

## เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ Appropriate drying conditions of *Tilapia nilotica* using solar dryer

ชนกร หอมจำปา<sup>\*</sup>, ทรงสุภา พุ่มชุมพล<sup>1</sup>, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา<sup>1</sup>

Tanagorn Homchampa<sup>\*</sup>, Songsupa Pumchumpol<sup>1</sup>, Umphisak Teeboonma<sup>1</sup>

Received: 15 October 2012 ;Accepted: 10 December 2012

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับและได้ตรวจสอบความถูกต้องกับผลการทดลอง หลังจากนั้นแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ได้ถูกนำไปใช้เพื่อหาเงื่อนไขการอบแห้งปลานิลที่เหมาะสม โดยมีเกณฑ์ที่ใช้บังคับซึ่งเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด และมีเงื่อนไขบังคับ คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง อัตราการไหลอากาศ สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ผลจากการศึกษาพบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายผล ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่า เงื่อนไขการอบแห้งปลานิลที่เหมาะสม คือ อัตราการไหลของอากาศอยู่ระหว่าง 16 - 20 kg/h และค่าสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่อยู่ระหว่าง 0.01-0.88 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ตกกระทบบ

**คำสำคัญ:** เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม

### Abstract

In this research, a mathematical model of a *Tilapia nilotica* drying solar dryer by force convection was developed and validated with experimental results. Subsequently, it was implemented in an optimization program to find out the appropriate drying conditions of *Tilapia nilotica*. The optimal criterion is minimum specific energy consumption. There are four major constraints: drying air temperature, air flow rate, recycle air ratio, and drying time. The study results showed that the simulation results are in reasonable agreement with the experimental results. Additionally, it was found that the optimum air flow rate and air recycle air ratio are in range of 16 – 20 kg/h and 0.1-0.88, respectively. It should be noted that the appropriate drying conditions depend significantly on heat flux.

**Keywords:** solar dryer, specific energy consumption, appropriate drying condition

### บทนำ

ปลานิลเป็นปลาน้ำจืดที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและเป็นที่ต้องการของตลาดเนื่องจากมีเนื้อนุ่มและรสชาติอร่อย สามารถนำมาประกอบอาหารและนำมาแปรรูปได้หลายอย่าง เพื่อการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ จังหวัดอุบลราชธานีมีกลุ่มแม่บ้านหลายกลุ่มที่แปรรูปปลานิลสดแห้งเดี่ยว<sup>1</sup> เช่น กลุ่มสตรีบ้านทัพไทย กลุ่มแปรรูปปลานิลสดเดี่ยว และกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแปรรูปสัตว์น้ำ เป็นต้น ซึ่งแต่ละ

กลุ่มมีกำลังการผลิตไม่เพียงพอกับความต้องการของตลาด เนื่องจากกระบวนการอบแห้งของกลุ่มแม่บ้านยังใช้วิธีตากแดดหรือใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แต่ยังประสบปัญหาใช้เวลาอบแห้งนาน ดังนั้นจึงควรมหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อลดระยะเวลาอบแห้งและลดค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ซึ่งตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพของผลิตภัณฑ์และความสิ้นเปลืองพลังงาน ได้แก่ ค่าพลังงานตกกระทบบ อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการไหล

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

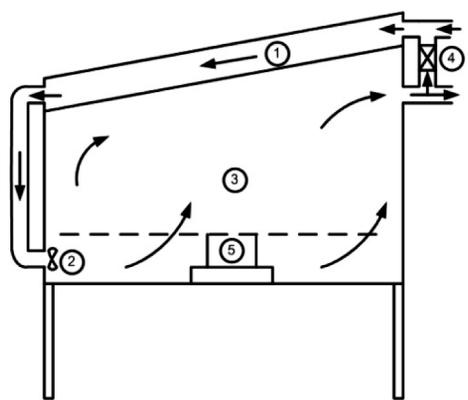
<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap Distric, Ubonratchathani 34190

\* Corresponding author; Tanagorn Homchampa, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamagala University of Technology Isan, Surin Campus, Surin 32000, Thailand. book\_kingkong@hotmail.com,

ของอากาศ และสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ การดำเนินการทดลองเพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดนั้นเป็นการสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมาก วิธีการหนึ่งที่จะลดค่าใช้จ่ายและเวลา ก็คือการจำลองการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการอบแห้งปลานิลเส้นที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับและมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**อุปกรณ์และวิธีการทดลอง**

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเวียนอากาศแบบบังคับมีลักษณะการทำงานแสดงดัง Figure 1 ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ อากาศจากแวลวล้อมภายนอกจะผสมกับอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ จากนั้นอากาศผสมจะไหลเข้าสู่แผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ หลังจากนั้นพัดลมจะดูดอากาศร้อนไหลผ่านผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้ง โดยภายในห้องอบแห้ง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและมวลพร้อมๆ กัน ระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศ ซึ่งทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นอากาศร้อนบางส่วนจะนำกลับมาใช้ใหม่และบางส่วนปล่อยสู่ภายนอก ลักษณะการทำงานจะหมุนเวียนเช่นนี้ไปเรื่อยๆ



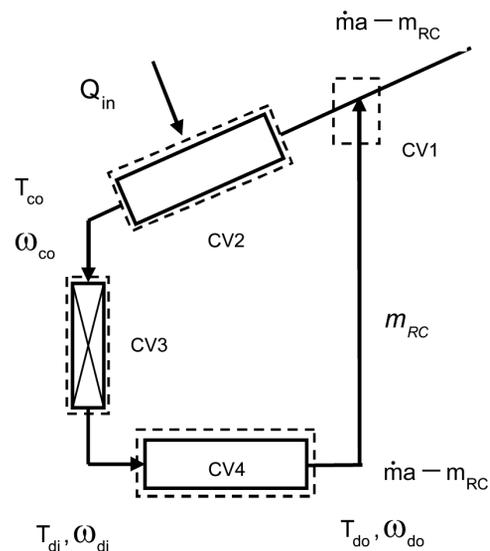
**Figure 1** Experimental set-up of the solar dryer; 1) Solar collector, 2) Fan, 3) Drying chamber, 4) Valve, 5) Load cell

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ออบแห้งในงานวิจัยนี้คือ ปลานิล โดยจะเริ่มจากชำแหละเอาส่วนที่เป็นหัวและก้างออกแล้วเอาส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นด้วยเครื่องหั่นตามความยาวของปลา ขนาด 1.0x15x1.0 cm<sup>3</sup> (กว้างxยาวxสูง) ประมาณ 1 kg นำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน และทำการอบภายใต้เงื่อนไขความเร็วอากาศทางเข้าแผงเก็บรังสี 3 m/s พลังงานตกกระทบ 400 และ 650 W/m<sup>2</sup> (ทดลองภายใต้ระบบ

แสงอาทิตย์เทียม) และสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ (R<sub>c</sub>) เท่ากับ 0 - 1 บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ในระบบ ทุกๆ 5 นาที โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูล

**แบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

แบบจำลองที่พัฒนามีสมมุติฐานที่สำคัญ คือ สมดุลทางความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็น 4 ปริมาตรควบคุมดังแสดงใน Figure 2 ประกอบด้วย ปริมาตรควบคุมของสภาวะอากาศผสม (CV1) ปริมาตรควบคุมสภาวะอากาศไหลผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (CV2) ปริมาตรควบคุมของสภาวะอากาศไหลผ่านพัดลม (CV3) และปริมาตรควบคุมของสภาวะอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง (CV4)



**Figure 2** Control volumes

**การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความชื้น**

การคำนวณค่าความชื้นของปลานิลอบแห้งที่เวลาใดๆ ใช้สมการการแพร่ความชื้นในรูปทรงสี่เหลี่ยม<sup>2</sup> โดยมีรูปแบบสมการดังนี้

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

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

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล เนื่องจากตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น และสมมติประสิทธิภาพการแพร่ความชื้น<sup>3</sup> มีความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ

- MR 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, °C

จากสมการที่ (1) สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเวลาต่างๆ โดยหาอนุพันธ์ของสมการที่ (1) เทียบกับเวลาและแก้สมการด้วยวิธี Runge-Kutta order 4 จะสามารถหาความชื้นสุดท้ายได้ดังสมการที่ (4)

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

และ  $k_1 = \Delta t.f(t)$        $k_2 = \Delta t.f(t + 0.5\Delta t)$   
 $k_3 = \Delta t.f(t + 0.5\Delta t)$        $k_4 = \Delta t.f(t + \Delta t)$

เมื่อ

- $M_f$  คือ ความชื้นสุดท้าย, % d.b
- $M_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้น, % d.b.
- $\Delta t$  คือ ช่วงเวลา, h

**การคำนวณสภาวะอากาศผสม (CV1)**

จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่า มวลของไอน้ำในอากาศร้อนก่อนเข้าแผงเก็บรังสีเท่ากับ ผลรวมของมวลของน้ำในอากาศขาเข้ากับมวลของไอน้ำในอากาศร้อนที่ นำกลับมาใช้ สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ

- $\omega_{mix}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศผสม, kg H<sub>2</sub>O/ kg dry air
- $\omega_{do}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศหลังการอบแห้ง, kg H<sub>2</sub>O/ kg dry air
- $\omega_{amb}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศแวดล้อม, kg H<sub>2</sub>O/ kg dry air
- $R_C$  คือ สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่, decimal
- $m_{RC}$  คือ อัตราการไหลของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่, kg/s
- $m_{RC}$  คือ อัตราการไหลของอากาศในระบบ, kg/s

จากหลักการสมดุลพลังงานจะได้ว่า พลังงานของอากาศขาเข้าเท่ากับพลังงานของอากาศขาออกจากปริมาตรควบคุม เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

เมื่อ

- $C_a$  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<sub>2</sub>O

### การคำนวณที่สภาวะอากาศไหลผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ (CV2)

จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่าความชื้นของอากาศก่อนเข้าเท่ากับความชื้นอากาศหลังผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์ ดังนั้น ความชื้นในอากาศคงที่หรือ  $\omega_{ci} = \omega_{co} = \omega_{mix}$  จากหลักการสมดุลพลังงานบนแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์จะได้ว่า พลังงานความร้อนที่นำมาใช้ประโยชน์เท่ากับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่นอากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ

- Q คือ พลังงานความร้อน, kJ/s
- $T_{co}$  คือ อุณหภูมิอากาศหลังผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์, °C
- $\omega_{ci}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศก่อนเข้าแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์, kg H<sub>2</sub>O/kg dry air
- $\omega_{co}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศหลังผ่านแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์, kg H<sub>2</sub>O/kg dry air
- A คือ พื้นที่แผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์, m<sup>2</sup>
- $G_T$  คือ พลังงานตกกระทบ, W/m<sup>2</sup>
- $\eta_c$  คือ ประสิทธิภาพแผงเก็บรังสีดวงอาทิตย์, decimal

### การคำนวณที่สภาวะอากาศไหลผ่านพัดลม (CV3)

จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่า ความชื้นของอากาศก่อนเข้าเท่ากับความชื้นอากาศหลังผ่านพัดลม ดังนั้น ความชื้นในอากาศคงที่ หรือ  $\omega_{co} = \omega_{di}$

จากหลักการสมดุลพลังงานจะได้ว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของกระแสอากาศเท่ากับกำลังงานเพลลาที่ขับเคลื่อนพัดลม เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ

- $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m<sup>3</sup>
- $\Delta P$  คือ ความดันที่ลดลงระหว่างพัดลม, kPa
- $\eta_{fan}$  คือ ประสิทธิภาพของพัดลม, decimal
- $T_{di}$  คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, °C
- $W_{fan}$  คือ กำลังงานเพลลาที่ขับเคลื่อนพัดลม, kW
- $\omega_{di}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจำเพาะของอากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง, kg H<sub>2</sub>O/kg dry air

### การคำนวณที่สภาวะอากาศไหลผ่านห้องอบแห้ง (CV4)

จากหลักการสมดุลมวลจะได้ว่า ความชื้นของอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุที่อบแห้ง ซึ่งสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ  $m_p$  คือ น้ำหนักแห้งของผลิตภัณฑ์, kg

จากหลักการสมดุลพลังงาน เนื่องจากไม่มีงานที่เข้าและออกจากระบบและจากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอากาศที่เข้าและออกจากห้องอบแห้งเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในวัสดุอบแห้ง เมื่อไม่คิดการสูญเสียความร้อนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

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

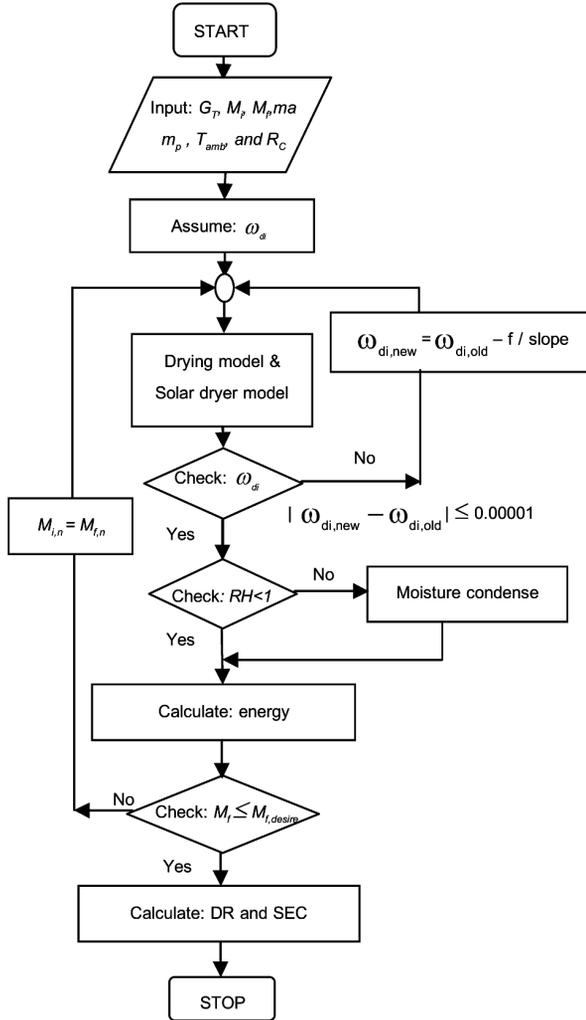


Figure 3 Computer simulation flowchart

**ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**  
 แบบจำลองระบบเริ่มจากการป้อนค่าของตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ทราบค่า การคำนวณเริ่มต้นโดยสมมุติ  $\omega_{di}$  จากนั้นคำนวณหา  $RH$  จากนั้นคำนวณค่า  $M_f$ ,  $\omega_{do}$ ,  $T_{do}$  และคำนวณค่า  $\omega_{di,new}$  เมื่อได้  $\omega_{di,new}$  แล้วจะเปรียบเทียบกับค่า  $\omega_{di}$  ที่สมมุติ ถ้าผลแตกต่างระหว่าง  $\omega_{di,new}$  กับ  $\omega_{di}$  ที่สมมุติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.00001) ก็กลับไปคำนวณใหม่โดยหลักการ Newton Raphson ถ้าผลต่างระหว่าง  $\omega_{di,new}$  กับ  $\omega_{di}$  ที่สมมุติน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ก็ตรวจสอบค่า  $RH$  ถ้า  $RH > 1$  ก็ไปคำนวณ subprogram moisture condense<sup>4</sup> ขั้นตอนต่อไปคือคำนวณความสิ้นเปลืองพลังงาน โปรแกรมจะทำการคำนวณไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าความชื้นของปลาแห้งจะมีค่าน้อยกว่าหรือ

เท่ากับค่าความชื้นของปลาแห้งที่ต้องการ และบันทึกค่าพลังงานที่ใช้ดัง Figure 3

**การหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม**

สำหรับการหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม มีฟังก์ชันกวดัตถุประสงค์ คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Y = \text{ค่าความสิ้นเปลืองของพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด} \quad (15)$$

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ในการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหลเชิงมวลและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (16)

$$\text{Minimize} \longrightarrow Y = f(\dot{m}_a, R_C) \quad (16)$$

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการที่ (17)

$$SEC = \frac{\text{Total energy consumption (MJ)}}{\text{Water evaporate from product (kg water)}} \quad (17)$$

ในการหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของการอบแห้งปลาแห้งมีเงื่อนไขบังคับที่สำคัญ คือ อุณหภูมิอบแห้ง อัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ และเวลาในการอบแห้ง ซึ่งเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_{di} \leq 70^\circ C \quad (18)$$

$$15 \frac{kg}{h} \leq \dot{m}_a \leq 60 \frac{kg}{h} \quad (19)$$

$$0 \leq R_C < 1 \quad (20)$$

$$0 \leq 4h \quad (21)$$

**ขั้นตอนการหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม**

การหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีค้นหา (Search method) ในการหาคำตอบ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มต้นจากการกำหนดค่าพลังงานตกกระทบ 400 W/m<sup>2</sup> อัตราการไหลของอากาศ 15 kg/h และสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ 0 หลังจากนั้นจะเริ่มการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งปลานิลเส้น และค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงาน หลังจากนั้นจะทำการบันทึกค่าเพื่อไว้เปรียบเทียบในแต่ละรอบการคำนวณ

2. ตรวจสอบเงื่อนไขค่าสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ ถ้าค่า R<sub>c</sub> มีค่าตามที่กำหนดไว้ (R<sub>c</sub> < 1) จะทำการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งปลานิลเส้นซ้ำ โดยเพิ่มค่า R<sub>c</sub> รอบการคำนวณละ 0.01 (R<sub>c</sub> = R<sub>c</sub> + 0.01)

3. ตรวจสอบเงื่อนไขค่าอัตราการไหลของอากาศ ถ้าค่า ḡ<sub>a</sub> มีค่าตามที่กำหนดไว้ (ḡ<sub>a</sub> < 60 kg/h) จะทำการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งปลานิลเส้นซ้ำ โดยเพิ่มค่า ḡ<sub>a</sub> รอบละ 1 kg/h และกำหนดให้ค่า R<sub>c</sub> เริ่มต้นเท่ากับ 0 (ḡ<sub>a</sub> = ḡ<sub>a</sub> + 1 kg/h, R<sub>c</sub> = 0)

4. ตรวจสอบค่าพลังงานตกกระทบ ถ้าค่าพลังงานตกกระทบมีค่าตามที่กำหนดไว้ (G<sub>T</sub> < 800 W/m<sup>2</sup>) จะทำการคำนวณแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งปลานิลเส้นซ้ำ โดยเพิ่มค่า G<sub>T</sub> รอบละ 20 W/m<sup>2</sup> จากนั้นกำหนดให้ค่า R<sub>c</sub> และ ḡ<sub>a</sub> เริ่มต้นเท่ากับ 0 และ 15 kg/h ตามลำดับ (G<sub>T</sub> = 400 + 20 W/m<sup>2</sup>, ḡ<sub>a</sub> = 15 kg/h, R<sub>c</sub> = 0)

โปรแกรมจะคำนวณไปเรื่อยๆจนครบทุกเงื่อนไข และทำการเปรียบเทียบค่าเพื่อหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสม

**ผลและวิจารณ์**

**การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์**

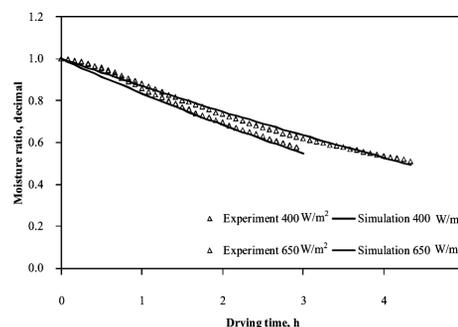
ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขค่าพลังงานตกกระทบ 400 และ 650 W/m<sup>2</sup> ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300 % d.b. อบให้เหลือความชื้นสุดท้าย 150 % d.b. โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 20 kg/h สามารถนำเสนอผลการวิเคราะห์ที่ได้ตั้ง Figure 4 จากการศึกษพบว่า ค่าอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าลดลงค่อนข้างเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปค่าอัตราส่วนความชื้นของปลานิลเส้นจะเริ่มลดช้าลงเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

**เงื่อนไขการอบแห้งปลานิลเส้นที่เหมาะสม**

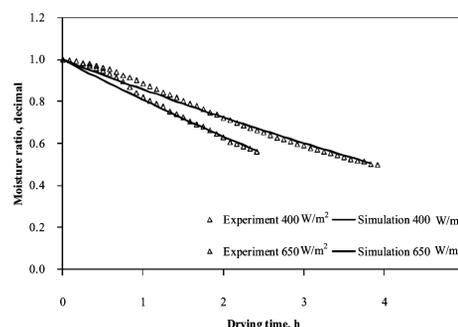
การหาเงื่อนไขการอบแห้งปลานิลเส้นที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการไหลเวียนอากาศแบบบังคับและมีการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ซึ่ง

พิจารณาจากค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด มีเงื่อนไขในการพิจารณาเริ่มต้นคือ ปลานิลเส้นสดน้ำหนักเริ่มต้น 1 kg ความชื้นเริ่มต้นของปลานิลเส้นประมาณ 300 % d.b. อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือ 150 % d.b. ซึ่งเป็นค่าความชื้นของปลานิลเส้นแดดเดียวที่มีขายตามท้องตลาดอากาศแวดล้อม 27°C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 70% โดยมีเงื่อนไขบังคับในการพิจารณาที่สำคัญคือ อุณหภูมิอบแห้งไม่เกิน 70°C เนื่องจากจะมีผลต่อคุณภาพและระยะเวลาการอบแห้งไม่เกิน 4 ชั่วโมง ผลจากการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมภายใต้ค่าพลังงานตกกระทบที่ต่างกันสามารถนำเสนอได้ตั้งข้อมูลใน Figure 5

จากข้อมูลใน Figure 5 พบว่า อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 16 - 20 kg/h ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพลังงานตกกระทบเพิ่มขึ้น และค่าสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพลังงานตกกระทบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่าพลังงานตกกระทบสูงอุณหภูมิที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสีมีค่าสูง ดังนั้นจึงต้องใช้ค่าอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นและลดค่าสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่เพื่อไม่ให้อุณหภูมิเกิน 70°C สำหรับค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะและอัตราการอบแห้งแสดงข้อมูลตั้ง Figure 6 จากข้อมูลพบว่า ค่าความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะที่ใช้มีค่าอยู่ในช่วง 7.2 - 13.6 MJ/kg water evap. และมีค่าอัตราการอบแห้งระหว่าง 0.117 - 0.124 kg water evap./h



(a) R<sub>c</sub> 0.4



(b) R<sub>c</sub> 0.8

**Figure 4** Comparison of experimental with simulation results of *Tilapia nilotica* drying

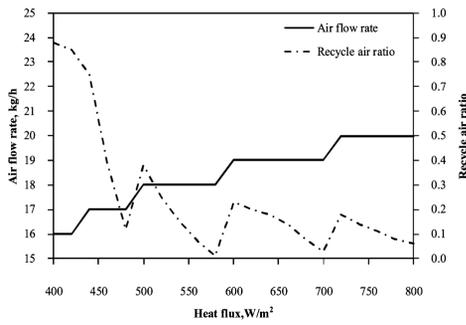


Figure 5 Appropriate drying conditions at different heat flux

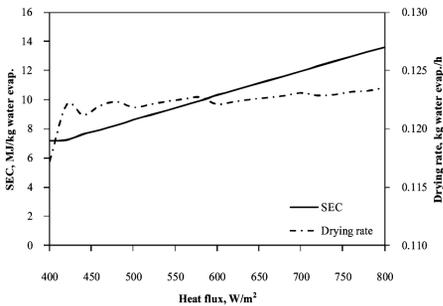


Figure 6 Specific energy consumptions and drying rate of *Tilapia nilotica* drying

สำหรับการนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ที่สภาวะพลังงานตกกระทบจริงซึ่งแสงแดดมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาสามารถทำได้โดยการสร้างชุดควบคุมการทำงานจากความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของอากาศและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่ค่าพลังงานตกกระทบต่างๆ เพื่อปรับค่าอัตราการไหลของอากาศและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ให้เหมาะสมและระบบทำงานภายใต้ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลจาก Figure 5 ตัวอย่างเช่น ถ้าค่าพลังงานตกกระทบ 400 W/m<sup>2</sup> อัตราการไหลของอากาศและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 16 kg/h และ 0.88 ตามลำดับ

**สรุปผลการทดลอง**

ผลจากการศึกษา พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลของอากาศและสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 16 - 20 kg/h และ 0.01 - 0.88 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพลังงานตกกระทบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัดส่วนการนำอากาศกลับมาใช้ใหม่มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพลังงานตกกระทบเพิ่มขึ้น

**กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณ ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

**เอกสารอ้างอิง**

1. ไทยตำบลดอทคอม. รายชื่อผู้ผลิตสินค้า OTOP ที่ได้รับการคัดสรรสุดยอดสินค้าOPC ปี 2549. สืบค้นจาก [http://www.thaitambon.com/PC25\\_49P/UB49.htm](http://www.thaitambon.com/PC25_49P/UB49.htm). สืบค้นเมื่อวันที่ 5/8/2554.
2. Crank J. The Mathematics of Diffusion. UK: Oxford University Press; 1975.
3. ประทีป ตุ่มทอง, อ่ำไพศักดิ์ ที่บุญมา. จลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ของปลานิล. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.2553; 3(2): 9-16.
4. วีรศักดิ์ วงศาสุราษฎร์. การอบดีไมซ์การใช้พลังงานในการอบแห้งลำไยแบบเบดอยู่กับที่. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2546.