

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศร้อนไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนื้อปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส

A Study Effect of Hot Air Recirculating Ratio on Drying Behavior of Tilapia by Using a Hot Air Dryer Installed with Stainless Wire Mesh Porous Material

รตินันท์ เหลืออมพล^{1*} สังวาลย์ บุญจันทร์¹ คมเพ็ชร อินลา² และบัณฑิต กฤตาคม¹
Ratinun Luampon^{1*} Sungwan Bunchan¹ Kompet Inla² Bundit Krittakom¹

Received: February 28, 2019; Revised: June 10, 2019; Accepted: June 11, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศร้อนไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนื้อปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส เครื่องอบแห้งนี้จะเป็นการพัฒนาการอบแห้งโดยการทำงานร่วมกันระหว่างลมร้อนไหลเวียนกลับและวัสดุพรุนก่อนเข้าห้องอบแห้ง เงื่อนไขในการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ และความเร็วลมร้อนคงที่ 70 °C และ 2 m/s ตามลำดับ สัดส่วนของอากาศที่ไหลเวียนกลับ (C_{air}) เข้ามายังห้องอบแห้งเท่ากับ 0 40 60 และ 80 % ใช้เนื้อปลานิลเป็นวัสดุอบแห้ง และทำการเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองทุก ๆ 20 นาที จนกว่ามวลของเนื้อปลานิลคงที่ ในการศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งจะพิจารณาตัวแปรดังนี้ คือ ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) อัตราส่วนความชื้น (MR) อัตราการอบแห้ง (DR) และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) และสมการอบแห้งแบบชั้นบางได้ถูกนำเสนอเพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง จากการทดลองพบว่า DR และ M_d จะลดลงเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น และ DR จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า C_{air} เพิ่มขึ้นและค่า M_d สูง โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ระหว่าง 420 - 440 นาที และมีค่า DR สูงที่สุดเท่ากับ 0.22 kg_{water}/min

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

² คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

¹ Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima

² Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin Campus

* Corresponding Author E - mail Address: ratinun.lu@rmuti.ac.th

ค่า SEC จะลดลงเมื่อ C_{air} เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า C_{air} เท่ากับ 80 % จะสามารถลดค่า SEC ได้มากที่สุดถึง 49.60 % โดยมีค่า SEC ต่ำที่สุดคือ 3.14 MJ/kg_{water evaporated} ที่ $C_{air} = 80$ % สำหรับการศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดคือ สมการ Modified Midilli ซึ่งมีค่า R^2 มากกว่า 0.9964

คำสำคัญ : พฤติกรรมการอบแห้ง; อากาศไหลเวียนกลับ; สมการอบแห้งแบบชั้นบาง; วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลส; ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Abstract

This research aimed to study the effect of hot air recirculating ratio on behavior of tilapia drying by using a hot air dryer by installed with stainless wire mesh porous material. A present dryer was modified by co-operation of recirculating hot air and porous material at the inlet of drying chamber. In experiment, hot air temperature and velocity were maintained at 70 °C and 2 m/s respectively. Hot air recirculating ratio (C_{air}) was varied by 0, 40, 60, and 80 %. Tilapia sliced was used as a drying product and mass of tilapia was recorded at interval 20 min during drying process until saturated mass condition. In this study, parameters considered of investigate the drying behavior were: dry basis moisture content (M_d), moisture ratio (MR), drying rate (DR) and specific energy consumption (SEC). Thin layer drying models were also discussed in order to predict the drying behavior. From experimental result it was found that DR and M_d were decreased as increasing drying time. DR was increased with C_{air} and M_d . Drying time was varied between 420 - 440 min and the highest DR become 0.22 kg_{water}/min. SEC was decreased as C_{air} increased. The maximum reduction of SEC being 49.60 % was obtained at $C_{air} = 80$ %. The minimum SEC gave 3.14 MJ/kg_{water evaporated} at $C_{air} = 80$ %. For a study on thin layer drying models, the Modified Midilli model was most agreement with experimental result which R^2 was more than 0.9964.

Keywords: Drying Behavior; Hot Air Recirculating; Thin Layer Drying Model; Stainless Wire Mesh Porous Material; Specific Energy Consumption;

บทนำ

ปลานิลเป็นปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำจัดพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อาศัยอยู่ตามแม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ อ่างเก็บน้ำ หนองและบึงทั่วทุกภาคของประเทศ นอกจากนี้ปลานิลยังพบในประเทศจีน อินเดีย ศรีลังกา อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์อีกด้วย ปลานิลมีส่วนตัวแบนมีเกล็ดตามแนวเส้นข้างตัว ปลานิลถือเป็นปลาเศรษฐกิจที่หาง่ายในท้องถิ่นและคนไทยนิยมบริโภค 1 ใน 5 อันดับแรก คือ ปลานิล

ปลาช่อน ปลาดุก ปลาตะเพียน และปลาสวาย [1] ปลานิลนั้นมีลักษณะเด่นคือ สามารถเพาะเลี้ยงได้ในเกือบทุกภูมิภาคของโลก เจริญเติบโตเร็วและมีปัญหาเรื่องโรคน้อย ปัจจุบันความต้องการบริโภคปลานิลในตลาดโลก โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วนหนึ่งนั้นเนื่องมาจากปลานิลเป็นปลาเนื้อขาว จึงเป็นที่ต้องการในกลุ่มของผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ ประกอบกับเนื้อปลานิลมีรสชาติดี สามารถดัดแปลงไปเป็นวัตถุดิบที่ใช้ประกอบอาหารของหลาย ๆ ชาติ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับปลาเนื้อขาวชนิดอื่น ๆ จึงเหมาะต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบและนำมาแปรรูปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม ด้วยเหตุนี้จึงมีการแปรรูปปลานิลในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น สะดวกต่อการบริโภค โดยการทำแห้งปลานิลเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการแปรรูปปลานิลเช่นกัน สำหรับการทำให้แห้งผลิตผลทางการเกษตรนั้น วิธีที่ประชาชนส่วนใหญ่นิยมใช้คือการตากแห้งโดยใช้แสงแดด เพราะลงทุนน้อยแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการตากแห้งนานเนื่องจากมีอัตราการทำให้แห้งช้า ผลิตภัณฑ์ตากแห้งไม่สะอาด มีสัตว์หรือแมลงมารบกวน เมื่อสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย จะไม่สามารถทำการตากแห้งได้ และในปัจจุบันนี้ได้มีการใช้ห้องอบแห้งแบบลมร้อนมากขึ้น เพื่อให้มีอัตราการอบแห้งคงที่ สามารถอบแห้งได้ตลอดเวลา และยังสามารถป้องกันการปนเปื้อนได้ โดยในปี ค.ศ. 2012 Toomthong, P. et al. [2] ได้ศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนและหาสมการการอบแห้งขึ้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจนผลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ความเร็วลมร้อน 1.0 1.5 และ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 °C พบว่า อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมหรืออุณหภูมิอบแห้ง โดยอัตราการอบแห้งจะสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s

สำหรับประเทศไทยในระดับอุตสาหกรรมการอบแห้งส่วนใหญ่จะใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งให้ความร้อนกับขดลวดความร้อนและการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงแก๊สหรือชีวมวลเป็นหลัก ซึ่งมีการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก โดยงานวิจัยของ Kesai, S. et al. [3] ได้ทำการอบแห้งมันฝรั่งแผ่นด้วยการใช้เตาแก๊สแบบอินฟราเรด สามารถอบแห้งมันฝรั่งแผ่นได้ครั้งละ 50 kg มีเงื่อนไขความชื้นเริ่มต้น 650 %dry basis อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้าย 12.7 %dry basis ความเร็วลมภายในห้องอบแห้ง 0.5 m/s ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 °C ใช้เวลาในการอบแห้ง 5 4.5 และ 4 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งเฉลี่ย 7.75 8.50 และ 9.47 kg_{water}/hr และการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น คือ 3.46 3.81 และ 6.67 MJ/kg_{water, evap} ตามลำดับ โดยปัจจุบันการลดการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการอบแห้งกำลังเป็นที่นิยมศึกษาเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานให้คุ้มค่ามากที่สุด เช่นในงานวิจัยของ Duangjun, W. et al. [4] และ Luampon, R. and Krittacom, B. [5] ได้ศึกษาการอบแห้ง ปลานิลด้วยการใช้วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสมาวางขวางการไหลของลมร้อนเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่า วัสดุพูนที่ใช้สามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานลงได้มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) น้อยกว่าการอบแห้งที่ไม่ติดตั้งวัสดุพูน เนื่องจากวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนและช่วยส่งเสริมการแผ่รังสีความร้อนไปในสองทิศทาง [6] ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ทิศทางแรกเป็นการแผ่รังสีความร้อนกลับไปทำการอุ่นอากาศที่ไหลเข้ามาให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น และอีกทิศทางหนึ่งวัสดุพูนจะมีการแผ่รังสีความร้อนไปยังห้องอบแห้งจึงส่งผลให้กลไกการอบแห้งจะไม่มีเพียงแต่การพาความร้อนเท่านั้น [5] แต่เครื่องอบแห้งแบบนี้ยังมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการนำความร้อนของอากาศที่ออกจากเครื่องอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก [7]

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการอบแห้งกลับมาใช้ใหม่ Tipayawong, N. et al. [8] พบว่า การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการลดค่าใช้จ่ายในการอบแห้งแบบลมร้อนด้วยการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการใช้อากาศร้อนไหลเวียนกลับ ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น 29 % สามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายได้ 45 % และ 27 % ตามลำดับ แต่งานวิจัยดังกล่าว [8] ยังไม่มีการนำวัสดุพูนมาใช้งานร่วมกับการอบแห้ง ด้วยเหตุนี้คณะผู้ทำวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยการติดตั้งท่อลมร้อนให้มีการใช้อากาศร้อนไหลเวียนกลับเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพดังงานวิจัยของ Tipayawong, N. et al. มาร่วมกับการใช้ข้อดีของวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยของ Luampon, R. and Krittacom, B. นอกจากนี้ การศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางจะถูกนำเสนอเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งด้วย ดังนั้น เครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสจะถูกศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นของคณะผู้ประพันธ์เอง [5] โดยในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนลมร้อนไหลเวียนกลับที่ไหลผ่านวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนื้อปลานิลเป็นหลัก

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. การวิเคราะห์การอบแห้ง

ในงานวิจัยนี้การวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งใช้ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry Basis Moisture Content, M_d) อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) และอัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (1) - (3) [9]

$$M_d = \frac{w_t - d}{d} \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_d - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

$$DR = \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{w_t - w_{t-1}}{\Delta t} \quad (3)$$

โดยที่

M_d = ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (kg/kg_{dry basis})

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (kg/kg_{dry basis})

M_e = ความชื้นสมดุล (kg/kg_{dry basis})

MR = อัตราส่วนความชื้น

DR = อัตราการอบแห้ง (kg_{water}/min)

w_t = มวลของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่เวลา t ใด ๆ (kg)

d = มวลแห้งของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg)

Δt = ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล (min)

2. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คำนวณได้
ดังสมการที่ (4) และ (5) [10]

$$SEC = \frac{E_{fan} + E_{gas}}{m_{water, evap}} \quad (4)$$

$$E_{gas} = (LHV)(\dot{m}_{gas})(t) \quad (5)$$

โดยที่

SEC	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg _{water evaporated})
$m_{water, evap}$	=	ปริมาณน้ำที่ออกจากผลิตภัณฑ์อบแห้ง (kg _{water evaporated})
E_{fan}	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานของพัดลม (MJ)
E_{gas}	=	ความสิ้นเปลืองพลังงานแก๊ส (MJ)
LHV	=	ค่าความร้อนด้านต่ำของแก๊ส = 46.607 MJ/kg
$\dot{m}_{gas}$	=	อัตราการไหลของแก๊ส (kg/s)
t	=	เวลาอบแห้ง (s)

3. สมการอบแห้งแบบชั้นบาง

ในการอบแห้งแบบชั้นบางมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาการอบแห้งในหลายรูปด้วยกัน เช่น สมการ Two-Term Model สมการของ Henderson และ Pabis model หรือสมการของ Lewis Model เป็นต้น โดยอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ (2) ดังนั้นกราฟแสดงอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง

Name	Models	References
1. Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce, D. M. [11]
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page, G. E. [12]
3. Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	White, G. M. et al. [13]
4. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson, S. M. and Pabis, S. [14]
5. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul, I. T. and Pehlivan, D. [15]

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง (ต่อ)

Name	Models	References
6. Two-Term Model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson, S. M. [16]
7. Approximation of Diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-k a t)$	Yaldiz, O. et al. [17]
8. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang, C. Y. and Singh, R. P. [18]
9. Simplified Fick's Diffusion	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante, L. M. and Munro, P. A. [19]
10. Modified Page Equation-II	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$	Diamante, L. M. and Munro, P. A. [19]
11. Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli, A. et al. [20]
12. Modified Midilli	$MR = a \exp(-kt) + bt + c$	Charmongkolpradit, S. and Luampon, R. [21]

สำหรับการหาสมการอบแห้งแบบชั้นบางนั้น ในขั้นตอนการทดลองจะทำการอบแห้งจนกว่ามวลของวัสดุอบแห้งคงที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ [22] การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบางจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Non-linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้ง สมการที่มีค่า Correlation Coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced chi-square (χ^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) น้อยที่สุด ดังสมการที่ (6) - (8) จะเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปทำนายการอบแห้งนี้ ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

1. Correlation Coefficient (R^2)

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N [(MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{avg,exp}})(MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{avg,pre}})] \right]^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{avg,exp}})^2 \sum_{i=1}^N (MR_{\text{pre},i} - MR_{\text{avg,pre}})^2} \quad (6)$$

2. Reduced Chi-Square (χ^2)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{N - z} \quad (7)$$

3. Root Mean Square Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (8)$$

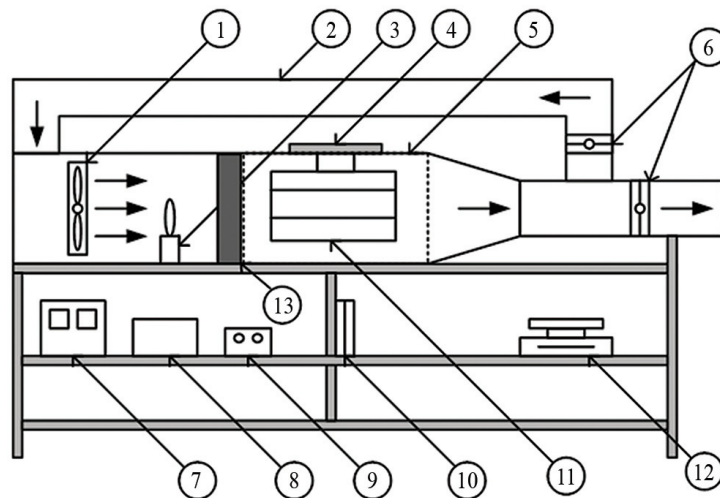
โดยที่

i	= ลำดับของค่า MR ที่พิจารณา
N	= จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ
z	= จำนวนของค่าคงที่ของแต่ละสมการ
MR_{exp}	= อัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลอง
MR_{pre}	= อัตราส่วนความชื้นจากผลการทำนาย
$MR_{avg,exp}$	= อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากผลการทดลอง
$MR_{avg,pre}$	= อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยจากผลการทำนาย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองได้สร้างเครื่องอบแห้งที่ทำมาจากแผ่นสังกะสีหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน มีขนาดกว้าง 25 cm ยาว 150 cm และสูง 25 cm ความร้อนที่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สทุ้งคัม ด้วยหัวพ่นไฟและใช้พัดลมเป็นอุปกรณ์ในการเป่าอากาศร้อนให้ไหลผ่านวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลส เกรด 304 ที่มีขนาดความพูน 8 PPI (Pore Per Inch) จำนวน 6 แผ่น (รูปที่ 1 หมายเลข 13) เพื่อให้เกิด การดูดซับความร้อนและเปล่งรังสีก่อนที่จะไหลเข้าไปยังห้องอบแห้งที่ทางออกของเครื่องอบแห้งมีท่อลมร้อน ให้อากาศไหลเวียนกลับไปยังทางเข้า (รูปที่ 1 หมายเลข 2) เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศที่ไหล เข้ามาใหม่ โดยใช้พัดลมช่วยในการดูดอากาศกลับและใช้วาล์วปีกผีเสื้อควบคุมปริมาณการไหลของอากาศ (รูปที่ 1 หมายเลข 6) สำหรับการกำหนดสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับจะใช้การวัดจากอุปกรณ์วัดความเร็วลมชนิด Hot Wire แล้วทำการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลเพื่อนำไปใช้แบ่งสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับระหว่าง ตำแหน่งท่อลมร้อนไหลเวียนกลับเทียบกับตำแหน่งทางออกของเครื่องอบแห้ง ซึ่งจะควบคุมสัดส่วน การไหลกลับโดยการเปิดปิดวาล์วปีกผีเสื้อให้ได้สัดส่วนตามที่คำนวณไว้ ภายในห้องอบแห้งจะประกอบไปด้วย ภาดอบแห้งที่ทำมาจากตาข่ายสแตนเลส และต่อเข้ากับโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อทำการวัดมวลของ ผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยจะทำการบันทึกมวลที่วัดได้ทุก 20 นาทีเข้าไปยัง Data Logger และนำข้อมูลที่ได้นำไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป อุปกรณ์ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย 1) พัดลม 2) ท่อลมร้อนไหลกลับ 3) หัวพ่นไฟ 4) โหลดเซลล์ 5) ห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด กว้าง 25 cm ยาว 150 cm สูง 25 cm 6) วาล์วเปิดปิดอากาศ 7) Data Logger 8) ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้า 9) ชุดปรับความเร็วลม 10) ชุดปรับอัตราการไหลของแก๊ส 11) ถาดรองผลิตภัณฑ์ 12) เครื่องชั่งน้ำหนัก และ 13) วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสเกรด 304



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

2. วิธีการทดลอง

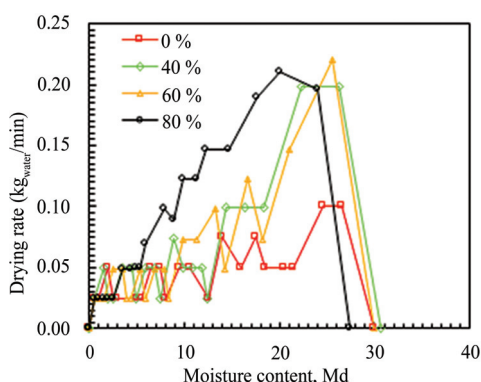
การทดลองนี้จะควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลมให้คงที่ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง คือ อุณหภูมิ 70 °C และความเร็ว 2 m/s [2] สัดส่วนของอากาศที่ไหลเวียนกลับ (C_{air}) เข้ามายังห้องอบแห้งผ่านท่อหมายเลข 2 ควบคุมปริมาณการไหลอากาศด้วยวาล์วควบคุมหมายเลข 6 ในสัดส่วน 0 % (ไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ) 40 60 และ 80 % ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งคือ เนื้อปลานิล โดยนำเนื้อปลานิลมาหั่นให้ได้ขนาดกว้าง 3 cm ยาว 3 cm และหนา 1 cm เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมร้อนได้ตามสภาวะที่ต้องการจะนำเนื้อปลานิลที่หั่นเตรียมไว้วางบนถาดอบแห้ง โดยไม่ให้เนื้อปลานิลซ้อนทับกัน เมื่อเริ่มกระบวนการอบแห้งมวลของเนื้อปลานิลจะถูกบันทึกเข้าไปใน Data Logger ในช่วงเวลาทุก 20 นาที จนกว่ามวลจะคงที่จึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ข้อมูลที่บันทึกได้จะนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

ผลการทดลอง

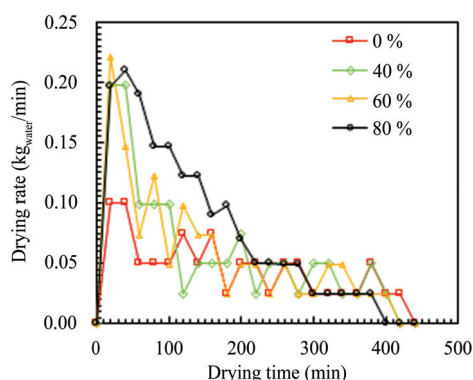
1. อิทธิพลของสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการอบแห้ง

ผลการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งที่ไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ ($C_{air} = 0\%$) และมีอากาศไหลเวียนกลับ (C_{air}) ที่สัดส่วน 40 60 และ 80 % อุณหภูมิลมร้อนคงที่ 70 °C ความเร็วลมร้อนคงที่ 2 m/s จากการทดลองพบว่า การอบแห้งโดยมีอากาศไหลเวียนกลับอัตราส่วนความชื้นจะลดลงเร็วกว่าไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ โดยค่า C_{air} เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) สูงขึ้นและอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) จะลดลง DR อัตราการอบแห้งจะสูงที่สุดเมื่อ C_{air} เท่ากับ 80 % และ DR จะสูงเมื่อปริมาณความชื้น (M_d) ภายในผลิตภัณฑ์อบแห้งสูง เนื่องจากน้ำสามารถระเหยออกมาได้ปริมาณที่มากและรวดเร็ว และอากาศที่ไหลเวียนกลับมาได้สูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งไประหว่างการอบแห้งแต่ยังมีปริมาณความร้อนหลงเหลือสะสมอยู่ และเมื่อไหลเวียนกลับมายังห้องอบแห้ง ผลิตภัณฑ์อบแห้งจึงได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อบแห้งจึงระเหยออกมาได้มากขึ้นอัตรา

การอบแห้งจึงสูงขึ้น ทำให้ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์สามารถลดลงได้อย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นได้ชัดในช่วง 150 นาทีแรกของการอบแห้งแสดงได้ดังรูปที่ 2 และอากาศที่ไหลเวียนกลับมายังพาปริมาณความชื้นกลับมามีด้วยส่วนหนึ่งแต่ไม่ส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้งเนื่องจากความเร็วอากาศที่ใช้ในการอบแห้งสูงและเป็นการอบแห้งแบบระบบเปิดที่มีอากาศจากภายนอกมาผสมก่อนที่จะไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง จึงทำให้ปริมาณความชื้นสามารถถ่ายเทออกจากห้องอบแห้งได้สะดวก



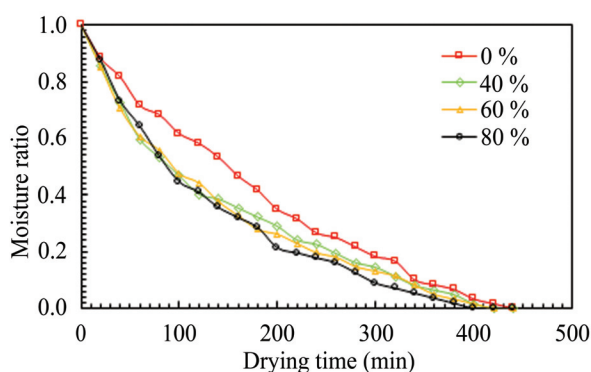
(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับปริมาณความชื้น



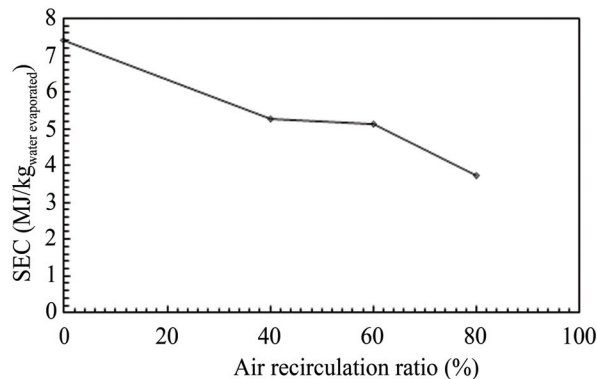
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งกับเวลาอบแห้ง

รูปที่ 2 อิทธิพลของสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับที่ส่งผลต่ออัตราการอบแห้ง ปริมาณความชื้น และเวลาอบแห้ง

จากผลการทดลองในรูปที่ 3 แสดงอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้ง พบว่าสัดส่วนของอากาศไหลเวียนกลับ C_{air} เท่ากับ 0 % ใช้เวลาอบแห้ง 440 นาที และ C_{air} เท่ากับ 80 % ใช้เวลาอบแห้ง 420 นาที ซึ่งจากข้อมูลอบแห้งแล้วระยะเวลาจะแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการอบแห้งมากที่สุดคือ อุณหภูมิและความเร็วอากาศ ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดให้อุณหภูมิและความเร็วอากาศคงที่เท่ากันทุกการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าในการทดลองนี้สัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับจะส่งผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าระยะเวลาการอบแห้ง (Drying Time)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งของเนือปลานิล



รูปที่ 4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้ง

การศึกษาค่า SEC ผลการทดลองจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งที่ไม่มีอากาศไหลเวียนกลับและมีอากาศไหลเวียนกลับ จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งแบบมีอากาศไหลเวียนกลับมีค่า SEC ต่ำกว่าแบบไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ โดยสัดส่วนของอากาศไหลเวียนกลับเพิ่มขึ้นทำให้ค่า SEC ลดต่ำลง มีผลการทดลองดังนี้ การอบแห้งที่ C_{air} เท่ากับ 0 40 60 และ 80 % มีค่า SEC เท่ากับ 7.42 5.26 5.12 และ 3.14 MJ/kg_{water evaporated} ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้อากาศไหลเวียนกลับ C_{air} เท่ากับ 80 % จะสามารถประหยัดพลังงานลงได้สูงถึง 49.60 % เนื่องจากเมื่ออากาศร้อนไหลเข้ามายังห้องอบแห้งอีกครั้ง อากาศยังหลงเหลือพลังงานความร้อนอยู่ จึงเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนกับอากาศที่ไหลเข้ามาใหม่ทำให้อากาศใหม่มีอุณหภูมิสูงขึ้น (Pre-Heat) จึงทำให้การสิ้นเปลืองพลังงานลดลงได้

2. การวิเคราะห์สมการอบแห้งแบบชั้นบาง

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปหาสมการการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยใช้สมการในตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น (MR) กับเวลาการอบแห้ง (t) โดยใช้วิธี Non-Linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายการอบแห้งนี้ จากนั้นนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง โดยสมการที่มีค่า Correlation Coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced Chi-Square (χ^2) และ Root Mean Square Error (RMSE) น้อยที่สุดจะเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปทำนายพฤติกรรมการอบแห้งนี้ [6] ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าสมการ Modified Midilli เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งนี้มากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 χ^2 และ RMSE ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.99780-0.99860 χ^2 เท่ากับ 0.00002-0.00014 และ RMSE เท่ากับ 0.00370-0.01075

ตารางที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการอบแห้งแบบชั้นบาง

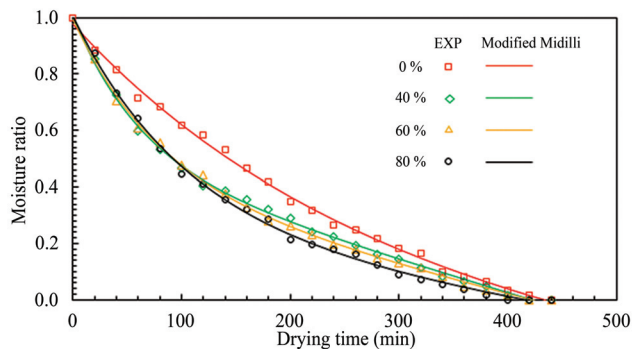
Models	Correlations	Air Recirculation Ratios (C_{air})			
		0 %	40 %	60 %	80 %
Lewis	R^2	0.98240	0.98640	0.99160	0.99480
	χ^2	0.00219	0.00111	0.00070	0.00055
	RMSE	0.04577	0.03252	0.02581	0.02288
Page	R^2	0.98800	0.98760	0.99190	0.99460
	χ^2	0.00112	0.00012	0.00003	0.00005
	RMSE	0.03204	0.01036	0.00482	0.00685
Modified Page	R^2	0.98240	0.98640	0.99160	0.99480
	χ^2	0.00112	0.00012	0.00003	0.00005
	RMSE	0.03204	0.01036	0.00482	0.00685
Henderson and Pabis	R^2	0.97990	0.98730	0.99230	0.99450
	χ^2	0.00015	0.00011	0.00005	0.00001
	RMSE	0.01182	0.00996	0.00681	0.00298
Logarithmic	R^2	0.99780	0.98900	0.99430	0.99700
	χ^2	0.00204	0.00019	0.00023	0.00033
	RMSE	0.04208	0.01286	0.01425	0.01682
Two-term model	R^2	0.99020	0.98920	0.99300	0.99450
	χ^2	0.00073	0.00051	0.00040	0.00031
	RMSE	0.02455	0.02059	0.01815	0.01600
Approximation of diffusion	R^2	0.98240	0.98910	0.99300	0.99480
	χ^2	0.00102	0.00001	0.00000	0.00002
	RMSE	0.03048	0.00296	0.00108	0.00403
Wang and Singh	R^2	0.99640	0.97050	0.97820	0.98360
	χ^2	0.00251	0.00280	0.00242	0.00219
	RMSE	0.04784	0.05059	0.04697	0.04471
Simplified Fick's diffusion	R^2	0.97990	0.98730	0.99230	0.99450
	χ^2	0.00213	0.00227	0.00222	0.00216
	RMSE	0.04307	0.04443	0.04393	0.04338
Modified Page equation-II	R^2	0.98800	0.98760	0.99190	0.99460
	χ^2	0.00075	0.00048	0.00013	0.00033
	RMSE	0.02554	0.03820	0.00908	0.00541
Midilli	R^2	0.99790	0.99640	0.99840	0.99810
	χ^2	0.00114	0.00079	0.00063	0.00037
	RMSE	0.03066	0.02549	0.02274	0.01759
Modified Midilli	R^2	0.99780	0.99830	0.99860	0.99830
	χ^2	0.00002	0.00014	0.00007	0.00002
	RMSE	0.00370	0.01075	0.00782	0.00434

เมื่อนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของสมการ Modified Midilli ไปเขียนเส้นโค้งการอบแห้งเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง ($MR_{\text{experiment}}$) กับค่าที่ทำนายได้จากสมการของ Modified Midilli ($MR_{\text{Modified Midilli}}$) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 จากนั้นจะนำรูปแบบของสมการ Modified Midilli ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a b c และ k ดังแสดงในตารางที่ 3 มาสร้าง

สมการเพื่อใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่อยู่ในรูปของตัวแปร C_{air} และ t โดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยพหุ (Multiple Regression) ผลที่ได้จากการคำนวณจะเป็นสมการออบแท้งแบบชั้นบางสำหรับใช้คำนวณหาอัตราส่วนความชื้นในการอบแท้งเนื้อปลานิลที่อุณหภูมิ 70 °C ความเร็วอากาศ 2 m/s และค่า C_{air} เท่ากับ 0 - 80 % โดยรูปแบบของสมการและค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้สร้างขึ้นแสดงได้ดังสมการที่ (9) - (13)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การอบแท้งของสมการ Modified Midilli

C_{air} (%)	a	k	b	c
0	0.96140	0.00415	-0.00044	0.01809
40	0.52540	0.01571	-0.00113	0.46736
60	0.54740	0.01549	-0.00102	0.43613
80	0.72940	0.01127	-0.00061	0.23432



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง ($MR_{\text{experiment}}$) กับค่าที่ทำนายได้จากสมการของ Modified Midilli ($MR_{\text{Modified Midilli}}$)

$$MR = a \exp(-kt) + bt + c \quad (9)$$

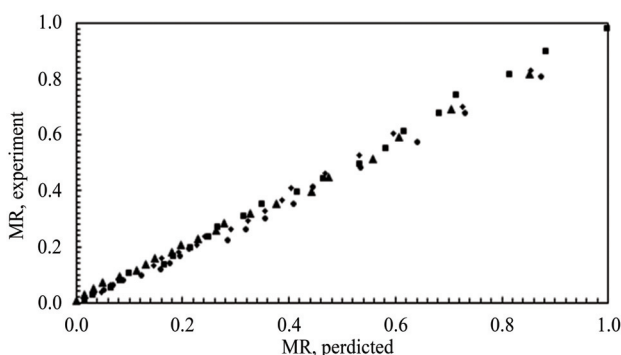
$$a = 2 \times 10^{-3} C_{air}^2 - 1.89 \times 10^{-2} C_{air} + 0.9614 \quad (10)$$

$$b = 3.77 \times 10^{-7} C_{air}^2 - 3.22 \times 10^{-5} C_{air} - 4.42 \times 10^{-4} \quad (11)$$

$$c = 2.13 \times 10^{-4} C_{air}^2 - 1.97 \times 10^{-2} C_{air} - 1.81 \times 10^{-2} \quad (12)$$

$$k = 5 \times 10^{-6} C_{air}^2 - 4.89 \times 10^{-4} C_{air} - 1.46 \times 10^{-3} \quad (13)$$

เมื่อนำสมการ Modified Midilli ที่อยู่ในรูปของ C_{air} และ t จากสมการที่ (9) - (13) มาแทนด้วยค่า C_{air} ที่ใช้ในการทดลองจริง คือ C_{air} เท่ากับ 0 40 60 และ 80 % เพื่อแสดงความแม่นยำในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่สมการสามารถคำนวณได้ โดยนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงและแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายและผลการทดลองจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6 โดยรูปแบบของสมการ Modified Midilli ที่สร้างขึ้นมีค่า R^2 มากกว่า 0.9964 เมื่อเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากสมการ Modified Midilli (สมการที่ (9) - (13)) และผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการอบแห้งเนื้อปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายสเตนเลสพบว่า การอบแห้งแบบมีอากาศไหลเวียนกลับทำให้อัตราส่วนความชื้น (MR) จะลดลงเร็วกว่าแบบไม่มีอากาศไหลเวียนกลับ โดยสัดส่วนอากาศไหลเวียนกลับ (C_{air}) เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้ง (DR) สูงขึ้นและ MR จะลดลง และ DR จะสูงที่สุดเมื่อใช้ C_{air} เท่ากับ 80 % โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะอยู่ระหว่าง 420 - 440 นาที และมี DR สูงที่สุดเท่ากับ 0.22 kg_{water}/min ในการวิเคราะห์ด้านการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่า การอบแห้งแบบใช้อากาศไหลเวียนกลับจะมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ต่ำกว่าแบบไม่ใช้อากาศไหลเวียนกลับ และเมื่อค่า C_{air} เพิ่มขึ้นทำให้ค่า SEC มีค่าต่ำลง โดยมีผลการทดลองดังนี้ C_{air} เท่ากับ 0 40 60 และ 80 % มีค่า SEC เท่ากับ 7.42 5.26 5.12 และ 3.14 MJ/kg_{water evaporated} ตามลำดับ ซึ่งพบว่า C_{air} เท่ากับ 80 % จะสามารถประหยัดพลังงานได้สูงที่สุดเท่ากับ 49.60 % เมื่อเทียบกับไม่ใช้อากาศไหลเวียนกลับ ($C_{air} = 0$ %) สำหรับการวิเคราะห์สมการอบแห้งแบบข้างบน พบว่าสมการ Modified Midilli เป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งนี้มากที่สุด โดยรูปแบบของสมการ Modified Midilli ที่สร้างขึ้นมีค่า R^2 มากกว่า 0.9964 เมื่อเทียบกับผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ที่ให้เงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2562 โดยโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตามสัญญาเลขที่ NKR2562REV006 และขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ช่วยสนับสนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

References

- [1] Thaloengrach, N., Anupong, E., Supawan, T., and Yutthana, T. (2012). Drying of Air Dried Sheet Rubber Using Hot Air Dryer and Solar Dryer for Small Entrepreneurs and Small Rubber Cooperatives. **Burapha Science Journal**. Vol. 17, No. 2, pp. 50-59 (in Thai)
- [2] Toomthong, P., Teeboonma, U., Somsila, P., and Homchampa, T. (2012). Study on Drying Behavior of *Tilapia nilotica* Using Hot Air. **Agricultural Science Journal**. Vol. 43, 3 (Suppl.) pp. 115-118 (in Thai)
- [3] Kesai, S., Kumwan, R., and Chotivisarut, N. (2012). **A Potato Chips Dryer Using Infrared Gas Stove**. A Thesis for The Degree of Master. Mechanical Engineering. Rajamangala University of Technology Lanna (in Thai)
- [4] Duangjun, W., Tunme, S., Cheangsanoi, J., Krittacom, B., and Pongkun, J. (2012). A Study on Tilapia Drying with Hot Air Combine Porous Media. In **7th Engineering Science Technology and Architecture Conference 2012**. Dusit Princess Korat, Nakhon Ratchasima, Thailand. pp. 475-479 (in Thai)
- [5] Luampon, R. and Krittacom, B. (2016). Study Drying Kinetic of Tilapia using Hot Air Flowing through the Porous Media. In **13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium**. Udonthani, Thailand. pp. 325-327.
- [6] Jugjai, S. and Polmart, N. (2003). Enhancement of Evaporation and Combustion of Liquid Fuels Through Porous Media. **Experimental Thermal and Fluid Science**. Vol. 27, pp. 901-909. DOI: 10.1016/S0894-1777(03)00062-1
- [7] Luampon, R. (2018). Thin Layer Drying Model of Carrot Using a Heat Pump Vacuum Dryer. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**. Vol. 28, No. 1, pp. 147-155 (in Thai)
- [8] Tipayawong, N., Tantakitti, C., Thavornun, S., and Peerawanitkul, V. (2009). Energy Conservation in Drying of Peeled Longan by Forced Convection and Hot Air Recirculation. **Biosystems Engineering**. Vol. 104, Issue 2, pp. 199-204. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.018
- [9] Paengkanya, S., Soponronnarit, S. and Nathakaranakule, A. (2015). Application of Microwaves for Drying of Durian Chips. **Food and Bioproducts Processing**. Vol. 96, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.fbp.2015.06.001
- [10] Baker, C. G. J. (2005). Energy Efficient Dryer Operation-an Update on Developments. **Drying Technology**. Vol. 23, Issue 9-11, pp. 2071-2087. DOI: 10.1080/07373930500210556

- [11] Bruce, D. M. (1985). Exposed-Layer Barley Drying, Three Models Fitted to New Data Up to 150 C. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Vol. 32, pp. 337-347
- [12] Page, G. E. (1949). **Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. M.S. thesis. Department of Mechanical Engineering. Purdue University, Purdue, USA
- [13] White, G. M., Ross, I. J., and Ponekert, R. (1981). Fully Exposed Drying of Popcorn. **Transactions of the ASAE**. Vol. 24, pp. 466-468
- [14] Henderson, S. M. and Pabis, S. (1961). Grain Drying Theory II Temperature Effects on Drying Coefficients. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Vol. 6, pp. 169-174
- [15] Togrul, I. T. and Pehlivan, D. (2002). Mathematical Modeling of Solar Drying of Apricots in thin Layers. **Journal of Food Engineering**. Vol. 55, pp. 209-216. DOI: 10.1016/S0260-8774(02)00065-1
- [16] Henderson, S. M. (1974). Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. **Transactions of ASAC**. Vol. 17, pp. 1167-1172
- [17] Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H. I. (2001). Mathematical Modeling of Thin Layer Solar Drying of Sultana Grapes. **Energy**. Vol. 26, Issue 5, pp. 457-465. DOI: 10.1016/S0360-5442(01)00018-4
- [18] Wang, C. Y. and Singh, R. P. (1978). Use of Variable Equilibrium Moisture Content in Modeling Rice Drying. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. Vol. 11, pp. 668-672
- [19] Diamante, L. M. and Munro, P. A. (1991). Mathematical Modeling of Hot Air Drying of Sweet Potato Slices. **International Journal of Food Science and Technology**. Vol. 26, Issue 1, pp. 99-108. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1991.tb01145.x
- [20] Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. (2002). A New Model for Single Layer Drying. **Drying Technology**. Vol. 20, Issue 7, pp. 1503-1513. DOI: 10.1081/DRT-120005864
- [21] Charmongkolpradit, S. and Luampon, R. (2017). Study of Thin Layer Drying Model for Cassava Pulp. **Energy Procedia**. Vol. 138, pp. 354-359. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.138
- [22] Akgun, N. A. and Doymaz, I. (2005). Modeling of Olive Cake Thin-Layer Drying Process. **Journal of Food Engineering**. Vol. 68, Issue 4, pp. 455-461. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2004.06.023