การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน

Study on drying kinetic of Tilapia nilotica using hot air

ประทีป ตุ้มทอง* และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190 โทร 0-4535-3309 โทรสาร 0-4535-3308
*E-mail: th_prateep@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน และหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็วลม 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษา ได้แก่ อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วลม หรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะทำให้อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าสมการของ Two term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และ RMSE (0.0092) น้อยที่สุด

คำหลัก: การอบแห้ง, ลมร้อน, สมการอบแห้งชั้นบาง

Abstract

The objectives of this research were to study drying kinetic of Tilapia nilotica and to find out the suitable thin layer equation for predicting drying kinetic of Tilapia nilotica. To achieve these purposes, experiments were conducted under the following conditions: air velocities of 1.0, 1.5, and 2.0 m/s and the drying temperatures of 50, 60, and 70˚C. The effects of drying conditions on drying rate and specific energy consumption were experimentally investigated. It was obviously found from the experimental results that drying rate and specific energy consumption increase with increment of drying temperature or air velocity. Furthermore, it was revealed that Two term equation is the best equation for predicting drying kinetic of Tilapia nilotica. This equation yields the maximum value of R^2 (0.99899) and the minimum value of RMSE (0.0092).

Keywords: Drying, Hot air, Thin layer equation

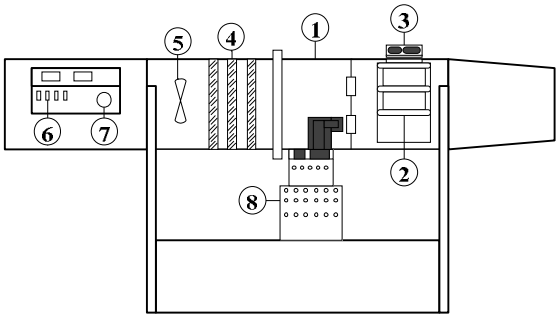
1. บทนำ

การลดความชื้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน [1] เช่น การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยสุญญากาศ การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน การอบแห้งด้วยลมร้อนและการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด การอบแห้งในแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยสุญญากาศ และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์อบแห้งที่มีคุณภาพดี [1-4] แต่ก็มีข้อด้อย คือ ระบบมีความซับซ้อนและต้นทุนที่สูง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วไม่เหมาะกับอุตสาหกรรมขนาดครัวเรือน สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีที่น่าสนใจ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบจะมีคุณภาพสูง แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความปลอดภัยจากคลื่นสนามแม่เหล็ก [5] ทำให้ยังจำกัดการใช้อยู่แค่เตาอบขนาดเล็กสำหรับใช้ในห้องครัว การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ที่ได้กล่าวมา เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้แหล่งความร้อนได้จากหลายแหล่งที่หาได้ง่าย เช่น จากขดลวดความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง แอลพีจี พลังงานแสงอาทิตย์ หรือความร้อนทิ้งจากกระบวนการต่างๆ ในโรงงาน แหล่งพลังงานที่ถูกที่สุด ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก็มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถทำได้หากสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่สะอาดพอ และต้องใช้พื้นที่มาก [6] ส่งผลให้อัตราการผลิตต่ำ การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการพาความร้อน (convection) โดยความร้อนจากอากาศจะถ่ายเทด้วยการพาความร้อนสู่ผิวของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทจากผิวของผลิตภัณฑ์สู่ภายในโดยอาศัยการนำความร้อน ซึ่งจะเป็นผลให้ความดันไอของน้ำที่มีอยู่ภายในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำที่อยู่ภายในถูกขับออกมา จากข้อสรุปเบื้องต้นงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรประเภทเนื้อสัตว์ด้วยลมร้อน ซึ่งได้แก่ เนื้อปลานิล เนื่องจากมีการเพาะเลี้ยงจำนวนมากในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และมีการแปรรูปในรูปแบบของปลานิลแดดเดียวเป็นสินค้าหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) โดยเฉพาะกลุ่มเกษตรกรบ้านทับไท ตำบลจาระแม อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี มีการแปรรูปปลานิลแดดเดียวสามารถสร้างงานสร้างรายได้เป็นจำนวนมาก [7] ดังนั้นหากมีข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล ก็จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการแปรรูปปลานิลต่อไปในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray dryer) ซึ่งใช้พลังงานจากขดลวดความร้อน (Heater) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชุดทดลองประกอบด้วย 1) ห้องอบแห้ง 2) ถาดรองผลิตภัณฑ์ 3)โหลดเซลล์ชั่งน้ำหนัก 4) ขดลวดคามร้อน 5) พัดลม 6) ชุดควบคุมอุณหภูมิ 7) ชุดปรับความเร็วลม 8) ชุดบันทึกข้อมูล (Data logger)

โดยมีรายละเอียดดังนี้ ขนาดของห้องอบแห้งเท่ากับ 25 × 150 × 25 เซนติเมตร (กว้าง × ยาว × สูง) อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นขดลวดความร้อนขนาด 6 kW พัดลมเป็นแบบไหลตามแนวแกนมอเตอร์ขนาด 500 W สามารถปรับความเร็วรอบได้ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger ความเร็วของอากาศอบแห้ง วัด

โดยใช้ hot wire anemometer วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้กิโลวัตต์เอาว์มิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ชั่งโดยใช้โหลดเซลล์ และต่อเข้า data logger เพื่อบันทึกค่า

2.2 วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งในงานวิจัยนี้คือ ปลานิล (Tilapia nilotica) ขนาดเนื้อปลาที่ใช้ทดลองมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยชำแหละเอาส่วนที่เป็นหัวและก้างออก แล้วนำเอาส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นโดยเครื่องหั่นเป็นทางยาวตามความยาวของตัวปลาแต่ละรุ่น ความกว้างของเส้นเนื้อปลาประมาณ 1 เซนติเมตร นำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน ในส่วนของการทดลอง ปลาสดที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้น 300-350 % d.b. อบจนกระทั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์คงที่ โดยทำการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็วของลมร้อน 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิอบแห้งและอุณหภูมิภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงความชื้นเริ่มต้น 300-350 % d.b. จนถึงความชื้นสุดท้ายคงที่ โดยอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คำนวณจากสมการที่ (1)

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

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

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ, % d.b.

ในส่วนของการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบอบแห้ง ได้กำหนดพารามิเตอร์เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการศึกษาดังนี้

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$SEC = \frac{E_{heater} + E_{fan}}{M_W} \qquad (2)$$

เมื่อ E_{heater} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ขดลวดความร้อนใช้, kWh

E_{fan} คือ พลังงานไฟฟ้าที่พัดลมใช้, kWh

M_W คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อวัสดุ, kg

ในการวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์ พิจารณาตั้งแต่เริ่มต้นการอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นเหลือประมาณ 0.5 ซึ่งเป็นสภาวะที่ผลิตภัณฑ์มีความชื้นใกล้เคียงกับปลานิลแดดเดียวที่วางจำหน่ายในท้องตลาด

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Drying Equation) โดยเป็นรูปแบบของผลเฉลยอย่างง่าย รูปแบบสมการพื้นฐานที่ใช้ทำนายการอบแห้งชั้นบางแสดงดังแสดงในตารางที่ 1

การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) โดยมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่า Root mean square

error (RMSE) ซึ่ง RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} \left(MR_{Pre,i} - MR_{Exp,i} \right)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

เมื่อ

$MR_{Pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณ

$MR_{Exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งชั้นบาง

No.	Model equation	Name of model	References
1	MR = exp (-kt)	Newton	[8]
2	MR = exp ($-kt^n$)	Page	[9]
3	MR = exp ($-(kt)^n$)	Modified Page I	[10]
4	MR = a exp (-kt)	Henderson and Pabis	[11]
5	MR = a exp (-kt)+c	Logarithmic	[12]
6	MR = a exp ($-k_1t$)+b exp ($-k_2t$)	Two term	[13]
7	MR = 1 + at + bt^2	Wang and Singh	[14]
8	MR = a exp (-kt)+(1-a) exp (-kbt)	Approximation of diffusion	[15]
9	MR = a exp (-kt)+(1-a) exp (-kat)	Two term exponential	[16]
10	MR = a exp (-kt)+(1-a) exp (-gt)	Verma et al.	[17]
11	$MR = \frac{a}{1 + \exp(kt)}$	Logistic	[18]

3. ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาอบแห้งปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ได้ผลการทดลองดังนี้

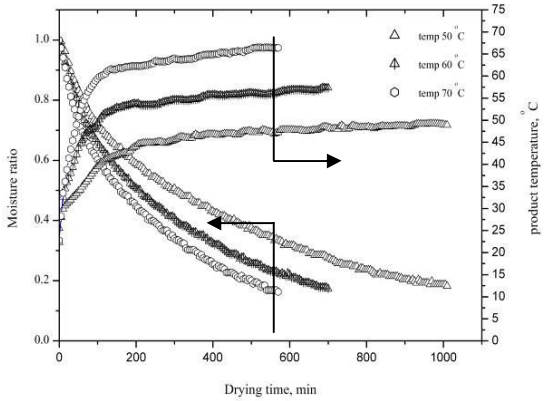
3.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้ง

รูปที่ 2-7 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งปลานิล ที่เงื่อนไขความเร็วลมต่างๆ จากการทดลองพบว่า ที่ระดับความเร็วลมเดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์ (ปลานิล) จะมีปริมาณมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงได้เร็วกว่า โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ได้รับพลังงานจากขดลวดความร้อน อีกทั้งผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์ออกสู่ภายนอกห้องอบแห้งอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนคงที่ในที่สุด ในกรณีที่พิจารณาภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 ความเร็วลมในการอบแห้ง 1.0 เมตรต่อวินาที พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 79 และ 27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และหากพิจารณาที่ความเร็วลมในการอบแห้ง 2.0 เมตรต่อวินาที พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

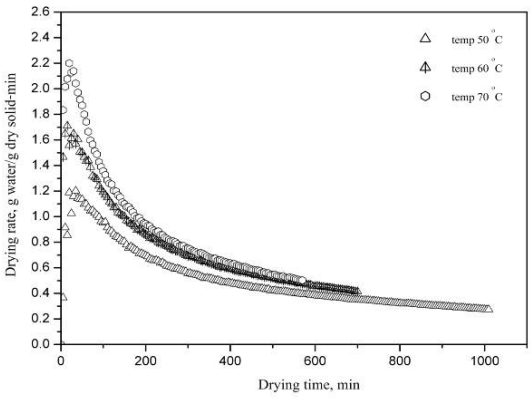
ใช้เวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 45 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.2 ผลของความเร็วลม

รูปที่ 8-13 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้งปลานิล ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งต่างๆ โดยผลจากการทดลองพบว่า ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน การอบแห้งที่ความเร็วลมสูง จะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่ความเร็วลมต่ำ ซึ่งเกิดจากการใช้ความเร็วลมสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์(ปลานิล) จะมีปริมาณมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

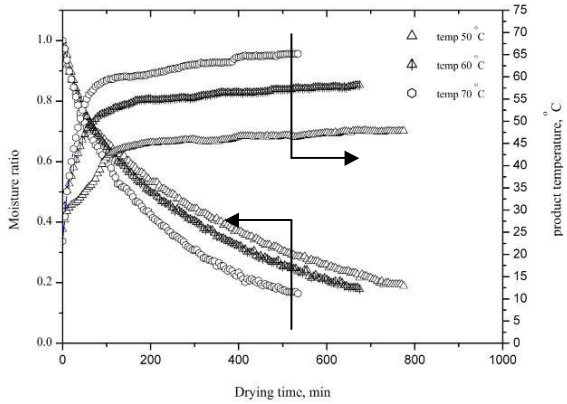


รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

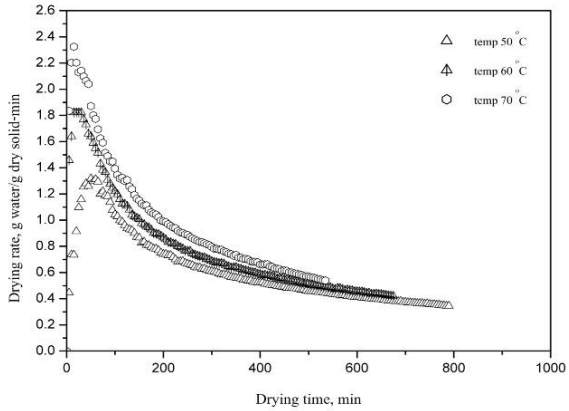


รูปที่ 3 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที

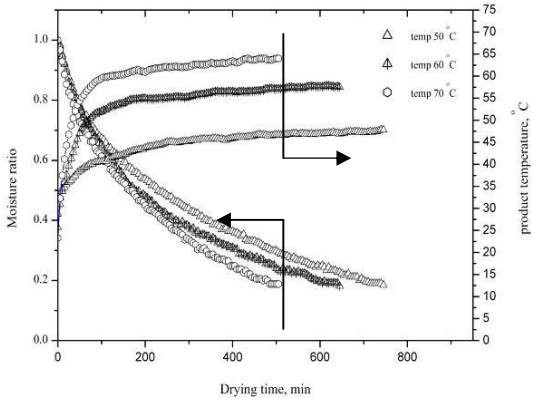
ในกรณีที่พิจารณาภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนความชื้นเท่ากับ 0.5 อุณหภูมิในการอบแห้ง 50 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาสั้นกว่าที่ความเร็วลมในการอบแห้ง 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที ประมาณ 31 และ 11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้ง 70 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาสั้นกว่าที่ความเร็วลมในการอบแห้ง 1.0 เมตรต่อวินาที ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีความแตกต่างเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความเร็วลมในการอบแห้งเท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที



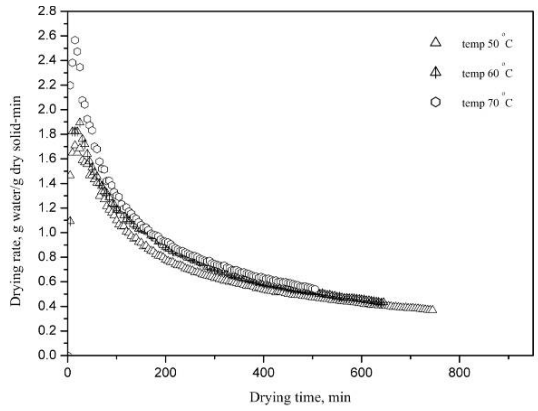
รูปที่ 4 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



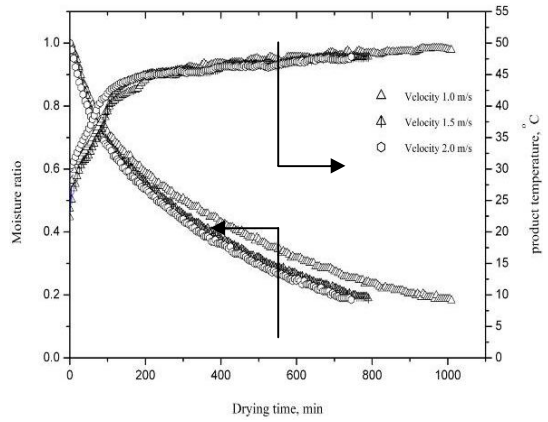
รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



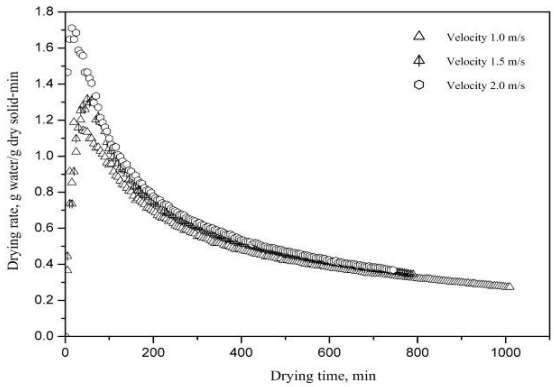
รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



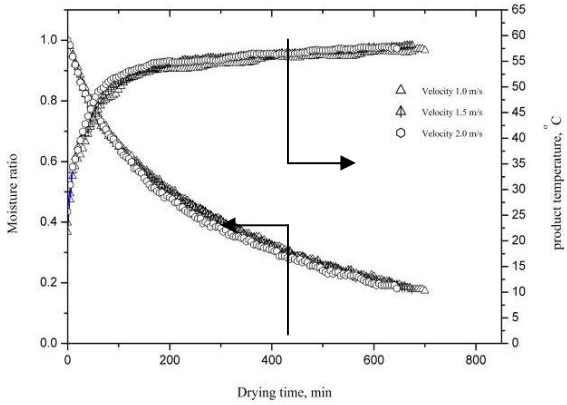
รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที



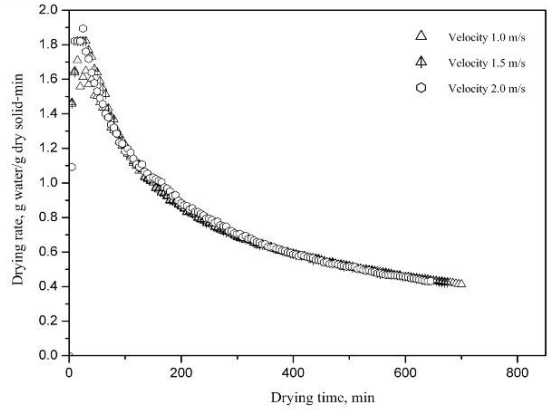
รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



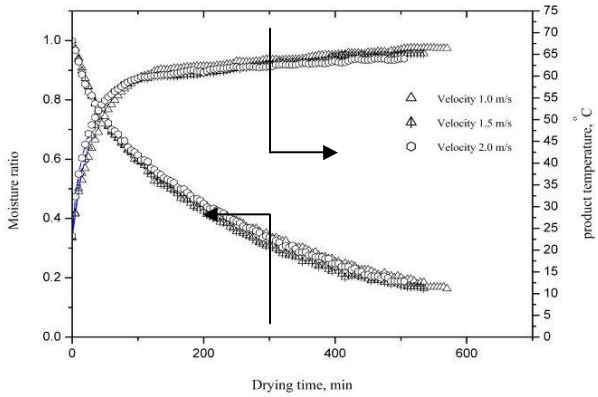
รูปที่ 9 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



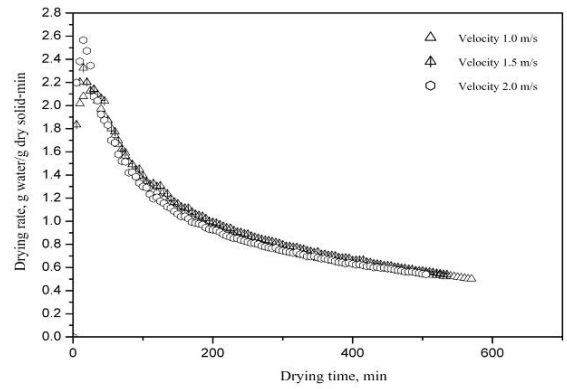
รูปที่ 10 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 12 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 13 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 2 แสดงความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนโดยพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้อบแห้ง ตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนกระทั่งอัตราส่วนความชื้นลดลงประมาณ 0.5 ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นของปลานิลแดดเดียว จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่า ที่เงื่อนไขความเร็วลมเดียวกัน ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง โดยการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นขณะเดียวกันก็ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันยังพบอีกว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลม โดยการเพิ่มความเร็วลมช่วยเพิ่มความสามารถในการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ขณะเดียวกันก็ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นเช่นกันซึ่งสรุปได้ว่า ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมหรือเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งปลานิล

Drying conditions		Extracted water (kg)	Drying time (h)	Energy consumption (kWh)	SEC (kWh/kg)
Temperature (°C)	Velocity (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 สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง

การวิเคราะห์หาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล ดำเนินการโดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบางที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง และความเร็วลม ดังนั้น a, b, c, g, k, k_1, k_2 หรือ n ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ จึงได้ถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง และความความเร็วลม โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = x_0 + x_1T + x_2V + x_3TV \qquad (3)$$

เมื่อ K คือ a, b, c, g, k_1, k_2 หรือ n

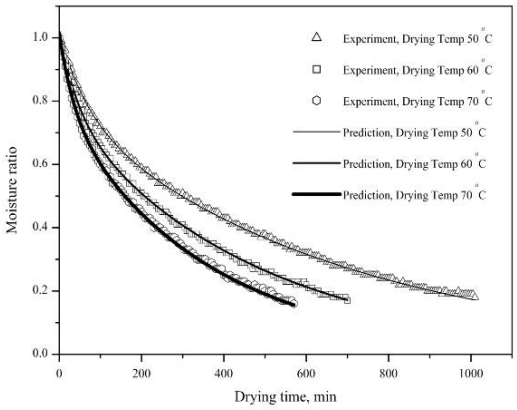
T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (^{o}C)

V คือ ความเร็วลม (m/s)

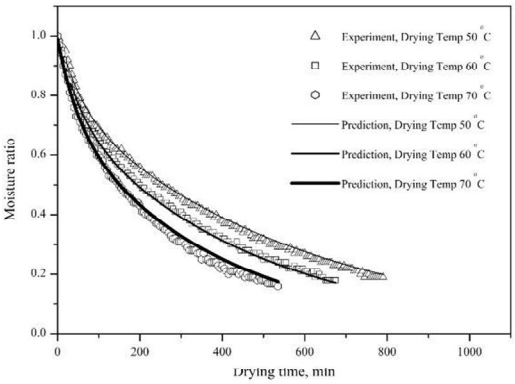
x_i คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (3)

ตารางที่ 3 แสดงค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง

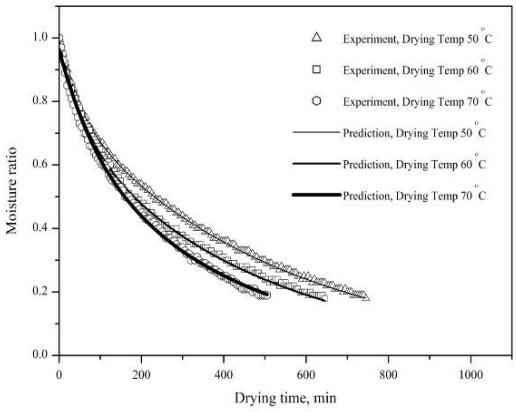
Model	Parameter	x_0	x_1	x_2	x_3	R^2	RMSE
Newton	k	-0.00453	0.00212	0.00012	-0.00003	0.97106	0.0488
Page	k	-0.01499	0.00915	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
	n	0.72058	-0.83839	-0.01748	0.01652		
Modified Page I	k	-0.01455	0.00880	0.00048	-0.00013	0.99855	0.0110
	n	0.72023	0.00071	0.00029	-0.00006		
Henderson 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		



รูปที่ 14 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลม 1.0 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 15 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 16 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นกับเวลาระหว่างผลการทดลองกับผลการทำนายตามรูปแบบสมการ Two term ที่ความเร็วลม 2.0 เมตรต่อวินาที

ผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางซึ่งสรุปในตารางที่ 3 พบว่า สมการ Two term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 สูงที่สุด และ RMSE น้อยที่สุด ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการทำนายไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 14-16

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา และทดลองการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิ และความเร็วลมมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งหรือความเร็วลมจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นในส่วนของการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางทั้ง 11 สมการ พบว่า สมการ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99899) มากที่สุด และค่า RMSE (0.0092) น้อยที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

[1] Chua, K. J. and Chou, S. K. (2003). Low-cost drying m
ethods for developing countries, *Trends in Food Science & Technology*, vol. 14, December 2003, pp. 519-528.

[2] Jaya, S. and Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp, *Drying Technology*, vol.21(7), pp. 1215-1234.

[3] Vogt, M. (2007). Infrared drying lowers energy costs and drying times, *Plastics, Additives and Compounding*, vol. 9, September-October 2007, pp. 58-61.

[4] Nourhene, B., Neila, B., Imen B. S. and Nabil, K. (2009). Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves, *Industrial Crops and Products*, vol. 29, March 2009, pp. 412-419.

[5] Glouannec, P., Lecharpentier, D. and 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, October 2002, pp. 1689–1703.

[6] Soponronnarit, S., Nattawut, D., Hirunlabh, J. Namprakai, P. and Thepa, S. (1992). Computer Simulation of Solar Energy Assisted Fruit Drying, *RERIC International Energy Journal*, vol. 14, pp. 59-70.

[7] ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า (2552). ปลานิลดาวรุ่งดวงใหม่สินค้าประมงส่งออกของไทย, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.ryt9.com, เข้าดูเมื่อวันที่ 29/09/2009.

[8] Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow, *Solar Energy*, vol. 59, April-June1997, pp.121-126.

[9] Simal, S. Femenia, A. Garau, M.C. and Rossell´o, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit, *Journal of Food Engineering*, vol. 66(3), February 2005, 323–328.

[10] Diamante, L. and M., Munro, P. A. (1993). Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices, *Solar Energy*, *vol 51* (4), October 1993, pp. 271-276.

[11] Yaldız, O. Ertekin,C. and Uzun,H.I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy*, vol. 26(5), May 2001, 457-465.

[12] Togrul, I.T. and Pehlivan, D. (2003). Modeling of drying kinetics of single apricot, *Journal of Food Engineering*, vol. 58 , June 2003, pp. 23-32.

[13] Henderson, S. M. (1999). Progress in developing the thin-layer drying equation, *Transactions of the ASAE*, vol. 17, pp. 1167-1168/1172.

[14] Ozdemir, M. and Devres, Y.O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting, *Journal of Food Engineering*, vol. 42, December 1999, pp. 225-233.

[15] Yaldız, O. and Ertekin, C. (2001). Thin layer solar drying some different vegetables, *Drying Technology*, vol. 19, pp. 583-597.

[16] Ruiz, A. Celma, S. Rojas, F. and Lopez-Rodríguez, (2008). Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk, *Chemical Engineering and Processing*, vol. 47(9-10), September 2008, 1810-1818.

[17] Doymaz, I. (2005). Sun drying of figs: an experimental study, *Journal of Food Engineering*, vol. 71, December 2005, pp. 403-407.

[18] Chandra and Singh. (1995). Applied numerical methods for food and agricultural engineers, *CRC Press, Boca Raton*, *FL*, August 1995, pp. 163-167.