

สมการชั้นบางของปลานิลอบแห้งด้วยลมร้อน
Thin Layer Equation of *Tilapia Nilotica* Drying Using Hot Air

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา¹ และ ประทีป ตุ่มทอง¹
Umphisak Teeboonma¹ and Prateep Toomthong¹

Abstract

The objective of this research was to determine the suitable thin layer equation for *Tilapia nilotica* drying by using hot air. The experiments were conducted on the following parameters: air velocities of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s and drying temperatures of 50, 60 and 70°C. Thin layer drying equations used were Two term, Page, Modified Page I, Logarithmic, Two term exponential, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion and Newton. The experimental results showed that drying rate of *Tilapia nilotica* increases with increment of drying temperature or air velocity. Additionally, the analysis results revealed that Two term equation yields the highest coefficient of determination (R^2 , 0.99899) and the lowest root mean square error (RMSE, 0.0092).

Keywords: Drying, Hot air, Thin layer equation

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ ความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิของอากาศอบแห้งเท่ากับ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส สมการอบแห้งชั้นบางที่ศึกษาประกอบด้วยสมการของ Two term, Page, Modified Page I, Logarithmic, Two term exponential, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion และ Newton ผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลม นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์พบว่าสมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0092) น้อยที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้ง ลมร้อน สมการอบแห้งชั้นบาง

คำนำ

การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรส่วนใหญ่จะทำได้โดยการลดความชื้นซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี (Chua and Chou, 2003) และสำหรับ การอบแห้งด้วยลมร้อนก็เป็นวิธีหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งชนิดอื่นๆ เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้แหล่งความร้อนได้จากหลายแหล่งที่หาได้ง่าย เช่น จากขดลวดความร้อน เชื้อเพลิงต่างๆ หรือ พลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถทำได้หากสภาพอากาศ ไม่เอื้ออำนวย และต้องใช้พื้นที่มาก (Soponronnarit, et al., 1992) ส่งผลให้อัตราการผลิตต่ำ การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อน(convection) โดยความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทด้วยการพาความร้อนสู่ผิวของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผิวของผลิตภัณฑ์สู่ภายในโดยอาศัยการนำความร้อน ซึ่งจะเป็นผลให้ความดันไอของน้ำที่มีอยู่ภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในถูกขับออกมา จากข้อสรุปเบื้องต้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน เนื่องจากมีการเพาะเลี้ยงจำนวนมากในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และมีการแปรรูปในรูปแบบของปลานิลแดดเดียวเป็นสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า, 2552) โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิลที่มีลักษณะเป็นเส้นด้วยลมร้อน และหาสมการอบแห้งชั้นบางสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warinchumrab District, Ubon Ratchathani Province, 34190

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer) ซึ่งใช้พลังงานจากขดลวดความร้อน (Heater) ดังแสดง ใน Figure 1

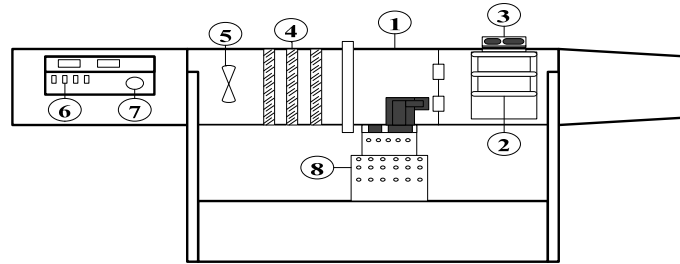


Figure 1 Experimental set-up. 1) Drying chamber 2) Tray products 3) Load cell 4) Heater 5) Fan 6) Temperature control 7) Air velocity control 8) Data logger

ชุดทดลองประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้า มีขนาดเท่ากับ 25 × 150 × 25 เซนติเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นขดลวดความร้อนขนาด 6 kW พัดลมเป็นแบบไหลตามแนวแกนมอเตอร์ขนาด 500 W สามารถปรับความเร็วลมได้ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger ความเร็วของอากาศอบแห้ง วัดโดยใช้ hot wire anemometer วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้มิเตอร์วัดวัตต์ชั่วโมงมิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักซึ่งโดยใช้โหลดเซลล์ และต่อเข้า data logger เพื่อบันทึกค่าน้ำหนักตลอดช่วงการทดลอง ในส่วนวิธีทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งคือ ปลานิล (*Tilapia nilotica*) โดยชำแหละเอาส่วนที่เป็นหัวและก้างออก แล้วเอาส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นด้วยเครื่องหั่นตามความยาวของตัวปลา ความกว้างของเส้นเนื้อปลาประมาณ 1 เซนติเมตร หลังจากนั้นนำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน พลาสติกที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 300-350 %d.b. อบจนกระทั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์คงที่ โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็วของลมร้อน 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก, อุณหภูมิอบแห้ง และอุณหภูมิภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger

การศึกษาดมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิล ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) โดยเป็นรูปแบบของผลเฉลยอย่างง่าย ซึ่งนำเสนอไว้ใน Table 1

Table 1 Thin layer drying models

No.	Model equation	Name of model	References
1	$MR = \exp(-kt)$	Newton	Ayensu, 1997
2	$MR = \exp(-kt^n)$	Page	Simal, et al., 2005
3	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Modified Page I	Diamante and Munro, 1993
4	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	Yaldiz, et al., 2001
5	$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	Togrul and Pehlivan, 2003
6	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	Two term	Henderson, 1974
7	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential	Sharaf-Eldeen, et al., 1980
8	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	Yaldiz and Ertekin, 2001

การศึกษาดมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของปลานิล ศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (1)$$

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, % d.b., M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, %d.b.

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งขึ้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R²) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ RMSE มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{predict,i} - MR_{experiment,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง การอบแห้งปลานิลที่มีลักษณะเป็นเส้นด้วยลมร้อน เพื่อหาสมการการอบแห้งขึ้นบางที่เหมาะสมสำหรับอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

จากการทดลองหาอัตราการอบแห้งขึ้นบางของปลานิล โดยได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70°C และความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ได้ทำการเปรียบเทียบสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการอบแห้งขึ้นบางที่สรุปไว้ใน Table 1 และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ และความเร็วลม ต่อค่าคงที่สมการอบแห้งขึ้นบาง (k) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = x_0 + x_1T + x_2V + x_3TV \tag{3}$$

เมื่อ K คือ a, b, c, k, k₁, k₂ และ n T คือ อุณหภูมิอบแห้ง V คือ ความเร็วลม x_i คือ ค่าคงที่สมการที่ (3)

Table 2 Values of model constants and statistical parameters

Model	Parameter	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	R ²	RMSE
Newton	k	-0.00453	0.00212	0.00012	-0.00003	0.97106	0.0488
Henderson and Pabis	a	0.90310	-0.01690	-0.00041	0.00031	0.99072	0.0277
Two term exponential	k	-0.00380	0.00174	0.00010	-0.00002	0.99410	0.0221
Modified Page I	k	-0.01748	0.01067	0.00041	-0.00009	0.99855	0.0110
	n	-0.01455	0.00880	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
Page	k	0.72023	0.00071	0.00029	-0.00006	0.99855	0.0110
	n	-0.01499	0.00915	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
Approximation of diffusion	a	-0.01499	0.00915	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
	b	0.39043	-0.14594	-0.00307	0.00273	0.97141	0.0083
	k	0.33347	-0.18749	-0.00405	0.00339	0.97141	0.0083
	k	-0.07508	0.05127	0.00162	-0.00088	0.97141	0.0083
Logarithmic	a	0.86789	-0.09014	-0.00105	0.00137	0.99586	0.0186
	k	-0.00710	0.00408	0.00017	-0.00006	0.99586	0.0186
	c	0.03815	0.11502	0.00139	-0.00173	0.99586	0.0186
Two term	a	0.46105	0.30369	0.00605	-0.00583	0.99899	0.0092
	b	0.44101	-0.18336	-0.00367	0.00336	0.99899	0.0092
	k ₁	-0.00434	0.00250	0.00011	-0.00004	0.99899	0.0092
	k ₂	-0.08211	0.06397	0.00182	-0.00115	0.99899	0.0092

Table 2 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบาง, R^2 และ RMSE จากผลการวิเคราะห์ที่สรุปไว้ในตาราง พบว่าสมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0092) น้อยที่สุด นอกจากนี้หากเรียงความสามารถในการทำนายผลการอบแห้ง จากมากไปหาน้อยจะได้ดังนี้ Two term, Page, Modified Page I, Logarithmic, Two term exponential, Henderson and Pabis, Approximation of diffusion และ Newton ตามลำดับ

จากผลสรุปข้างต้นเมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลคำนวณจากสมการ Two term พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีทุกเงื่อนไข ดังที่แสดงใน Figure 2 และ 3

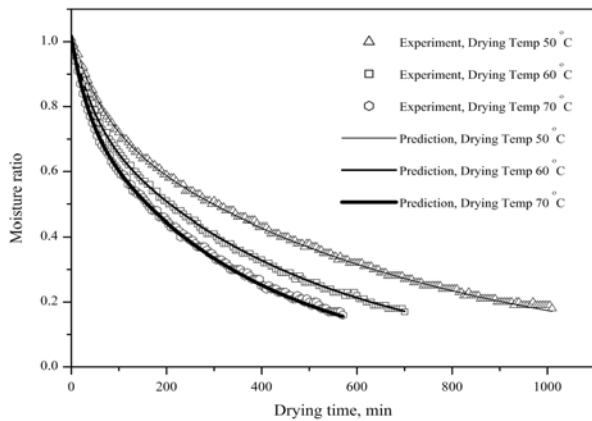


Figure 2 Variation of experimental and predicted ratios by Two term model with drying time at air velocity of 1.0 m/s

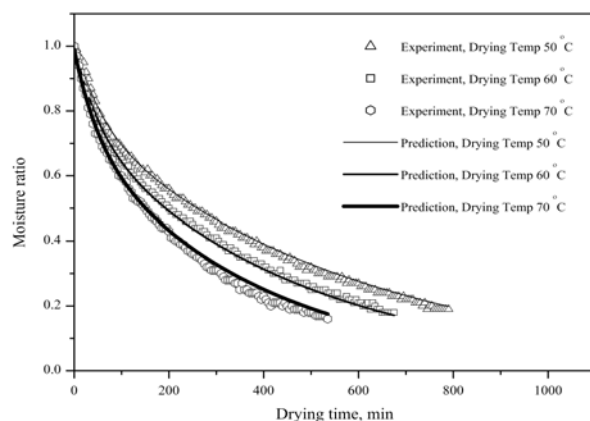


Figure 3 Variation of experimental and predicted moisture ratio by Two term model with drying time at air velocity of 1.5 m/s

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง และศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน จากการศึกษพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลม มีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมการคณิตศาสตร์ทั้ง 8 สมการ พบว่าสมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งเนื้อปลานิลที่มีลักษณะเป็นเส้นด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า (R^2) 0.99899 มากที่สุด และค่า (RMSE) 0.0092 น้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า. 2552. ปลานิลดาวรุ่งดวงใหม่สินค้าประมงส่งออกของไทย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.ryt9.com> เข้าดูเมื่อวันที่ 29/09/2009.
- Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy* 59: 121-126.
- Chua, K. J. and S. K. Chou. 2003. Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science* 14: 519-528.
- Diamante, L. M. and P. A. Munro. 1993. [Mathematical modelling the thin layer solar drying of sweet potato](#). *Solar Energy* 51: 271-276.
- Henderson, S. M. 1974. Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transactions of the ASAE* 17: 1167-1172.
- Simal, S., A. Femenia, M.C. Garau and C. Rossell. 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering* 66: 323-328.
- Soponronnarit, S., D. Nattawut, J. Hirunlabh, P. Namprakai and S. Thepa. 1992. Computer simulation of solar energy assisted fruit drying. *RERIC International Energy Journal* 14: 59-70.
- Sharaf-Eldeen, Y. I., J.L. Blaisdell and M.Y. Hamdy. 1980. A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE* 23: 1261-1271.
- Togrul, I.T. and D. Pehlivan. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering* 58: 23-32.
- Yaldiz, O., C. Ertekin and H.I. Uzun. 2001. Mathematical modelling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy-An International Journal* 26: 457-465.
- Yaldiz, O. and C. Ertekin. 2001. Thin layer solar drying some different vegetables. *Drying Technology* 19: 583-597.