



การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ
ของการทำแห้งปลาช่อนด้วยแสงอาทิตย์

Natural Convective Heat Transfer Coefficients for Solar Drying
of Striped Snakehead Fish (*Channa Striatus*)

อิลีหัยะ สนิโซ^{1*} อามีเนาะ สาเล็ง¹ และ แววมละห์ แวดอเลาะ¹

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นในการทำแห้งชิ้นปลาช่อนขนาด $0.5 \times 4.5 \times 7.0$ เซนติเมตร แบบธรรมชาติด้วยแสงอาทิตย์ การทดลองมี 2 แบบ คือ แบบตากปกติและแบบตากแบบมีที่บังลม โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ $Nu = h_c X / K = N(Ra)^n$ เมื่อค่าคงตัว N และ n หาได้จากการวิเคราะห์สมการการถดถอยเชิงเส้น จากการทดลองพบว่า ชิ้นปลาช่อนที่ตากแห้งแบบปกติมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยเท่ากับ $10.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ เมื่อค่า N และ n เท่ากับ 2.2 และ 0.1 ตามลำดับ และเท่ากับ $9.4 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ สำหรับชิ้นปลาช่อนที่ตากแห้งแบบมีที่บังลม เมื่อค่า N และ n เท่ากับ 1.3 และ 0.2 ตามลำดับ โดยที่ค่า $Pr = 0.7$ และ $1.9 \times 10^4 < Gr < 3.6 \times 10^4$

ABSTRACT

In this research work, an attempt has been made to evaluate the convective heat transfer coefficient during drying of Striped Snakehead Fish (*Channa Striatus*) in open sun drying conditions. The initial sample had slice of $0.5 \times 4.5 \times 7.0$ cm. The convective heat transfer coefficient was determined by $Nu = h_c X / K = N(Ra)^n$ equation. Values of the constant, N and n were obtained by linear regression analysis. The results showed that the natural convective heat transfer coefficients was $10.9 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, when N and n were found to be 2.2 and 0.1, respectively for free air flow rate and the natural convective heat transfer coefficients was $9.4 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$, when N and n were found to be 1.3 and 0.2, respectively for blocked air flow rate., at $Pr = 0.7$ and $1.9 \times 10^4 < Gr < 3.6 \times 10^4$.

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อ.เมือง จ.ยะลา 95000

*Corresponding Author, E-mail: saniso.e@hotmail.com, eleeyah.s@yru.ac.th

คำสำคัญ: ปลาช่อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ ตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์

Keywords: Striped snakehead fish (*Channa Striatus*), Convective heat transfer coefficient, Solar drying

บทนำ

ปลาช่อนเป็นปลาน้ำจืดพื้นเมืองของไทย อาศัยอยู่ตามแม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนองและ บึง ทั่วทุกภาคของประเทศ นอกจากนี้ปลาช่อนยังพบในประเทศจีน อินเดีย ศรีลังกา อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์อีกด้วย ปลาช่อนมีชื่อสามัญว่า Striped Snakehead Fish และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Channa Striatus* (พจน., 2548) ปลาช่อนมีลำตัวกลมยาวเป็น 5-6 เท่าของความสูง ส่วนท้องแบน มีเกล็ดตามแนวเส้นข้างตัว 50-58 เกล็ด ส่วนหลังมีสีเขียวย่นหรือสีน้ำตาลอ่อนจนเกือบดำ ส่วนท้องมีสีเขียว สีครีม หรือสีน้ำตาล (ศักดิ์ชัย, 2536) ปลาช่อนถือเป็นปลาเศรษฐกิจที่หาง่ายในท้องถิ่นและคนไทยนิยมบริโภค 1 ใน 5 อันดับแรก คือ ปลานิล ปลาช่อน ปลาชุก ปลาทับทิม และปลาสร้อย เนื่องจากรสชาติ ที่สำคัญหาทานง่ายและราคาไม่แพง (เทพรัตน์, 2545) แต่คนไทยไม่นิยมกินปลาสดจึงแปรรูปปลาช่อนให้สามารถเก็บได้นาน (สุดจิตร์, 2553) โดยการตากแห้ง ซึ่งเป็นการถนอมอาหารสดไว้บริโภคในรูปแบบหนึ่งที่สำคัญคือความปลอดภัยจากพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้น้ำหรือความชื้นที่อยู่ในวัสดุลดลง ทำให้สามารถเก็บอาหารสดไว้บริโภคโดยไม่เสียคุณค่าทางอาหาร และช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ อันเป็นสาเหตุของการเน่าเสียได้ (สมชาติ, 2540) การตากแห้งจะขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะเฉพาะของวัสดุ อุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ เป็นต้น

การทำแห้ง (drying) คือ กระบวนการลดความชื้นของวัสดุที่ส่วนใหญ่ใช้การถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุที่ขึ้นเพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหยซึ่งถูกกำหนดโดยการถ่ายโอนความร้อน ได้แก่ การพา (convection) การนำ (conduction) และการแผ่รังสี (radiation) เป็นผลให้มีการถ่ายโอนความร้อนและมวลน้ำของวัสดุกับอากาศ แวดล้อม การถ่ายโอนความร้อน (heat transfer) อาจเกิดจากการพา การนำและการแผ่รังสีความร้อนหรือผสมกัน ทั้งสามแบบก็ได้ ขึ้นกับการออกแบบและชนิดของการทำแห้งโดยความร้อนจะถ่ายโอนสู่ผิวของวัสดุเพื่อระเหยน้ำที่ผิวออกไปและจะถ่ายโอนต่อไปยังภายในวัสดุเพื่อเพิ่มความดันไอน้ำภายในวัสดุต่อไป ส่วนการถ่ายโอนมวลน้ำ (mass transfer) จะขึ้นอยู่กับกลไก 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนย้ายของมวลน้ำภายในวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายใน ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นภายในวัสดุและการเคลื่อนย้ายของไอน้ำจากผิวของวัสดุเนื่องจากปัจจัยภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ อัตราการไหลของอากาศและพื้นที่ผิวของวัสดุ (สมชาติ, 2540; Brooker et al., 1974) การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งวัสดุมีค่าชี้วัดที่สำคัญหลายประการซึ่งจะแตกต่างกันและเป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด (Bala, 1997) และหากการทำแห้งเป็นแบบตากแดดโดยตรงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (convective heat transfer coefficient) เป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่สำคัญในการทำแห้ง ดังเช่นในงานวิจัยของ Anwar and Tiwari (2001) ที่ได้ทดลองทำแห้งผลผลิตทางการเกษตร 6 ชนิด ได้แก่ พริกชี้ฟ้าเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่งและดอกกะหล่ำ ด้วยการตากแห้งกลางแจ้งเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้อยู่ในช่วง $3.5-26.0 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

ในขณะที่ Goyal and Tiwari (1998) ได้ทดลองศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลในการทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของข้าวสาลีและถั่วเขียวมีค่าเท่ากับ 16.7 และ 9.6 $W/m^2-^{\circ}C$ ตามลำดับ ส่วน Marina et al. (2008) ได้ทดลองทำแห้งซิงโดยการตากแห้งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของซิงมีค่าเท่ากับ 26.2 $W/m^2-^{\circ}C$ ในทำนองเดียวกัน มารินา และจอมภพ (2548) ที่ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในระหว่างการทำแห้งแกนสับปรดแช่อบภายใต้การตากแห้งที่ใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงาน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสับปรดแช่อบมีค่าเท่ากับ 9.1 $W/m^2-^{\circ}C$ ที่ $Pr = 0.7$ และ $0.2 \times 10^3 < Gr < 1.2 \times 10^3$ และ Dilip (2006) ได้ทดลองศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลในการทำแห้งกุ้งและปลาลิ้นขาว ซึ่งตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าอยู่ในช่วง 0.4-9.9 $W/m^2-^{\circ}C$ ที่ $Pr = 0.7$ และ $0.2 \times 10^5 < Gr < 1.6 \times 10^6$ การวิจัยนี้จึงมุ่งทำการทดลองทำแห้งชิ้นปลาช่อนด้วยการตากแห้งที่อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์แบบปกติและแบบมีที่บังลมเพื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองและออกแบบระบบการทำแห้งปลาช่อนที่เหมาะสมสำหรับชุมชนต่อไป

ทฤษฎีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชิ้นปลาช่อนและอากาศแวดล้อมจะเขียนสมการความสัมพันธ์ในรูปทั่วไป ดังนี้

$$\dot{Q}_{ev} = h_c A (T_A - T_M) \quad (1)$$

เมื่อ \dot{Q}_{ev} คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำในชิ้นปลาช่อน (J/m^2s)

h_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของชิ้นปลาช่อน ($W/m^2-^{\circ}C$)

A คือ พื้นที่ผิวของชิ้นปลาช่อนที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ (m^2)

T_A คือ อุณหภูมิของอากาศเหนือผิวของชิ้นปลาช่อน ($^{\circ}C$)

T_M คือ อุณหภูมิของอากาศใต้ผิวของชิ้นปลาช่อน ($^{\circ}C$)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) สำหรับการทำแห้งโดยการตากแดดที่กลางแจ้งซึ่งมีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Anwar and Tiwari, 2001; Dilip, 2006; Mani et al., 2008; Tiwari et al., 2003; Tiwari and Tripathi, 2003) สามารถแสดงในรูปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ไร้มิติได้ ดังนี้

$$Nu = \frac{h_c X}{K} = N(Ra)^n \quad (2)$$

หรือ

$$h_c = \frac{K}{X} \cdot N(Ra)^n \quad (3)$$

เมื่อ Nu คือ จำนวนนัสเซลท์ (Nusselt number) มีค่าเท่ากับ $h_c X / K$

- X คือ ขนาดเฉพาะของชั้นปลาช่อน มีค่าเท่ากับ A/S (m)
 S คือ เส้นรอบวงของชั้นปลาช่อน (m)
 K คือ สภาพการนำความร้อนของอากาศ ($J/m^2 \cdot ^\circ C$)
 N คือ ค่าคงตัวของสมการ
 n คือ ค่าคงตัวของสมการ
 Ra คือ จำนวนราเลย์ (Rayleigh number) มีค่าเท่ากับ $GrPr$
 Gr คือ จำนวนกราชอฟ (Grashof number) มีค่าเท่ากับ $\beta g X^3 \rho^2 \Delta T / \mu^2$
 β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ ($1/^\circ C$)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
 ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิของชั้นปลาช่อนและอากาศเหนือผิวของชั้นปลาช่อน ($^\circ C$)
 μ คือ ความหนืดพลวัตของอากาศ ($kg/m \cdot s$)
 Pr คือ จำนวนพรันด์เทิล (Prandtl number) มีค่าเท่ากับ $\mu C / K$
 C คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ ($J/kg \cdot ^\circ C$)

การทำแห้งชั้นปลาช่อนโดยการตากแดดแบบปกติและแบบมีที่บังลมที่กลางแจ้งจะอยู่ในช่วงที่มีอัตราการแห้งคงตัว (รูปที่ 3) จึงสามารถคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อน (\dot{Q}_{ev}) ที่ใช้ในการระเหยน้ำ (Dilip, 2006; Mani et al., 2008; Tiwari et al., 1997; Tiwari and Prakash, 2003) ในชั้นปลาช่อนได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{ev} = 0.016 \cdot h_c \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \quad (4)$$

- เมื่อ $P(T_M)$ คือ ความดันไอย่อยในชั้นปลาช่อนที่อุณหภูมิใด ๆ (N/m^2)
 RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเหนือผิวชั้นปลาช่อน (decimal)
 $P(T_A)$ คือ ความดันไอย่อยที่ผิวชั้นปลาช่อนที่อุณหภูมิใด ๆ (N/m^2)

โดยการนำสมการ (3) แทนในสมการ (4) จะได้

$$\dot{Q}_{ev} = 0.016 \cdot \frac{K}{X} \cdot N(Ra)^n \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \quad (5)$$

ทำการหารสมการ (4) ด้วยค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L) ของน้ำ แล้วคูณด้วยพื้นที่ (A) และเวลา (t) ที่ชั้นปลาช่อนได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ จะสามารถคำนวณมวลของไอน้ำที่ระเหย (M_{ev}) (Anwar and Tiwari, 2001; Dilip, 2006; Goya and Tiwari, 1998; Mani et al., 2008; Tiwari et al., 1997; Tiwari and Prakash, 2003; Tiwari and Suneja, 1997; Tiwari and Tripathi, 2003; Toyama et al., 1987) ได้ ดังนี้

$$M_{ev} = \frac{\dot{Q}_{ev}}{L} \cdot A \cdot t = 0.016 \cdot \frac{K}{XL} \cdot N(Ra)^n \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \cdot A \cdot t \quad (6)$$

เมื่อ M_{ev} คือ มวลของน้ำในชั้นปลาช่อนที่ระเหยเนื่องจากการตากแห้ง (kg)

L คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)

t คือ เวลา (s)

จากสมการ (6) ถ้ากำหนดให้

$$0.016 \cdot \frac{K}{XL} \cdot [P(T_M) - RH \cdot P(T_A)] \cdot A \cdot t = Z \quad (7)$$

แล้วจัดรูปสมการ (6) ใหม่จะได้ ดังนี้

$$\frac{M_{ev}}{Z} = N(Ra)^n \quad (8)$$

ทำการใส่ \ln ทั้งสองข้างของสมการ (8) จะได้

$$\ln \left[\frac{M_{ev}}{Z} \right] = n \ln(Ra) + \ln N \quad (9)$$

พิจารณาสมการ (9) เทียบกับรูปแบบของสมการเชิงเส้นตรง จะพบว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(M_{ev}/Z)$ และ $\ln(Ra)$ เป็นกราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ n และค่าจุดตัดแกน Y (Y -Intercept) เท่ากับ $\ln N$ (รูปที่ 4) โดยใช้สมบัติทางกายภาพของอากาศซึ่งประกอบด้วยค่าความร้อนจำเพาะ (C) สภาพการนำความร้อน (K) ความหนาแน่น (ρ) ความหนืดพลวัต (μ) ค่าความดันไอลอย (P(T)) ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (L) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ (β) ตามสมการที่ (10) – (17) (Anwar and Tiwari, 2001; Dilip, 2006; Tiwari et al., 1997; Tiwari and Tripathi, 2003; Toyama et al., 1987) ดังนี้

$$C = 999.2 + 0.1434 T_{av} + 1.101 \times 10^{-4} T_{av}^2 - 6.7581 \times 10^{-8} T_{av}^3 \quad (10)$$

$$K = 0.0244 + 0.6773 \times 10^{-4} T_{av} \quad (11)$$

$$\rho = 353.44 / (T_{av} + 273.15) \quad (12)$$

$$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 4.620 \times 10^{-8} T_{av} \quad (13)$$

$$P(T) = \exp(25.317 - 5144 / (T_{av} + 273.15)) \quad (14)$$

$$L = 3.1615 \times 10^6 (1 - 7.6166 \times 10^{-4} T_{av}) \quad (15)$$

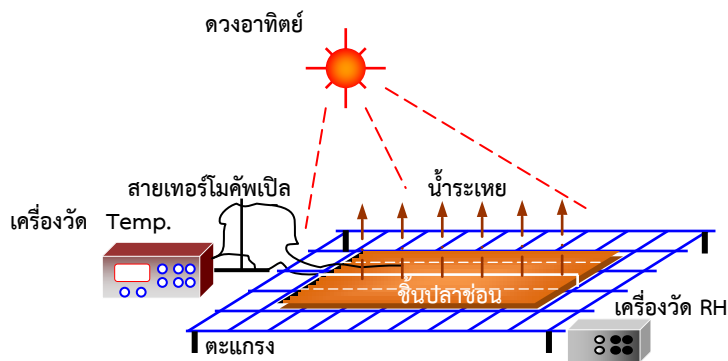
$$\beta = 1/T_{av} \quad (16)$$

$$T_{av} = (T_A + T_M) / 2 \quad (17)$$

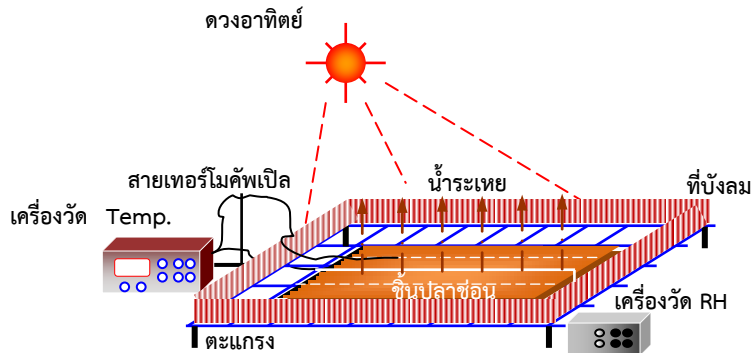
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างทดลอง

การวิจัยนี้ใช้ชั้นพลาสติกที่ตัดเป็นชิ้นบางขนาดความหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร กว้าง 4.5 เซนติเมตร และยาว 7.0 เซนติเมตร แล้วนำชั้นพลาสติกไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 3 – 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้ความชื้นมีค่าสม่ำเสมอ จากนั้นนำชั้นพลาสติกไปวางไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง จึงตากแห้งกลางแจ้งแล้ววิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ



รูปที่ 1 การทดลองทำแห้งชั้นพลาสติกแบบธรรมชาติ (ตากแห้งแบบปกติ)



รูปที่ 2 การทดลองทำแห้งชั้นพลาสติกแบบธรรมชาติ (ตากแห้งแบบมีที่บังลม)

3.2 วิธีการทดลอง

การวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยการนำชั้นพลาสติกจำนวน 2 ชิ้น น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 69.0 กรัม มาวางให้ชิดกันบนตะแกรง แล้วนำไปตากแห้งด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ณ ชั้นดาดฟ้า อาคาร 9 ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา โดยแยกรูปแบบการตากแห้งเป็น 2 ลักษณะ คือ ตากแห้งแบบปกติ (รูปที่ 1) และตากแห้งแบบมีที่บังลมด้านข้างของชั้นพลาสติกทั้ง 4 ด้าน (รูปที่ 2) วัดอุณหภูมิเหนือผิวชั้นพลาสติก (T_A) และวัดอุณหภูมิใต้ผิวชั้นพลาสติก (T_M) ด้วยเครื่อง digital multimeter รุ่น UNAOHM 9400 ความละเอียด $\pm 0.1\%$ ที่ต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัพเบิลชนิด เค (k-type thermocouple) วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์

ของอากาศด้วยเครื่อง flash link data logger รุ่น Delta TRAK ความละเอียด ± 0.1 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักขึ้นปลาช่อนทุก ๆ 15 นาที ด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัล Mettler Toledo รุ่น PB 1502 ความละเอียด 0.01 กรัม บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเป็นเวลา 180 นาที จึงหยุดการทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ แล้วใช้ค่าเฉลี่ย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการทดลองตากแห้งชิ้นปลาช่อนขนาดความหนาประมาณ 0.5 เซนติเมตร กว้าง 4.5 เซนติเมตร และยาว 7.0 เซนติเมตร ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์แบบปกติและแบบมีที่บังลมได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

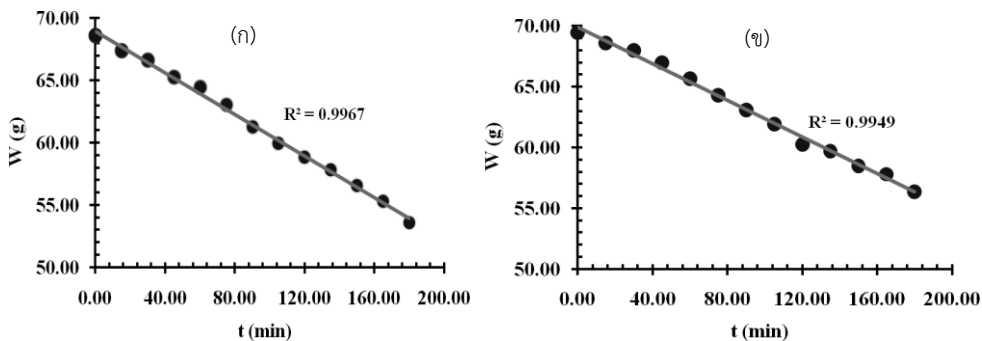
เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับเวลาการทำแห้ง พบว่า การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงเวลาการทำแห้ง 180 นาที มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น คือ ลดลงประมาณ 14.0 ± 1.0 กรัม จากน้ำหนักเริ่มต้น 69.0 ± 0.4 กรัม (รูปที่ 3) ซึ่งให้เห็นว่าการทำแห้งชิ้นปลาช่อนจะอยู่ในช่วงของอัตราการอบแห้งคงตัว (constant drying rate) ซึ่งสอดคล้องกับการทำแห้งพริกชี้หนูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง และดอกกะหล่ำ โดยการตากแห้งกลางแจ้งของ Anwar and Tiwari (2001) การทำแห้งข้าวสาลีและถั่วเขียวของ Goyal and Tiwari (1998) การตากแห้งขิงของ Marina et al. (2008) และการทำแห้งแกนสับปะรดแช่อิ่มของ มารีนา และจอมภพ (2548) จึงนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(M_{ev}/Z)$ และ $\ln(Ra)$ ได้ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ผลการทดลองทำแห้งชิ้นปลาช่อนแบบธรรมชาติ (ตากแห้งแบบปกติ)

Time (min)	$T_{A, av}$ ($^{\circ}C$)	$T_{M, av}$ ($^{\circ}C$)	RH_{av} (%)	W_{av} (g)	$M_{ev, av}$ (g)
0	27.3	25.8	61.0	68.6	0.0
15	29.3	27.0	49.7	67.4	1.2
30	29.3	27.8	47.3	66.6	1.9
45	30.7	28.8	40.0	65.3	3.3
60	32.7	30.0	35.7	64.5	4.1
75	32.7	30.3	35.7	63.0	5.5
90	34.3	31.7	32.0	61.3	7.3
105	33.7	32.3	30.7	60.0	8.6
120	32.0	30.0	37.7	58.8	9.7
135	32.3	31.0	33.0	57.8	10.8
150	33.3	31.0	30.3	56.5	12.0
165	34.7	32.3	34.0	55.3	13.3
180	34.0	32.7	32.0	53.6	15.0

ตารางที่ 2 ผลการทดลองทำแห้งชิ้นปลาช่อนแบบธรรมชาติ (ตากแห้งแบบมีที่บังลม)

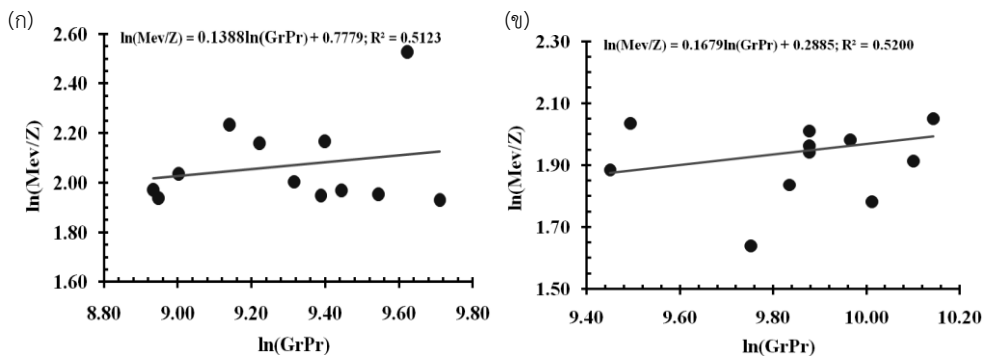
Time (min)	T _{A, av} (°C)	T _{M, av} (°C)	RH _{av} (%)	W _{av} (g)	M _{ev, av} (g)
0	28.7	26.3	61.0	69.4	0.0
15	30.0	27.0	49.7	68.6	0.8
30	30.7	28.0	47.3	68.0	1.4
45	32.3	28.7	40.0	67.0	2.5
60	33.7	31.0	35.7	65.7	3.8
75	34.0	31.0	35.7	64.3	5.1
90	35.3	31.7	32.0	63.1	6.4
105	34.7	32.0	30.7	61.9	7.5
120	32.7	30.3	37.7	60.2	9.2
135	33.3	31.0	33.0	59.7	9.7
150	35.0	32.0	30.3	58.5	10.9
165	36.0	32.3	34.0	57.8	11.6
180	36.7	33.0	32.0	56.4	13.1



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของชิ้นปลาช่อนระหว่างการทำแห้งแบบธรรมชาติ

(ก) ตากแห้งแบบปกติ และ (ข) ตากแห้งแบบมีที่บังลม

จากรูปที่ 4 พบว่า ค่า N และ n ของการตากแห้งชิ้นปลาช่อนแบบปกติมีค่าเท่ากับ 2.2 และ 0.1 ตามลำดับ ที่ $Pr = 0.7$ และ $1.1 \times 10^4 < Gr < 2.5 \times 10^4$ ในขณะที่การตากแห้งชิ้นปลาช่อนแบบมีที่บังลมมีค่า N และ n เท่ากับ 1.3 และ 0.2 ตามลำดับ ที่ $Pr = 0.7$ และ $1.9 \times 10^4 < Gr < 3.6 \times 10^4$ และเมื่อนำค่าคงตัว N และ n ที่ได้ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยการแทนค่ากลับในสมการ (3) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งชิ้นปลาช่อนที่ตากแห้งแบบปกติและแบบมีที่บังลมมีค่าเท่ากับ 10.9 และ 9.4 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง $\ln(\text{Mev}/Z)$ และ $\ln(\text{Ra})$ ของชั้นปลาท่อนเมื่อตากแห้งแบบธรรมชาติ (ก) ตากแห้งแบบปกติ และ (ข) ตากแห้งแบบมีที่บังลม

โดยการทดลองนี้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของการทำแห้งชั้นปลาท่อนที่ตากแบบปกติมีค่าสูงกว่าที่ตากแบบมีที่บังลมเนื่องจากการตากแบบปกติจะมีลมพัดจากอากาศแวดล้อมผ่านชั้นปลาท่อนส่งผลให้การระเหยน้ำที่ผิวของชั้นปลาท่อนเกิดขึ้นได้เร็วกว่าที่ตากแบบมีที่บังลม และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติของซิง (Marina et al., 2008) พริกขี้หนูเขียว ถั่วเขียว ถั่วขาว หอมหัวใหญ่ มันฝรั่งและดอกกะหล่ำ (Anwar and Tiwari, 2001) ข้าวสาลีและถั่วเขียว (Goyal and Tiwari, 1998) แกนสับปะรดแช่อิ่ม (มารีนา และจอมภพ, 2548) กุ้ง (*Macrobrachium lamarret*) และปลาลิ้นอู้อู (*Oxygaster bacaila*) (Dilip, 2006) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติอยู่ในช่วง $0.4\text{--}26.2 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองทำแห้งชั้นปลาท่อนแบบธรรมชาติโดยการตากแห้งที่กลางแจ้งซึ่งมีแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทั้งแบบปกติและมีที่บังลม สรุปได้ว่า อัตราการอบแห้งชั้นปลาท่อนอยู่ในช่วงการอบแห้งคงตัว โดยชั้นปลาท่อนที่ตากแห้งแบบปกติมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติสูงกว่าชั้นปลาท่อนที่ตากแห้งแบบมีที่บังลมกล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติเฉลี่ยของชั้นปลาท่อนที่ตากแห้งแบบปกติและแบบมีที่บังลมมีค่าเท่ากับ 10.9 และ $9.4 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ที่ค่า $\text{Pr} = 0.7$ และ $1.1 \times 10^4 < \text{Gr} < 3.6 \times 10^4$ โดยพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติมากกว่าลมที่พัดผ่าน

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายชูแข็ง ชายดانا และนายมะยุพรี ยะแอโตะ นักวิทยาศาสตร์สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่อำนวยความสะดวกและอุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- เทพรัตน์ อึ้งเศรษฐพันธ์ สุเทพ ปันธิวงศ์ สมบูรณ์ ใจปิ่นตา ประจวบ ฉายบุ สุดปราณี มณีศรี และรุ่งกานต์ อำไพพงษ์. (2545). แนวทางการจัดการปัญหาการผลิตและตลาดปลาน้ำจืดจังหวัดเชียงใหม่. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 104 หน้า.
- พัฒน์ พิชาน. (2548). ปลาน้ำจืดพื้นบ้าน. กรุงเทพฯ : เครือเถา. 128 หน้า.
- มารีนา มะหิ และ จอมภพ แววศักดิ์. (2548). การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแกนสับปรดแช่อบแห้งภายใต้การตากแห้งโดยแสงอาทิตย์. การประชุมเชิงวิชาการเครื่องช่วยพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี วันที่ 11-13 พฤษภาคม, RE08 : 1-4.
- ศักดิ์ชัย ชูโชติ. (2536). การเลี้ยงปลาน้ำจืด. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์. 201 หน้า.
- สมชาติ โสภณธรรณฤทธิ์. (2540). การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 338 หน้า.
- สุดจิตรี เกษมชาญ. (2553). การถนอมอาหาร. (ระบบออนไลน์) แหล่งที่มา : <http://www.genufood.in.th> (มิถุนายน 2554).
- Anwar, S.I. and Tiwari, G.N. (2001). Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions. *Energy Conversion and Management*. 42(5): 627-637.
- Bala, B.K. (1997). *Drying and storage of cereal grains*. Oxford : Oxford & IBH Publishing. 312 p.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. (1974). *Drying cereal grains*. 3rd edition. Westport, Connecticut, USA : The AVI publishing company, Inc. 265 p.
- Dilip, J. (2006). Determination of convective heat and mass transfer coefficients for solar drying of fish. *Biosystems Engineering*. 94(3): 429-435.
- Goya, R.K. and Tiwari, G.N. (1998). Heat and mass transfer relations for crop drying. *Drying Technology*. 16(18): 1741-1754.
- Mani, M., Kaew-on, J. and Boonma, P. (2008). Determination of convective heat transfer coefficient of ginger drying under natural convection. (Online) Available from: http://www.scisoc.or.th/stt/30/sec_j/paper/stt30_J0016.pdf. [August 2011].
- Tiwari, G.N., Kumar, S. and Prakash, O. (2003). Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jiggery. *Journal of food engineering*. 63(2): 219-227.
- Tiwari, G.N., Minocha, A., Sharma, P.B., and Emran K.M. (1997). Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. *Energy conversion and management*. 38(8): 761-770.
- Toyama, S., Nakamura, M., Salah, H.M., Futamura, S. and Murase, K. (1987). Laboratory test of solar-distillator with a heat penetrating plate having a bend. *Desalination*. 67: 67-73.
- Tiwari, G.N. and Suneja, S. (1997). *Solar thermal engineering systems*. New Delhi, India : Narosa Publishing House. 412 p.
- Tiwari, G.N. and Tripathi, R. (2003). Study of heat and mass transfer in door conditions for distillation. *Desalination* 154(2): 161-169.

