเอาส่วนที่เป็นหัวและก้างออกแล้วเอาส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นด้วยเครื่องหั่นตามความยาวของปลา ขนาด $1.0 \times 15 \times 1.0 \text{ cm}$ (กว้างxยาวxสูง) ประมาณ 1 kg นำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน และทำการอบภายใต้เงื่อนไขความเร็วอากาศทางเข้าแผงเก็บรังสี 3 m/s พลังงานตกกระทบ 400 และ 650 W/m^2 (ทดลองภายใต้ระบบแสงอาทิตย์เทียม) และสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ (R_c) เท่ากับ 0-0.9 บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในระบบ ทุกๆ 5 นาที โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองที่พัฒนามีสมมุติฐานที่สำคัญ คือ สมดุลทางความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งแบ่งปริมาณควบคุมออกเป็น 4 ปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบด้วย ปริมาตรควบคุมของสภาวะอากาศผสม (CV1) ปริมาตรควบคุมสภาวะอากาศไหลผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (CV2) ปริมาตรควบคุมของสภาวะอากาศไหลผ่านพัดลม (CV3) และ

ปริมาตรควบคุมของสภาวะอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง (CV4)



รูปที่ 2 ปริมาตรควบคุมของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับ

2.3.1 การวิเคราะห์หาความชื้นของปลานิล

การคำนวณค่าความชื้นของปลานิลอบแห้งที่เวลาใดๆ ใช้สมการการแพร่ความชื้นในรูปทรงสี่เหลี่ยม [7] โดยมีรูปแบบดังนี้

$$MR(t) = \left(\frac{8}{2} \right)^2 \frac{d}{dt} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2i+1)^2 + (2j+1)^2 + (2k+1)^2} \right] \exp \left[- \left(\frac{(2i+1)^2}{l_x^2} + \frac{(2j+1)^2}{l_y^2} + \frac{(2k+1)^2}{l_z^2} \right) \pi^2 Dt \right] \quad (1)$$

และ

$$MR(t) = \left(\frac{M_t - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \right) \quad (2)$$

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุลเนื่องจากตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น และสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น [8] มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$D = 7.1 \times 10^{-4} \exp \left(\frac{-26.68}{0.0083149 \times (T + 273.15)} \right) \quad (3)$$

โดยที่

- MR(t) คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)
- M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (% d.b.)
- M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
- M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (% d.b.)
- D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/h)
- t คือ เวลาในการอบแห้ง (h)
- l_x, l_y, l_z คือ ความยาวของวัสดุแต่ละด้าน (m)
- T คือ อุณหภูมิของอากาศ ($^{\circ}C$)

จากสมการที่ (1) สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่างๆ โดยหาอนุพันธ์ของสมการที่

(1) เทียบกับเวลา และแก้สมการด้วยวิธี Runge-Kutta order 4 จะสามารถหาความชื้นสุดท้ายได้ดังสมการที่ (4)

$$M_f = M_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (4)$$

และ

$$\begin{aligned} k_1 &= \Delta t \cdot f(t) & k_2 &= \Delta t \cdot f(t + 0.5\Delta t) \\ k_3 &= \Delta t \cdot f(t + 0.5\Delta t) & k_4 &= \Delta t \cdot f(t + \Delta t) \end{aligned}$$

โดยที่

- M_f คือ ความชื้นสุดท้าย (% d.b.)
- M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)
- Δt คือ ช่วงเวลา (h)

2.3.2 การคำนวณสภาวะอากาศผสม

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV1 จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่า มวลของไอน้ำในอากาศร้อนก่อนเข้าแผงเก็บรังสีเท่ากับผลรวมของมวลของน้ำในอากาศขาเข้ากับมวลของไอน้ำในอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\omega_{mix} = R_C \omega_{do} + (1 - R_C) \omega_{amb} \quad (5)$$

และ

$$R_C = \frac{m_{RC}}{m_a} \quad (6)$$

โดยที่

- ω_{mix} คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศผสม ($kg H_2O / kg \text{ dry air}$)

ω_{do}	คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศหลังการอบแห้ง (kg H ₂ O/kg dry air)
ω_{amb}	คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศแวดล้อม (kg H ₂ O/kg dry air)
R_C	คือ สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ (decimal)
m_{RC}	คือ อัตราการไหลของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ (kg/s)
$\dot{m}_a$	คือ อัตราการไหลของอากาศในระบบ (kg/s)

จากหลักการสมดุลพลังงานจะได้ว่า พลังงานของอากาศขาเข้าเท่ากับพลังงานของอากาศขาออกจากรีมาตรควบคุม เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_{mix} = \{[C_a T_{amb} + \omega_{amb} (h_{fg} + C_v T_{amb})] + R_C [C_a T_{do} + \omega_{do} (h_{fg} + C_v T_{do})] - \omega_{mix} h_{fg}\} / (C_v + \omega_{mix} C_v) \quad (7)$$

โดยที่

C_a	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg-°C)
C_v	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg-°C)
T_{mix}	คือ อุณหภูมิอากาศผสม (°C)
T_{amb}	คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)
T_{do}	คือ อุณหภูมิอากาศหลังการอบแห้ง (°C)
h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg-H ₂ O)

2.3.3 การคำนวณที่สภาวะอากาศไหลผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (CV2)

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV2 จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่าความชื้นของอากาศก่อนเข้าเท่ากับความชื้นอากาศหลังผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้น

$$\text{ความชื้นในอากาศคงที่ : } \omega_{ci} = \omega_{co} = \omega_{mix}$$

และจากหลักการสมดุลพลังงานบนแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์จะได้ว่า พลังงานความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์เท่ากับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่นอากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_{co} = [C_a T_{mix} + \omega_{mix} (h_{fg} + C_v T_{mix}) + (Q / \dot{m}_a) - \omega_{mix} h_{fg}] / (C_a + \omega_{mix} C_v) \quad (8)$$

$$\text{และ } Q = G_T \times A \times \eta_c \quad (9)$$

โดยที่

Q	คือ พลังงานความร้อน (kJ/s)
T_{co}	คือ อุณหภูมิอากาศหลังผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (°C)
ω_{ci}	คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศก่อนเข้าแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (kg H ₂ O/kg dry air)
ω_{co}	คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศหลังผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (kg H ₂ O/kg dry air)
A	คือ พื้นที่แผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (m ²)
G_T	คือ พลังงานตกกระทบ (W/m ²)
η_c	คือ ประสิทธิภาพแผงเก็บรังสี (decimal)

2.3.4 การคำนวณที่สภาวะอากาศไหลผ่านพัดลม (CV3)

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV3 จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่า ความชื้นของอากาศก่อนเข้าเท่ากับความชื้นอากาศหลังผ่านพัดลม ดังนั้น

$$\text{ความชื้นในอากาศคงที่ : } \omega_{co} = \omega_{di}$$

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของกระแสอากาศเท่ากับกำลังงานเพลลาที่ขับเคลื่อนพัดลม เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_{di} = [C_a T_{co} + \omega_{mix} (h_{fg} + C_v T_{co}) + W_{fan} / \dot{m}_a - \omega_{mix} h_{fg}] / (C_a + \omega_{mix} C_v) \quad (10)$$

และ

$$W_{fan} = \frac{\dot{m}a\Delta P}{\rho\eta_{fan}} \quad (11)$$

โดยที่

ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ΔP	คือ ความดันที่ลดลงระหว่างพัดลม (kPa)
η_{fan}	คือ ประสิทธิภาพของพัดลม (decimal)
T_{di}	คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
W_{fan}	คือ กำลังงานเพลที่ขับเคลื่อนพัดลม (kW)
ω_{di}	คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง ($\text{kg H}_2\text{O/kg dry air}$)

2.3.5 การคำนวณที่สภาวะอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง (CV4)

พิจารณาปริมาตรควบคุม CV4 จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่า ความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ น้ำที่ระเหยออกจากวัสดุที่อบแห้ง ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\omega_{do} = \omega_{mix} + R(M_i - M_f) \quad (12)$$

และ

$$R = \frac{m_p}{\dot{m}a} \quad (13)$$

โดยที่

m_p คือ น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์ (kg)

จากหลักการสมดุลพลังงาน เนื่องจากไม่มีงานที่เข้าและออกจากระบบและจากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานของกระแสอากาศที่เข้าและออกจากห้องอบแห้งเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในวัสดุอบแห้ง เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_{do} = [C_a T_{di} + \omega_{mix} (h_{fg} + C_v T_{di}) - \omega_{do} h_{fg} + RC_p T_{di}] / (C_a + \omega_{do} C_v + RC_p) \quad (14)$$

2.3.6 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองระบบเริ่มจากการป้อนค่าของตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นตัวที่ทราบค่าและค่าคงที่ไว้ในแบบจำลองการคำนวณเริ่มต้นโดยสมมุติ ω_{di} จากนั้นคำนวณหาค่า RH จากนั้นคำนวณค่า M_f , ω_{do} , T_{do} และคำนวณค่า $\omega_{di,new}$ เมื่อได้ $\omega_{di,new}$ แล้วจะเปรียบเทียบกับค่า ω_{di} ที่สมมุติ ถ้าผลแตกต่างระหว่าง $\omega_{di,new}$ กับ ω_{di} ที่สมมุติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) ก็กลับไปคำนวณใหม่โดยหลักการ Newton Raphson ถ้าผลต่างระหว่าง $\omega_{di,new}$ กับ ω_{di} ที่สมมุติน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ก็ตรวจสอบค่า $RH < 1$ ขั้นตอนต่อไปคือคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงาน โปรแกรมจะทำการคำนวณไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าความชื้นของปลานิลเส้นจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความชื้นของปลานิลเส้นที่ต้องการ และบันทึกค่าพลังงานที่ใช้ หลังจากนั้นเริ่มคำนวณในเงื่อนไขต่อไป และบันทึกค่าพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอื่นๆ การคำนวณจะกระทำต่อไปเรื่อยๆจนครบทุกเงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 3

2.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) เป็นปัจจัยที่แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการอบแห้งลดความชื้นของวัสดุ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$DR = \frac{M_{in} - M_t}{t} \quad (15)$$

โดยที่

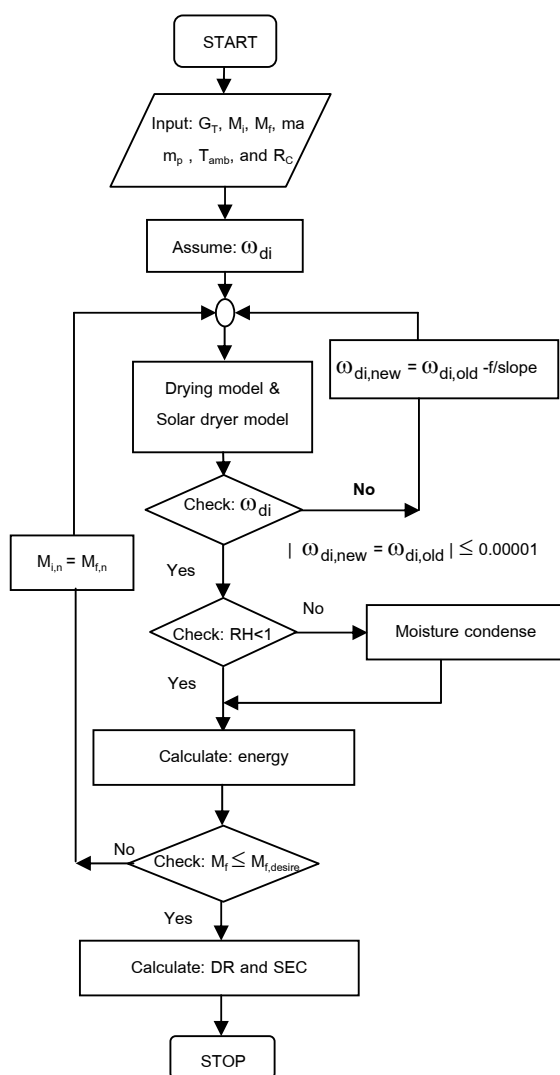
DR คือ อัตราการอบแห้ง (kg/h)

ความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือ ดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการระเหยน้ำ ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$SEC = \frac{\text{Total energy consumption (MJ)}}{\text{Water evaporate from product (kg water)}} \quad (16)$$

โดยที่

SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($\text{MJ/kg}_{\text{water}}$)



รูปที่ 3 ขั้นตอนการจำลองระบบ

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

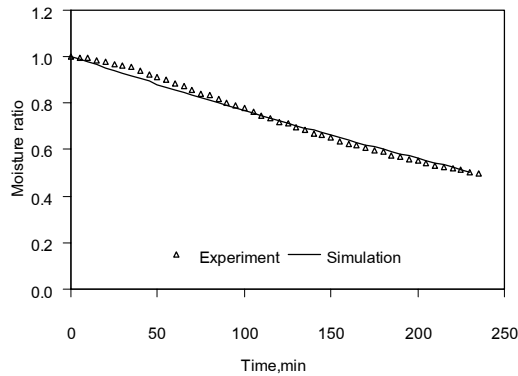
ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลจากการทดลองภายใต้เงื่อนไขค่าพลังงานตกกระทบ 400 และ 650 W/m² ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300 % d.b. อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้าย 150 % d.b. อัตราการไหลของอากาศ 23 kg/h สามารถแสดงผลดังรูปที่ 4 จากข้อมูลพบว่า ค่าอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกับลักษณะการลดลงของอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตามมีส่วนที่แตกต่างกันคือ

ในช่วงแรกของการอบแห้ง ค่าอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นที่ได้จากข้อมูลการทดลอง เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งเป็นช่วงการเพิ่มอุณหภูมิ (heat up) ของปลานิลทำให้อัตราการลดลงของความชื้นปลานิลเส้นต่ำ ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง เมื่อเริ่มต้นการอบแห้งค่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นทันที ดังนั้นในช่วงแรกของการอบแห้งค่าอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าสูงกว่าแบบจำลอง และหลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง

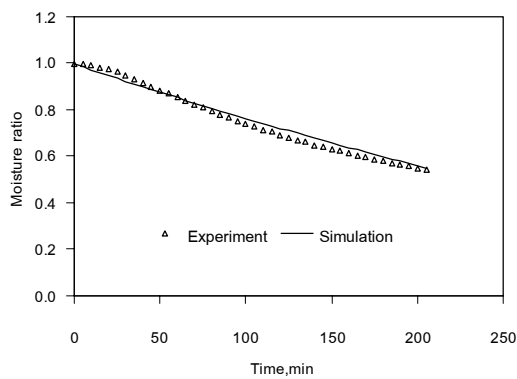
3.2 ผลของอัตราการไหลของอากาศและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่มีต่ออัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งจากการใช้แบบจำลอง

ผลของอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่มีต่ออัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ใช้ในการจำลองสถานะ คือ ปลานิลเส้นหนัก 1 kg ความชื้นเริ่มต้นของปลานิลเส้น 300 % d.b. ความชื้นสุดท้าย 150 % d.b. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 27 °C ความชื้นสัมพัทธ์อากาศแวดล้อม 75 % แสดงดังรูปที่ 5 จากข้อมูลพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์มีค่าลดลง ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 6 ผลของปัจจัยดังกล่าวจึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้นและส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ ทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลง ซึ่งเกิดจากการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่เป็นการนำอากาศที่มีอุณหภูมิสูง(อากาศหลังการอบแห้ง) มาผสมกับอากาศแวดล้อม ทำให้อุณหภูมิอากาศก่อนไหลเข้าแผงเก็บรังสีมีอุณหภูมิสูงขึ้น หลังจากนั้น อากาศส่วนนี้ก็จะรับพลังงานความร้อนจากแผงเก็บรังสีอีกครั้งทำให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น

กว่ากรณีไม่มีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ ในหลักการเดียวกันเมื่อเพิ่มสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ก็จะทำให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าห้องอบแห้งได้สูงขึ้นเรื่อยๆ จึงส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น

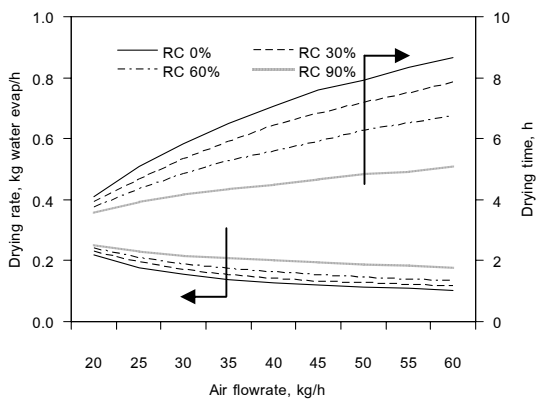


a) RC 80 %, Heat flux 400 W/m²

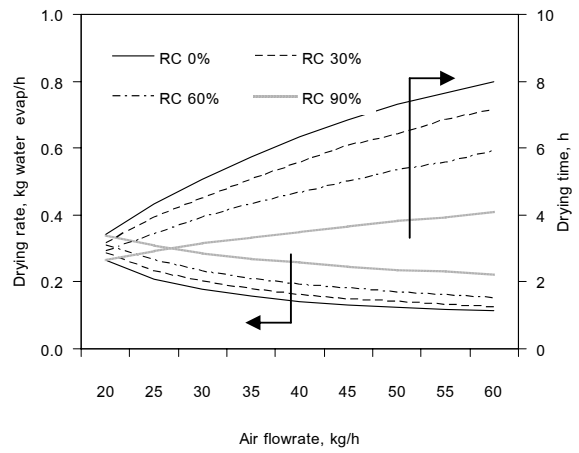


b) RC 0 %, Heat flux 650 W/m²

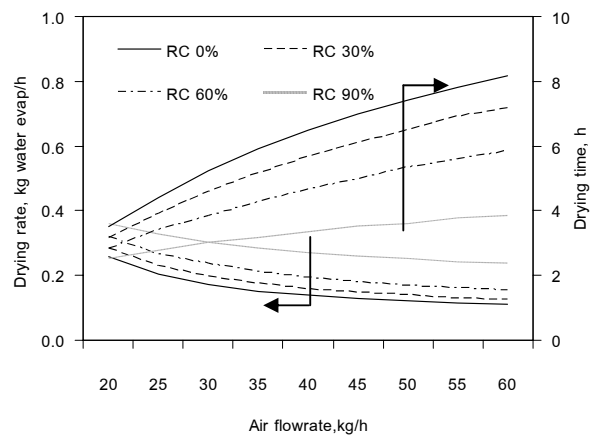
รูปที่ 4 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองที่ค่าพลังงานตกกระทบบต่างๆ



a) Heat flux 400 W/m²

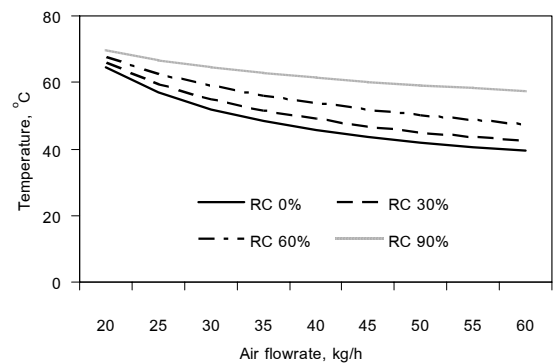


b) Heat flux 600 W/m²



c) Heat flux 800 W/m²

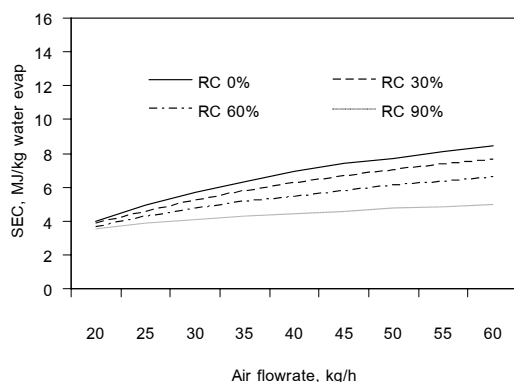
รูปที่ 5 ผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่ออัตราการอบแห้งและเวลาในการอบแห้ง



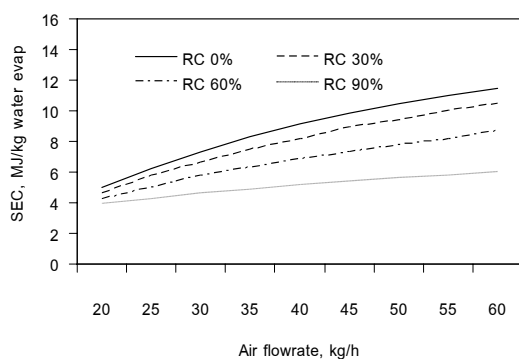
รูปที่ 6 ค่าอุณหภูมิที่ไหลออกจากแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆภายใต้ค่าพลังงานตกกระทบบ 400 W/m²

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

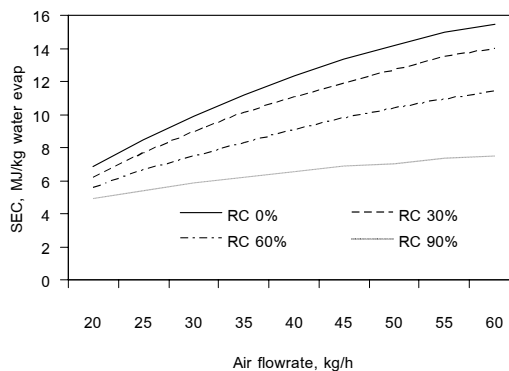
ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งปลานิลเส้นด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับ โดยพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้อบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนกระทั่งความชื้นของปลานิลเส้นลดลงเหลือ 150 % d.b. แสดงดังรูปที่ 7 ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศทำให้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ จะทำให้อุณหภูมิอากาศที่ไหลออกจากแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์มีค่าลดลง การเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุที่อบแห้งแพร่มาที่ผิววัสดุช้า จึงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งนาน ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานสูง และพบว่า ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงส่งผลให้เวลาในการอบแห้งลดลง ทำให้ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงไปด้วย



a) Heat flux 400 W/m²



b) Heat flux 600 W/m²



c) Heat flux 800 W/m²

รูปที่ 7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะภายใต้เงื่อนไขค่าพลังงานตกกระทบต่างๆ

4. สรุป

จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ของการอบแห้งปลานิลเส้นโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดลอง นอกจากนั้นยังพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ จะทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าลดลง และค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงขึ้น การนำอากาศกลับมาใช้ใหม่สามารถลดระยะเวลาการอบแห้ง เพิ่มสมรรถนะเครื่องอบแห้ง และลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วราภรณ์ รัตตนาพิสัย, สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และ ธนิต สวัสดิ์เสวี. 2542. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอบแห้งผลไม้โดยใช้บิโคมความร้อน. วิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ ปีที่ 33, 1: 146-158.
- [2] Chua, K.J. and Chua, S.K. 2003. Low-cost drying method for developing countries. Trends in Food Science, 14: 519-528.
- [3] เฟซัญ จันทรสา, บัณฑิต ลิ้มมีโชคชัย และ จ่านง สรพิพัฒน์. 2550. การศึกษาเครื่องอบแห้งพลังงาน

แสงอาทิตย์ในประเทศไทย: สมรรถนะเชิงพลังงาน และแนวทางการส่งเสริม. การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานประเทศไทยครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 23-25 พฤษภาคม 2550.

- [4] Smitabhindu, R., Janjia, S. and Chankong, V. 2008. Optimization of a solar-assisted drying system for drying banana. Renewable Energy, 33: 1523-1531.
- 5] Sarsavadia, P.N. 2007. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. Renewable Energy. 32: 2529-2547.
- [6] วีระศักดิ์ หุตากร. 2552. การศึกษาสมรรถนะของแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์แผ่นราบ แบบร่องตัววีสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, เชียงใหม่, ประเทศไทย, 4-7 พฤศจิกายน 2552.
- [7] Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion, Oxford University Press, U.K.
- [8] ประทีป ตุ่มทอง และ อำไพศักดิ์ ที่บุญมา. 2553 จลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ของปลานิล, วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ. ปีที่ 3, 2: 9-16.