

จลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา^{*1)} และ ประทีป ตุ่มทอง²⁾

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ ความเร็วลมร้อน 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนความชื้น อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมหรืออุณหภูมิอบแห้ง นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง พบว่า สมการของ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และ RMSE (0.0092) น้อยที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้ง จลนพลศาสตร์การอบแห้ง ลมร้อน สมการอบแห้งชั้นบาง

^{*1)} ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
อีเมล: umphisak@hotmail.com

²⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190
อีเมล: th_prateep@hotmail.com

* Corresponding Author

Drying kinetic of *Tilapia nilotica* drying using hot air

Umphisak Teeboonma^{* 1)} and Prateep Toomthong²⁾

Abstract

The objectives of this research were to study *Tilapia nilotica* drying using hot air and to find out the appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of *Tilapia nilotica*. To achieve these purposes, experiments were conducted on the following conditions: air velocities of 1.0, 1.5 and 2.0 m/s and drying temperatures of 50, 60 and 70°C. The effects of drying conditions on moisture ratio, drying rate and specific energy consumption were investigated. From experimental results, it was revealed that drying rate and specific energy consumption increase with increment of drying temperature or air velocity. Furthermore, it was found that thin layer equation providing the highest coefficient of determination (R^2 , 0.99899) and the lowest root mean square error (RMSE, 0.0092) is Two term equation.

Keywords: Drying, Drying kinetic, Hot air, Thin layer equation

^{*1)} Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University,
Ubon Ratchathani, 34190, E-mail: umphisak@hotmail.com

²⁾ Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Ubon Ratchathani University,
Ubon Ratchathani, 34190, E-mail: th_prateep@hotmail.com

^{*} Corresponding Author

1. บทนำ

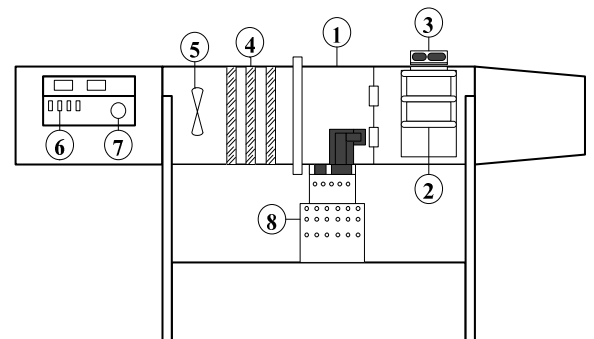
การลดความชื้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน (Chu et al, 2003) เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสุญญากาศ การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งในแต่ละวิธีมีทั้งข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดี (Chu et al, 2003; Jaya and Das, 2003) แต่ก็มีข้อด้อย คือ การมีระบบที่ซับซ้อนและต้นทุนที่สูง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดครัวเรือน สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่อบมีคุณภาพสูง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความปลอดภัยจากคลื่นสนามแม่เหล็ก (Glouannec et al, 2002) ทำให้ยังจำกัดการใช้อยู่แค่เตาอบขนาดเล็กสำหรับใช้ในห้องครัว การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้แหล่งความร้อนได้จากหลายแหล่งที่หาได้ง่าย เช่น จากขดลวดความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง แอลพีจี พลังงานแสงอาทิตย์ หรือความร้อนทิ้งจากกระบวนการต่างๆ ในโรงงาน แหล่งพลังงานที่ถูกที่สุด ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถทำได้หากสภาพอากาศ ไม่เอื้ออำนวย และต้องใช้พื้นที่มาก (Soponronnarit et al, 1992) ส่งผลให้อัตราการผลิตต่ำ การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อน โดยความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทด้วยการพาความร้อนสู่ผิวของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผิวของผลิตภัณฑ์สู่ภายในโดยอาศัยการนำความร้อน ซึ่งจะเป็นผลให้ความดันไอของน้ำที่มีอยู่ภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในถูกขับออกมาจากข้อสรุปเบื้องต้นที่เกี่ยวกับเทคนิคการอบแห้ง งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรประเภทเนื้อปลาด้วยลมร้อน ซึ่งได้แก่ เนื้อปลานิล

เนื่องจากมีการเพาะเลี้ยงจำนวนมากในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และมีการแปรรูปในรูปแบบของปลานิลแดดเดียว เป็นสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะกลุ่มเกษตรกรบ้านทับไทร ตำบลจระแม่อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี มีการแปรรูปปลานิลแดดเดียวสามารถสร้างงานสร้างรายได้เป็นจำนวนมาก (ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า, 2552) ดังนั้นจึงได้ศึกษาการอบแห้งปลานิลที่มีลักษณะเป็นเส้นด้วยลมร้อนเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมของการอบแห้ง พร้อมทั้งเพื่อจัดเตรียมข้อมูลพื้นฐานในการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการแปรรูปปลานิลต่อไปในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดชุดทดลอง เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาด



รูปที่ 1 ชุดทดลองประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้ง 2) ถาดรองผลิตภัณฑ์ 3) โหลดเซลล์ 4) ขดลวดความร้อน 5) พัดลม 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 7) ชุดปรับความเร็วลม 8) ชุดบันทึกข้อมูล

ชุดทดลองประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ ขนาดของห้องอบแห้งเท่ากับ $25 \times 150 \times 25$ เซนติเมตร (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นขดลวดความร้อนขนาด 6 kW พัดลมเป็นแบบไหลตามแนวแกนมอเตอร์ขนาด 500 W สามารถปรับความเร็วลมได้ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data

logger ความเร็วของอากาศอบแห้ง วัดโดยใช้ hot wire anemometer วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้กิโลวัตต์ ชั่วโมงมิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักซึ่งโดยใช้โหลด เซลล์ และต่อเข้า data logger เพื่อบันทึกค่าน้ำหนัก ตลอดช่วงการทดลอง

2.2 วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งในงานวิจัยนี้คือ ปลานิล (*Tilapia nilotica*) ขนาดเนื้อปลาที่ใช้ทดลองมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยชำแหละเอาส่วนที่เป็นหัวและก้างออก แล้วเอาส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นด้วยเครื่องหั่นตามความยาวของตัวปลาแต่ละรุ่น ความกว้างของเส้นเนื้อปลาประมาณ 1 เซนติเมตร นำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน ในส่วนของการทดลอง ปลาสดที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300-350 % d.b. อบจนกระทั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์คงที่ โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็วลมร้อน 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก อุณหภูมิอบแห้ง และอุณหภูมิภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger

2.3 การวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงความชื้นเริ่มต้นประมาณ 300-350 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายคงที่ โดยความชื้น (Moisture content, MC) ของผลิตภัณฑ์ คำนวณจากสมการที่ (1)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ W_t คือ น้ำหนักปลานิลที่เวลาใดๆ, g

W_d คือ น้ำหนักแห้งของปลานิล, g

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของปลานิล ศึกษาในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (2)

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (2)$$

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

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, % d.b.

ในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาดังนี้

2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate, DR) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3) (Kar and Gupta, 2003)

$$DR = \frac{M_0 - M_t}{T} \quad (3)$$

เมื่อ M_0 คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น, g water/g dry solid

M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T, g water/g dry solid

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, min

2.3.2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$SEC = \frac{E_{heater} + E_{fan}}{M_w} \quad (4)$$

เมื่อ E_{heater} คือ พลังงานที่ใช้กับขดลวดความร้อน, kWh

E_{fan} คือ พลังงานที่ใช้กับพัดลม, kWh

M_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ, kg

ในการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์ พิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นการอบแห้ง จนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นเหลือประมาณ 0.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นใกล้เคียงกับปลานิลแดดเดียวที่วางจำหน่ายในท้องตลาด

2.3.3 สมการอบแห้งชั้นบาง

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลานิล ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์กับสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นซึ่งอยู่ในรูปสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) โดยเป็นรูปแบบของผลเฉลยอย่างง่าย ซึ่งนำเสนอไว้ในตารางที่ 1

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{Pre,i} - MR_{Exp,i})^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{Pre,i}$ คือ ผลของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ
 $MR_{Exp,i}$ คือ ผลของอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
 N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

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 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	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh	Ozdemir and Devres, 1999
8	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$	Approximation of diffusion	Yaldiz and Ertekin, 2001
9	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	Two term exponential	Ruiz et al, 2008
10	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	Verma et al.	Doymaz, 2005
11	$MR = \frac{a}{1 + \exp(kt)}$	Logistic	Chandra and Singh, 1995

โดยในส่วนการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) โดยที่ RMSE มีความสัมพันธ์ดังนี้

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้ง

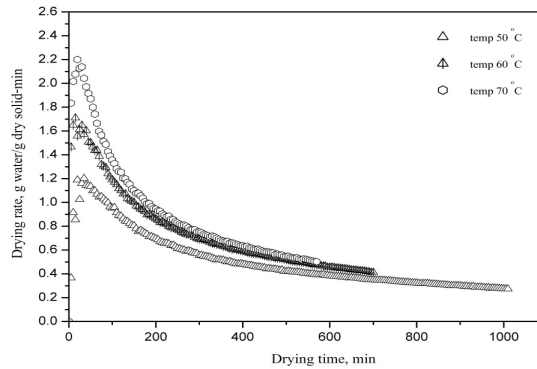
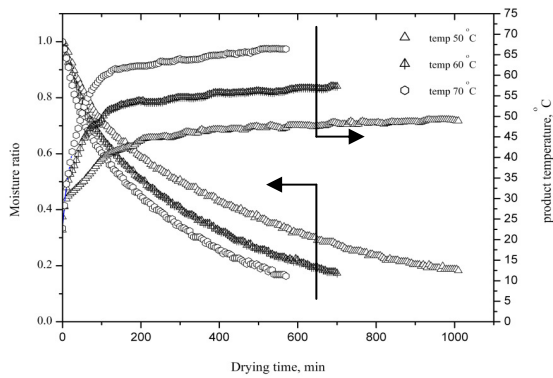
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ปลานิลที่ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า ในช่วงแรกของการอบแห้ง ความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์ออกสู่นอกห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลง จนคงที่ในที่สุด เมื่อพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้ง

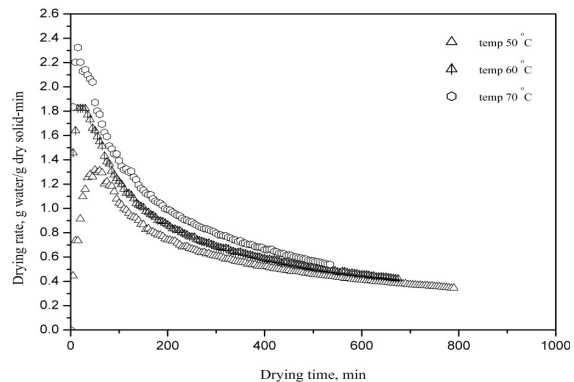
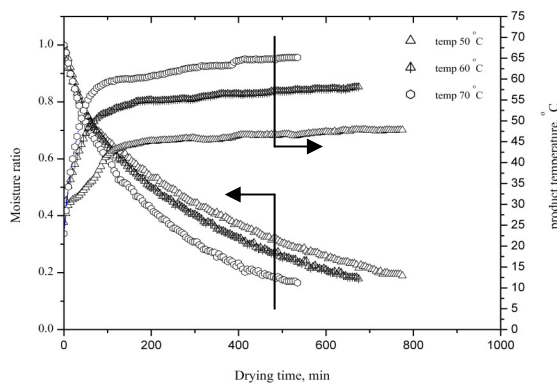
พบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความชื้นลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส

ซึ่งการลดลงของความชื้นเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนหลังจากกระบวนการอบแห้งผ่านไปประมาณ 30 นาที จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้ง

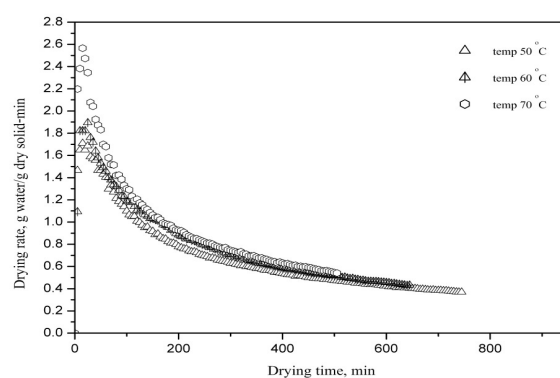
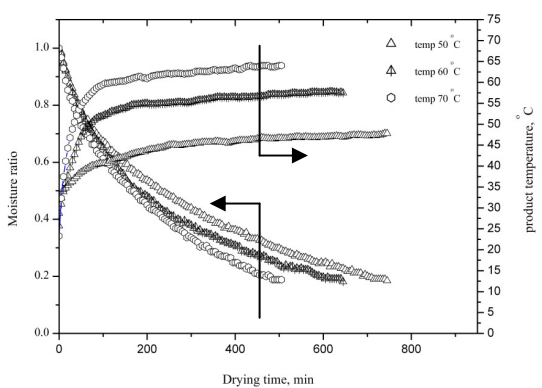
70 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยประมาณ 79 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที

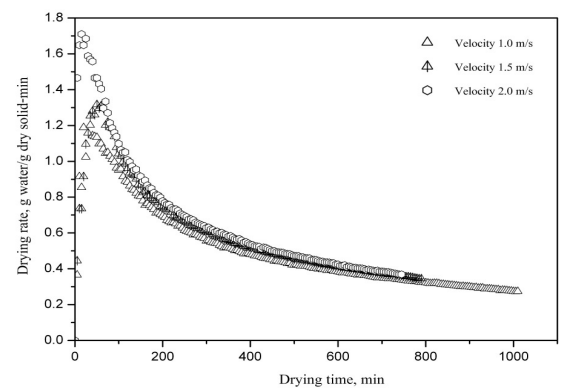
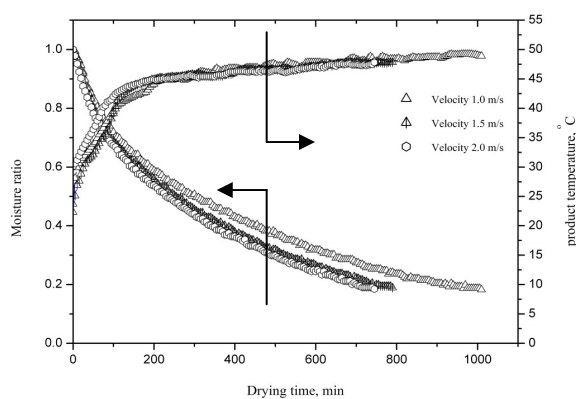


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

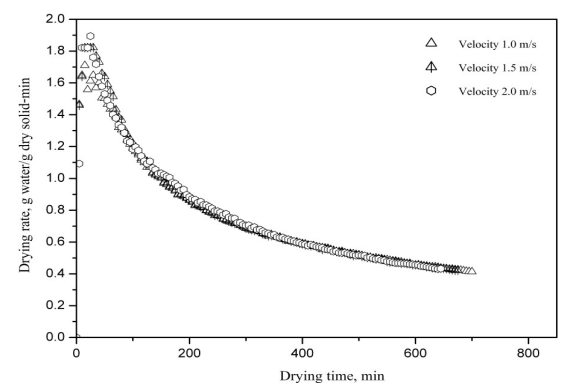
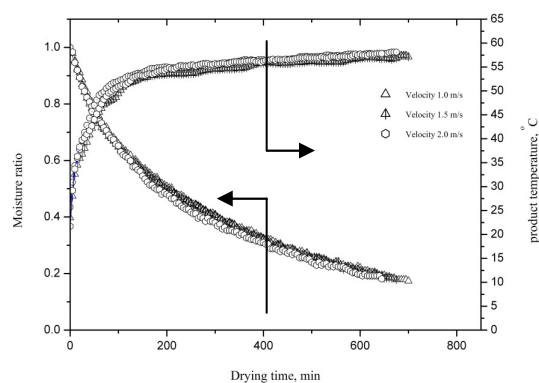
รูปที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ในการอบแห้งปลานิลที่ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที และ 2.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง ผลการทดลอง พบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มเหมือนกันกับการอบแห้งปลานิลที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที กล่าวคือ อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยที่ระดับความเร็วลมเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

3.2 ผลของความเร็วลม

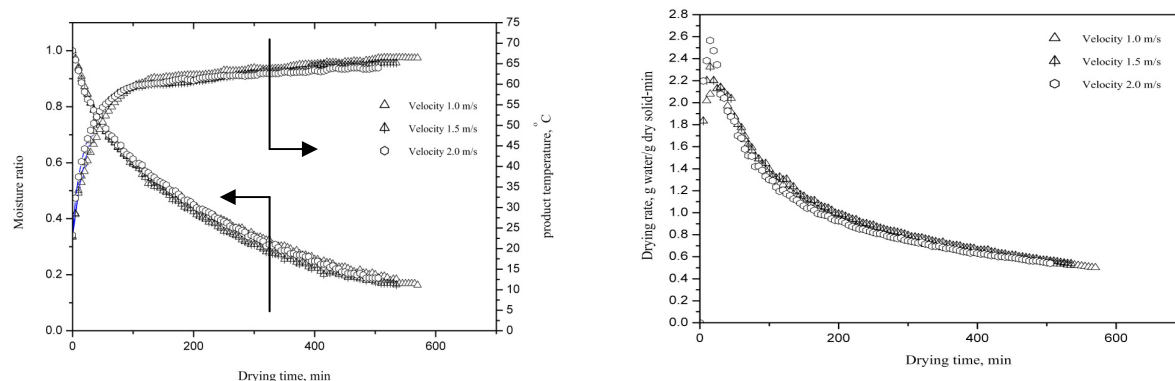
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลาในการอบแห้งปลานิลที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส

รูปที่ 6-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้งกับเวลา ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากภาพพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง มีแนวโน้มลักษณะเช่นเดียวกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ความเร็วลมมีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลา นิล โดยที่อุณหภูมิเดียวกัน อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลม

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 2 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน

โดยพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้อบแห้ง ตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นลดลงประมาณ 0.5 ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นของปลานิลแดดเดียว จากข้อมูลพบว่า ที่เงื่อนไขความเร็วลมเดียวกัน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำแต่ขณะเดียวกันก็ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันยังพบอีกว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมหรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งปลานิล

เงื่อนไขการอบแห้ง		ปริมาณน้ำที่ระเหย จากผลิตภัณฑ์ (kg)	เวลาที่ใช้ในการ การอบแห้ง (h)	ความสิ้นเปลือง พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ความสิ้นเปลือง พลังงานจำเพาะ (kWh/kg)
อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วลม (m/s)				
50	1.0	0.4	4.7	5.1	12.8
	1.5	0.4	3.8	6.2	15.5
	2.0	0.4	3.5	7.6	19.1
60	1.0	0.4	3.3	5.2	13.0
	1.5	0.4	3.2	7.6	19.0
	2.0	0.4	2.8	8.9	22.1
70	1.0	0.4	2.7	5.5	13.7
	1.5	0.4	2.5	7.6	19.1
	2.0	0.4	2.3	9.4	23.4

3.4 สมการอบแห้งชั้นบาง

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลดำเนินการโดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตาราง

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลม ดังนั้น $a, b, c, g, h, k, k_1, k_2$ หรือ n ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ของสมการ จึงได้ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลม โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

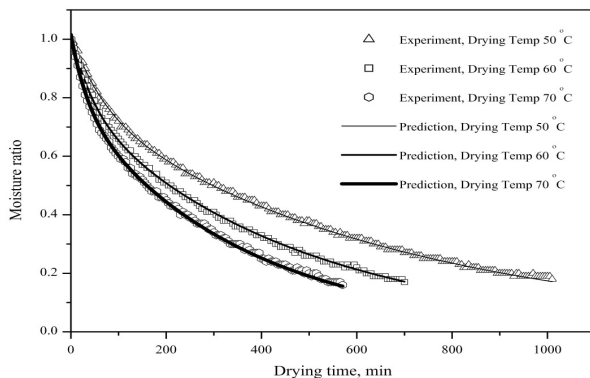
ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง

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
Page	k	-0.01499	0.00915	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
	n	0.72058	-0.83839	-0.01748	0.01652		
Modified Page I	k	-0.01455	0.00880	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
	n	0.72023	0.00071	0.00029	-0.00006		
Henderson and Pabis	a	0.90310	-0.01690	-0.00041	0.00031	0.99072	0.0277
	k	-0.00380	0.00174	0.00010	-0.00002		
Wang and Singh	a	0.00335	-0.00172	-0.00009	0.00002	0.96861	0.0508
	b	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000		
Two term exponential	a	0.17592	-0.03407	0.00086	-0.00003	0.99410	0.0221
	k	-0.01748	0.01067	0.00041	-0.00009		
Logistic	a	-0.19268	0.05117	0.00087	-0.00076	0.98395	0.0364
	k	-0.00321	0.00163	0.00008	-0.00002		
Approximation of diffusion	a	0.39043	-0.14594	-0.00307	0.00273	0.97141	0.0083
	b	0.33347	-0.18749	-0.00405	0.00339		
	k	-0.07508	0.05127	0.00162	-0.00088		
Logarithmic	a	0.86789	-0.09014	-0.00105	0.00137	0.99586	0.0186
	k	-0.00710	0.00408	0.00017	-0.00006		
	c	0.03815	0.11502	0.00139	-0.00173		
Verma et al.	a	0.37858	-0.14814	-0.00263	0.00263	0.99891	0.0095
	k	-0.06104	0.04364	0.00134	-0.00073		
	g	-0.00381	0.00201	0.00010	-0.00003		
Two term	a	0.46105	0.30369	0.00605	-0.00583	0.99899	0.0092
	b	0.44101	-0.18336	-0.00367	0.00336		
	k_1	-0.00434	0.00250	0.00011	-0.00004		
	k_2	-0.08211	0.06397	0.00182	-0.00115		

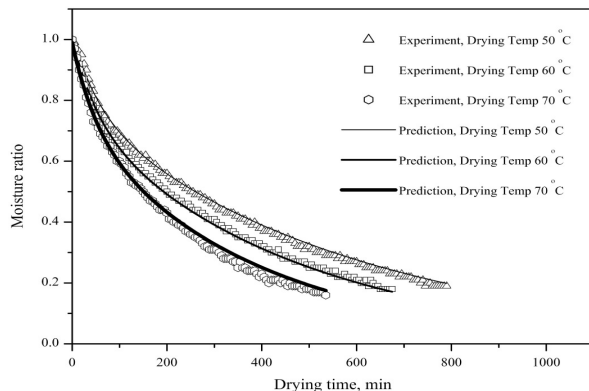
หมายเหตุ: a, b, c, d, g, k_1 , k_2 หรือ n คือ ค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง (K)

$$K = x_0 + x_1 T + x_2 V + x_3 TV \quad (6)$$

เมื่อ	K	คือ	a, b, c, d, g, k_1 , k_2 หรือ n
	T	คือ	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)
	V	คือ	ความเร็วลม (m/s)
	x_i	คือ	ค่าคงที่ของสมการที่ (6)



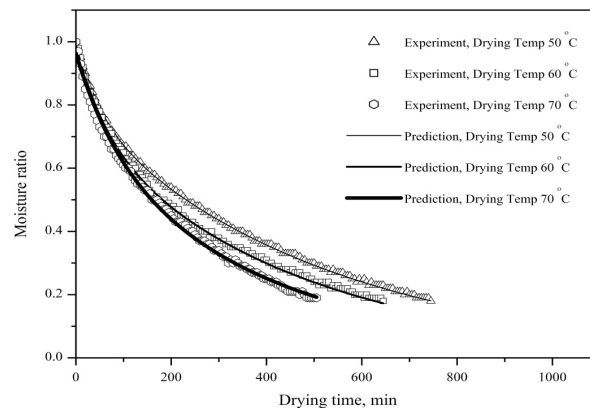
รูปที่ 8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลม 1.0 m/s



รูปที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลม 1.5 m/s

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งข้างบนข้าง, R^2 และ RMSE จากการวิเคราะห์สมการทั้ง 11 สมการ พบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0092) น้อยที่สุด

ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณตามรูปแบบของสมการ Two term มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังข้อมูลซึ่งได้แสดงในรูปที่ 8-10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา ระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลม 2.0 m/s

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วลมมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยเมื่อเพิ่มความเร็วลม หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง จะส่งผลให้อัตราการอบแห้ง และความเร็วลมเปลี่ยนแปลงงานจำเพาะของการอบแห้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในส่วนของการวิเคราะห์สมการอบแห้งข้างบนข้างที่เลือกศึกษาทั้ง 11 สมการ พบว่า สมการของ Two term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0092) น้อยที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- Field morning star new stars tilapia fish exports Thai products. Export-Import Bank of Thailand (Cited 2007 December 14). Available from: <http://www.ryt9.com/s/exim/285974> (accessed on September 09, 2009).
- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*. Vol. 59, 121-126.
- Chandra., Singh (1995). Applied numerical methods for food and agricultural engineers. *CRC Press, Boca Raton, FL*. 163-167.
- Chua, K. J., Chou, S. K. (2003). Low-cost drying methods for developing countries. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 14, 519-528.
- Doymaz, I. (2005). Sun drying of figs: experimental study. *Journal of Food Engineering*. Vol. 71, 403-407.
- Diamante, L. M., Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices, *Solar Energy*, vol. 51, No. 4, 271-276.
- Glouannec, P., Lecharpentier, D., Noel, H. (2002). Experimental survey on the combination of radiating infrared and microwave sources for the drying of porous material. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 22, 1689-1703.
- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. Vol. 17, 1167-1172.
- Jaya, S. Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*. Vol. 21, No.7, 1215-1234.
- Kar, A. Gupta, D. K. (2003). Air drying of osmoses button mushroom. *Journal of Food Science and Technology*. Vol. 40, No. 1, 23-27.
- Ozdemir, M. Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*. Vol. 42, 225-233.
- Ruiz, A. Celma, S. Rojas, F. Lopez-Rodríguez. (2008). Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 47. No. 9-10, 1810-1818.
- Soponronnarit, S., Nattawut, D., Hirunlabh, J., Namprakai, P., Thepa, S. (1992). Computer Simulation of Solar Energy Assisted Fruit Drying. *RERIC International Energy Journal*. Vol. 14, 59-70.
- Simal, S. Femenia, A. Garau, M.C. Rossell'ó, C.(2005). Use of exponential, Page'sand diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, vol. 66, No. 3, 323-328.
- Togrul, I.T., Pehlivan, D. (2003). Modeling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, vol. 58 , 23-32.
- Yaldiz, O. Ertekin, C. Uzun, H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy*, vol. 26, No. 5, 457-465.
- Yaldiz, O. Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying some different vegetables. *Drying Technology*. Vol. 19, 583-597.