

จลนพลศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ของปลานิล

Drying Kinetic and Diffusion Coefficient of Tilapia Nilotica

ประทีป ตุ่มทอง อำไพศักดิ์ ทีบุญมา*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 โทร 0-4535-3309 โทรสาร 0-4535-3308

Prateep Toomthong Umphisak Teeboonma*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

Warinchamrab District, Ubonratchathani Province, 34190 Tel: 0-4535-3309, Fax: 0-4535-3308

Email: umphisak@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน นอกจากนั้นยังหาสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อน 1.5 เมตรต่อวินาที ผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส สูงกว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 32 และ 21 ตามลำดับ นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบาง พบว่าแบบจำลอง Two term สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นปลานิลได้ดีที่สุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2 , 0.99855) มากที่สุด และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE, 0.01107) น้อยที่สุด ในขณะที่สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 3.80×10^{-8} ถึง 6.18×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที

คำหลัก: การอบแห้ง ลมร้อน สมการอบแห้งชั้นบาง สัมประสิทธิ์การแพร่ ปลานิล

Abstract

The objectives of this research were to study drying kinetic and effective diffusivity coefficients of *Tilapia nilotica* using hot air and to find out the

appropriate thin layer equation for predicting the drying kinetic of *Tilapia nilotica*. The experiments were carried out at drying temperatures of 50, 60, 70°C and at the air velocity of 1.5 m/s. From experimental results, it was revealed that drying rate for drying temperatures of 70°C is higher than that for drying temperatures of 50 and 60°C by 32% and 21%, respectively. 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. Finally, Effective diffusivity coefficients of moisture transfer were found ranging from 3.80×10^{-8} to $6.18 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

Keywords: Drying, hot air, thin layer equation, diffusion coefficient, tilapia nilotica

1. บทนำ

ปลานิล เป็นปลาน้ำจืด สปีชีส์นิโลติคัส (*O. Niloticus*) จัดอยู่ในวงศ์ *Cichlidae* พบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดบุรีรัมย์ ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ สามารถเพาะเลี้ยงได้ในเกือบทุกภูมิภาคของโลก เจริญเติบโตเร็วและมีปัญหาเรื่องโรคน้อย ปัจจุบันความต้องการบริโภคปลานิลในตลาดโลก โดยเฉพาะในประเทศพัฒนาแล้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งเนื่องจาก

ปลานิลเป็นปลาเนื้อขาว จึงเป็นที่ต้องการของกลุ่มผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ ประกอบกับเนื้อปลานิลมีรสชาติดี สามารถดัดแปลงไปเป็นวัตถุดิบประกอบอาหารของหลาย ๆ ชนิด และราคาถูกเมื่อเทียบกับปลาเนื้อขาวชนิดอื่น ๆ จึงเหมาะกับการนำมาเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปอาหารเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม [1] ในจังหวัดอุบลราชธานี ได้มีการตั้งกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรเพื่อแปรรูปปลานิลในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น กลุ่มแม่บ้าน บ้านทับไทย ได้นำปลานิลมาแปรรูปเป็นปลานิลแดดเดียวโดยใช้วิธีตากแดดตามธรรมชาติ อย่างไรก็ตามการทำปลานิลแดดเดียวของเกษตรกรประสบปัญหาในเรื่องของแสงแดดที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้ต้องใช้เวลาในการตากนาน ส่งผลให้การผลิตปลานิลแดดเดียวช้าและมีคุณภาพต่ำ ทำให้ขายได้ในราคาไม่ดีเท่าที่ควร นอกจากนี้ปลานิลแดดเดียวที่ได้จากการตากแดดยังมีฝุ่นละอองปนเปื้อนซึ่งไม่ถูกหลักอนามัยเท่าที่ควร

ดังนั้น การศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการแปรรูปปลานิลแดดเดียวเพื่อลดเวลาการทำแห้ง ประหยัดค่าใช้จ่ายหรือลดต้นทุนการผลิต และคงคุณภาพปลานิลแดดเดียวไว้ให้มากที่สุด จึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ในขณะที่เดียวกันการทำนายแนวทางหรือหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิอบแห้ง หรือความเร็วลม เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการออกแบบการอบแห้งที่เหมาะสม จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์หาแบบจำลอง และสัมประสิทธิ์การแพร่ของปลานิล เพื่อนำมาทำนายและอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและไม่ต้องทดลองจริงในทุกเงื่อนไขที่ต้องการศึกษา [2]

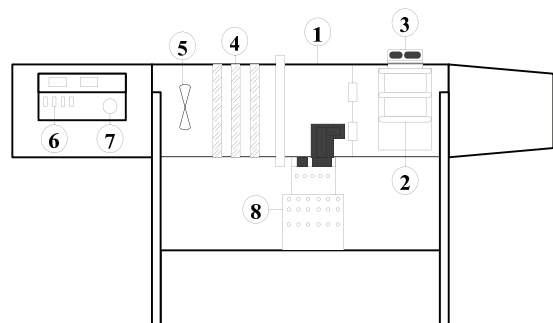
จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเพื่อหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลที่เหมาะสม และสัมประสิทธิ์การแพร่ของปลานิลสำหรับนำไปพัฒนาและปรับปรุงรูปแบบหรือวิธีการแปรรูปปลานิลต่อไปในอนาคตให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพและมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดียิ่งขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 ประกอบด้วยห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้า ขนาดระดับห้องปฏิบัติการ ขนาดของห้องอบแห้ง

เท่ากับ $25 \times 150 \times 25$ ลูกบาศก์เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) อุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นขดลวดความร้อนขนาด 6 กิโลวัตต์ พัดลมเป็นแบบไหลตามแนวแกนมอเตอร์ขนาด 500 วัตต์ สามารถปรับความเร็วลมได้ อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง วัดโดยใช้ hot wire anemometer วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ กิโลวัตต์-ชั่วโมง มิเตอร์ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักซึ่งโดยใช้โหลดเซลล์ และต่อเข้าสู่ชุดบันทึกข้อมูล เพื่อบันทึกน้ำหนักตลอดช่วงการทดลอง



รูปที่ 1 ชุดทดลอง

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

2.2 วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้อบแห้งในงานวิจัยนี้คือ ปลานิล (*Tilapia Nilotica*) ขนาดเนื้อปลาที่ใช้ทดลองมีขนาด $1 \times 16 \times 1.4$ ลูกบาศก์เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยชำแหละเอาส่วนที่เป็นหัวและก้างออก แล้วเอาส่วนที่เป็นเนื้อมาหั่นด้วยเครื่องหั่นตามความยาวของตัวปลาแต่ละรุ่น ความกว้างของเส้นเนื้อปลาประมาณ 1 เซนติเมตร ปริมาณ 500 กรัม นำมาวางเรียงบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้ซ้อนทับกัน ในส่วนของการทดลอง ปลาสดที่ทำการทดลองมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 330-350 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ทำการทดลองอบจนกระทั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์คงที่ โดยทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนัก อุณหภูมิอบแห้ง

และอุณหภูมิภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ชุดบันทึกข้อมูล

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในช่วงความชื้นเริ่มต้นประมาณ 330-350 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายคงที่ และทำการวิเคราะห์ข้อมูลในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (1) [2]

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

เมื่อ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง)

การคำนวณค่าอัตราส่วนความชื้นในงานวิจัยนี้ เป็นการคำนวณค่าโดยประมาณ คือ ไม่คิดค่าความชื้นสมดุล โดยตั้งสมมติฐานว่า ความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความชื้นเริ่มต้น

ในส่วนของการวิเคราะห์อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) ที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลานี้ คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2) [3]

$$DR = \frac{M_o - M_T}{T} \quad (2)$$

เมื่อ M_o คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (กรัมน้ำต่อกรัมมวลแห้ง)

M_T คือ ปริมาณความชื้นที่เวลา T (กรัมน้ำต่อกรัมมวลแห้ง)

T คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (นาที)

2.3.2 การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง

การศึกษาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของปลาแห้ง ทำได้โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นจากการ

ทดลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของสมการอบแห้งชั้นบางที่ใช้สำหรับทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ซึ่งอยู่ในรูปสมการเอมไพริคัล ดังที่นำเสนอไว้ในตารางที่ 1 โดยได้พิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้ง ซึ่งที่ผ่านมาสมการที่สรุปไว้ในตารางที่ 1 ไม่ได้นำผลของอุณหภูมิอบแห้งมาวิเคราะห์ ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิอบแห้งรวมเข้าไปด้วย a, b, c, k_1 , k_2 และ n ซึ่งเดิมเป็นเพียงค่าคงที่ของสมการในตารางที่ 1 จึงถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้ง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3)

$$K = x_0 + x_1 T \quad (3)$$

เมื่อ K คือ a, b, c, k_1 , k_2 และ n

T คือ อุณหภูมิอบแห้ง (องศาเซลเซียส)

x_0 , x_1 คือ ค่าคงที่ของสมการที่ (3)

ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการการอบแห้งชั้นบาง ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear regression) ซึ่งมีดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการทำนายของสมการ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination: R^2) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) โดยที่ R^2 และ RMSE มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4) และ (5) [3]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i})^2 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i})^2}{(N-Z)}} \quad (4)$$

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

เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูล

i คือ จำนวนเต็ม 1, 2,

Z คือ จำนวนค่าคงที่ในสมการ

MR_{exp} คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
MR_{pre} คือ ข้อมูลที่ได้จากการทำนาย

ท้ายๆ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพจน์แรก ดังนั้นจึงสามารถประมาณค่าโดยพิจารณาพจน์แรกเพียงพจน์เดียว ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

2.3.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่

สัมประสิทธิ์การแพร่ คือ สมบัติเฉพาะทางกายภาพที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม พิจารณาได้โดยอาศัยสมการการแพร่ของ fick ที่สมมติว่าการแพร่ออกของมวลน้ำหรือความชื้นจากวัสดุเกิดจากเกรเดียนต์ค่าความเข้มข้นของความชื้น สมการนี้ได้หาผลเฉลยโดย crank [4] ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะของรูปร่างหลายแบบ เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าคงที่ วัสดุจะเกิดการกระจายความชื้นสม่ำเสมอจนวัสดุไม่หดตัว และไม่เกิดความต้านทานของการถ่ายเทมวลที่ผิววัสดุ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นแบน กว้าง และยาวมาก [5-7] จะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (6)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2}\right) \quad (6)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (ตารางเมตรต่อวินาที)

L_0 คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาชิ้นงาน (เมตร)

t คือ ระยะเวลาในการอบแห้ง (วินาที)

และสำหรับการอบแห้งที่มีระยะเวลาค่อนข้างนาน สามารถวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่โดยพิจารณาเพียงพจน์แรกของสมการที่ (6) ได้ ทั้งนี้เนื่องจากพจน์

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2}\right) \quad (7)$$

สำหรับการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การแพร่ จำเป็นต้องมีการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(MR)$ กับระยะเวลาในการอบแห้ง เพื่อหาค่าความชัน แล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่อไป โดยสมการที่ (7) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของลอการิทึม (logarithm form) ได้ดังนี้

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L_0^2} \quad (8)$$

หลังจากนั้นสามารถดำเนินการหาสัมประสิทธิ์การแพร่จากค่าความชันของสมการที่ (8) ซึ่งค่าความชันและสัมประสิทธิ์การแพร่มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (9)

$$\text{slope} = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L_0^2} \quad (9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิการอบแห้งต่างๆ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล ซึ่งสามารถนำมาหาค่าคงที่ของการแพร่ และค่าพลังงานกระตุ้นของการอบแห้งได้ โดยใช้สมการของ Arrhenius [8-10] ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (10)

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งชิ้นบาง

No.	Model equations	Name of models	References
1	MR = exp (-kt)	Newton	Ayensu, [11]
2	MR = exp (-kt ⁿ)	Page	Simal et al, [12]
3	MR = exp -(kt) ⁿ	Modified Page I	Diamante Munro, [13]
4	MR = a exp (-kt)	Henderson and Pabis	Yaldiz et al, [14]
5	MR = a exp (-kt)+c	Logarithmic	Togrul and Pehlivan, [15]
6	MR = a exp (-k ₁ t)+b exp (-k ₂ t)	Two term	Henderson, [16]

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่ (ตารางเมตรต่อวินาที)

E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น (กิโลจูลต่อโมล)

T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศ (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.31439×10^{-3} กิโลจูลต่อโมล องศาเคลวิน)

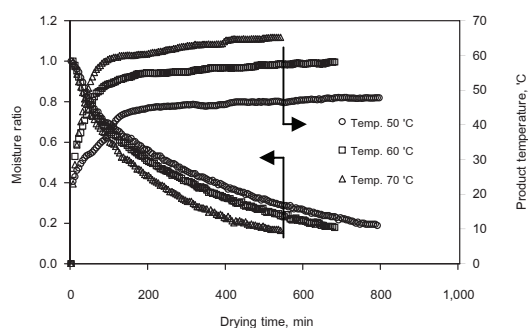
3. ผลและวิจารณ์

3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

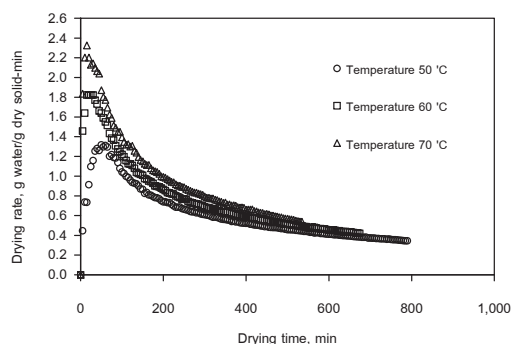
รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที และทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การใช้อุณหภูมิอบแห้งสูง ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณมาก ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงได้เร็วกว่า โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง ดังนั้น จึงเกิดการถ่ายเทความชื้นจากเนื้อผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศโดยรอบอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นจะค่อยๆ ลดลงจนคงที่ในที่สุด เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิอบแห้งพบว่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลงเร็วที่สุด ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งน้อยที่สุด และเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า การลดลงของความชื้นเริ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดหลังจากช่วง 30 นาทีแรกของการอบแห้งผ่านไป ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งที่นำเสนอในรูปที่ 3 นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิอบแห้งเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 32 และ 21 ตามลำดับ

3.2 สมการอบแห้งชั้นบาง

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของสมการการอบแห้งชั้นบาง R^2 และ RMSE จากการวิเคราะห์สมการทั้ง 6 สมการ จากข้อมูลในตารางพบว่า สมการ two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด โดยให้ค่า R^2 (0.99855) มากที่สุด และค่า RMSE (0.01107) น้อยที่สุด ในขณะที่ข้อมูลในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า logarithmic equation มีความแม่นยำในการทำนายน้อยที่สุด และเมื่อนำสมการของ Two term มาประมวลผลเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนที่เงื่อนไขการอบแห้งต่างๆ พบว่าผลการทำนายและผลการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4



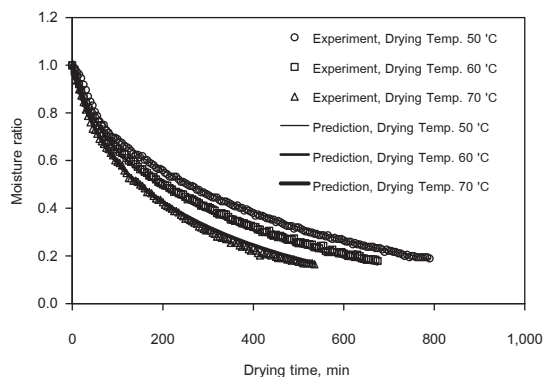
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับระยะเวลาอบแห้ง



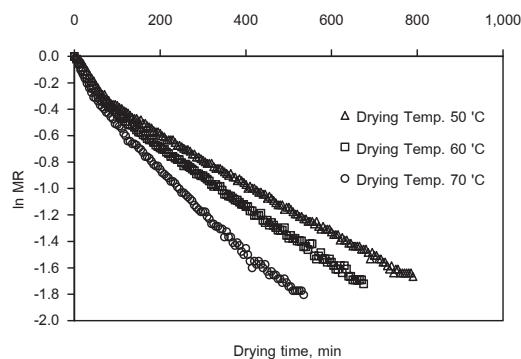
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับระยะเวลาการอบแห้ง

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของสมการอบแห้งชั้นบาง

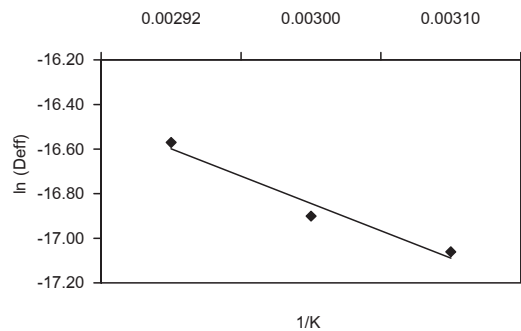
Models	Parameters	x_0	x_1	R^2	RMSE
Newton	k	-0.00137	0.00008	0.97160	0.04863
Page	k	-0.00199	0.00029	0.99805	0.01252
	n	0.72704	-0.01090		
Modified Page I	k	-0.00185	0.00030	0.99808	0.01266
	n	0.72090	0.00026		
Henderson and Pabis	a	0.92139	-0.00064	0.99012	0.02881
	k	-0.00109	0.00006		
Logarithmic	a	-2.56590	0.05067	0.98034	0.07443
	k	-0.04908	0.00091		
	c	1.39885	-0.01684		
Two term	a	1.01483	-0.00422	0.99855	0.01107
	b	-0.00030	0.00004		
	k ₁	0.08763	0.00269		
	k ₂	0.02757	-0.00012		



รูปที่ 4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลา



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของ ln(MR) กับระยะเวลาในการอบแห้ง



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่และอุณหภูมิอบแห้งตามสมการของ Arrhenius

3.3. สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของอัตราส่วนความชื้น กับเวลาการอบแห้ง ดังรูปที่ 5 จะสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนที่เงื่อนไขขอบแห้งต่างๆ ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (9) จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 3.80×10^{-8} - 6.18×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนั้นข้อมูลในรูปที่ 6 สามารถวิเคราะห์เพื่อเขียนความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิอบแห้งตามรูปแบบสมการที่ (10) โดยได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$D_{\text{eff}} = 1.64 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{22.48}{RT}\right) \quad (11)$$

สมการที่ (11) เป็นสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิอบแห้ง โดยมีค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) เท่ากับ 22.48 กิโลจูลต่อโมล และค่าคงที่อาร์เรเนียส (arrhenius factor) เท่ากับ 1.64×10^{-4} ตารางเมตรต่อวินาที และในส่วนของการนำสมการสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลไปประยุกต์ใช้งานนั้น สามารถประยุกต์ใช้โดย นำสมการที่ (11) กลับไปแทนค่าในสมการที่ (6) ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้งและเวลา ดังนั้น เมื่อเกิดการ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอบแห้ง ก็จะทำให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในแต่ละช่วงเวลาได้ อย่างไรก็ตาม สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลหรือ สมการที่ (11) ก็มีข้อจำกัดในการใช้ คือ ผลิตภัณฑ์ต้องเป็นปลานิลเส้นเท่านั้น จึงจะสามารถทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้แม่นยำ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน และหาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียสและความเร็วลม 1.5 เมตรต่อวินาที ผลจากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ประมาณร้อยละ 32 และ 21 ตามลำดับ นอกจากนี้ในส่วนของการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง พบว่าสมการ Two term สามารถทำนายผลจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด และในส่วนของการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลพบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 3.80×10^{-8} - 6.18×10^{-8} ตารางเมตรต่อวินาที

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาคารเพื่อการส่งออกและนำเข้า. 2552. ปลานิลดาวรุ่งดวงใหม่สินค้าประมงส่งออกของไทย, แหล่งที่มา <http://www.ryt9.com>.
- [2] สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] Junling, S., Zhongli, P., Tara, H.M., Delilah, W., Edward, H. and Don, O. 2008. Drying and quality characteristics of fresh and suar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. LWT-Food science and technology. 41: 1962-1972.
- [4] Kar, A. and Gupta, D. K. 2003. Air drying of osmosed button mushroom. Journal of Food Science and Technology. 40: 23-27.
- [5] Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion London : Oxford University Press.
- [6] Jena, S. and Das, H. 2007. Modeling for vacuum drying characteristics coconut presscake. Journal of Food Engineering. 79: 92-99.
- [7] Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J. and Rossello, C. 1996. Drying models for green peas. Food Chemistry. 55: 121-128.
- [8] Tagawa, A., Muramatsu, Y., Nagasuna, T., Yano, A., Imoto, M. and Murata, S. 2003. Water Absorption Characteristics of Wheat and Barley during Soaking. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers. 46 (2): 361-366.
- [9] Ahmet, K. and Orhan, A. 2009. An experimental study on drying kinetics of some herbal leaves, Energy Conversion and Management. 50 (1): 118-124.
- [10] Takahiro, O., Long, W., Takeo, S., Akio, T. 2008. Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. Journal of Food Engineering, 85(2): 303-308.
- [11] Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. Solar Energy. 59: 121-126.
- [12] 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. 66: 323-328.
- [13] Diamante, L. M., and Munro, P. A. 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar

drying of sweet potato slices. *Solar Energy*. 51: 271-276.

- [14] Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*. 26: 457-465.
- [15] Togrul, I.T. and Pehlivan, D. 2003. Modelling of drying kinetics of single apricot. *Journal of Food Engineering*. 58: 23-32.
- [16] Henderson, S. M. 1974. Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transactions of the ASAE*. 17: 1167-1168.