

การศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางสำหรับการอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวัสดุพรุนชนิดตาข่าย

A Study of Thin Layer Drying Model for Hot Air Drying with Wire Mesh

Porous Media

รตินันท์ เหลือมพล^{1*}, โสภณ สีนสร้าง¹, พรสวรรค์ ทองใบ¹, สักวาญ์ บุญจันทร์¹ และ ณรงค์ศักดิ์ โยธา²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

² สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: luampon@gmail.com, 08-4030-7600

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางโดยใช้การอบแห้งแบบลมร้อนร่วมกับวัสดุพรุนชนิดตาข่าย เพื่อนำสมการที่ได้ไปทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น ในการทดลองใช้เนื้อปลานิลเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับอบแห้ง มีขนาด $3 \times 3 \times 1$ cm³ มวลอบแห้งเริ่มต้น 0.5 kg อุณหภูมิลมร้อน 70 °C และความเร็วลมร้อน 2 m/s โดยลมร้อนจะไหลผ่านตาข่ายสแตนเลสที่มีค่าความพรุนหรือจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้ว (Pores per inch, PPI) เท่ากับ 8 PPI ในแต่ละการทดลองใช้จำนวนชั้นของตาข่ายต่างกันคือ จำนวน 2 4 และ 6 ชั้น สำหรับถาดอบแห้งจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโหลดเซลล์เพื่อวัดมวลของเนื้อปลานิลและเก็บข้อมูลทุก 5 นาที จนกว่ามวลของเนื้อปลานิลคงที่จึงหยุดกระบวนการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนความชื้นในเนื้อปลานิลจะลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น และเวลาในการอบแห้งจะลดลงเมื่อจำนวนชั้นของตาข่ายเพิ่มขึ้น โดยจำนวนชั้นของตาข่ายเท่ากับ 6 ชั้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด และจากการวิเคราะห์สมการการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Regression) พบว่าสมการ Two-term model สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งเนื้อปลานิลได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด

คำหลัก: สมการอบแห้งแบบชั้นบาง; การอบแห้ง; อัตราส่วนความชื้น; ปลานิลอบแห้ง; วัสดุพรุนตาข่าย

Abstract

This research was purpose to study on thin layer drying model of hot air drying with wire mesh porous media for predict moisture ratio of drying product. In experiment, tilapia was a drying product. It was sliced at size $3 \times 3 \times 1$ cm³ and initial drying mass as 0.5 kg. Hot air temperature was maintained at 70 °C, velocity at 2 m/s and flow through wire mesh stainless porous media at constant porosity as 8 PPI (pores per inch) and wire mesh stainless layers as 2, 4, and 6 layers. Drying tray was connected with load cell to indicated mass of tilapia sliced and collected mass at interval 5 minute until mass not change, the drying process was finish. From experimental result, moisture ratio was decreased

with increased drying time and drying time was decreased with increased wire mesh layers. For wire mesh layers = 6, drying time was faster. From thin layer drying model analysis result by using non-linear regression method it was found the Two-term model was good agreement with experimental data to predict moisture ratio of tilapia drying.

Keywords: Thin layer drying model; Drying; Moisture ratio; Tilapia drying; Wire mesh porous media.

1. บทนำ

ปลานิลเป็นปลาที่อาศัยอยู่ในน้ำจัดพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปลานิลนั้นมีลักษณะเด่นคือสามารถเพาะเลี้ยงได้ในเกือบทุกภูมิภาคของโลก เจริญเติบโตเร็วและมีปัญหาเรื่องโรคน้อย ปัจจุบันความต้องการบริโภคปลานิลในตลาดโลก โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วนหนึ่งนั้นเนื่องมาจากปลานิลเป็นปลาเนื้อขาว จึงเป็นที่ต้องการในกลุ่มของผู้บริโภคที่ใส่ใจในสุขภาพ ประกอบกับเนื้อปลานิลมีรสชาติดี สามารถดัดแปลงไปเป็นวัตถุดิบที่ใช้ประกอบอาหารของหลายๆ ชาติ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับปลาเนื้อขาวชนิดอื่นๆ จึงเหมาะต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบและนำมาแปรรูปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม ด้วยเหตุนี้จึงมีการแปรรูปปลานิลในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นสะดวกต่อการบริโภค โดยการทำแห้งปลานิลเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ยิยมใช้ในการแปรรูปปลานิลเช่นกัน [1] ในปี 2555 ตุ่มทองและคณะ [2] ได้ศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนและหาสมการการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมสำหรับทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งปลานิล โดยการทดลองอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ ความเร็วลมร้อน 1.0 1.5 และ 2.0 m/s และอุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 °C พบว่าอัตราการอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของปลานิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วลมหรืออุณหภูมิอบแห้ง โดยอัตราการอบแห้งจะสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 70 °C และความเร็วลมร้อน 2.0 m/s นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบางพบว่าสมการของ Two term สามารถทำนายผลการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อนได้ดีที่สุด

ในการทำแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร วิธีที่ประชาชนส่วนใหญ่ใช้คือการตากแห้งโดยใช้แสงแดด เพราะลงทุนน้อยแต่ต้องใช้ระยะเวลาในการตากแห้งนาน ผลิตภัณฑ์ตากแห้งไม่สะอาด มีสัตว์หรือแมลงมารบกวน เมื่อสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวยก็ไม่สามารถทำการตากแห้งได้ ดังนั้นการอบแห้งด้วยลมร้อนจึงเป็นการทำแห้งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ ซึ่งในปัจจุบันเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนส่วนใหญ่จะใช้ความร้อนจากขดลวดความร้อนและการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงแก๊สหรือชีวมวล จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยการประยุกต์ใช้ตาข่ายสแตนเลสที่มีความหนาหลายๆ ชั้น มาวางขวางทิศทางการไหลของลมร้อน เพื่อใช้เป็นตัวกักเก็บพลังงานความร้อนและจะทำให้เกิดการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนได้ เนื่องจากตาข่ายสแตนเลสเป็นวัสดุพหุชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติดูดซับและแผ่รังสีความร้อน ลมร้อนที่ได้จึงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและใช้เชื้อเพลิงน้อยลง [3-6]

โดยการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของจำนวนชั้นตาข่ายสแตนเลสสำหรับกระบวนการอบแห้งแบบลมร้อนมีผู้ทำการศึกษาวิจัยน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นตาข่ายสแตนเลสที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนความชื้นและศึกษาสมการอบแห้งแบบชั้นบางเพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นสำหรับกระบวนการอบแห้งนี้

2. สมการออบแท้งแบบชั้นบาง

ในการทดสอบการออบแท้งผลผลิตทางการเกษตร มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาการออบแท้งในหลายรูปด้วยกัน ส่วนใหญ่จะเป็นสมการแบบชั้นบาง เช่น สมการ Page สมการ Two-term สมการ Henderson สมการ Logarithmic หรือสมการ Lewis เป็นต้น โดยค่าอัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากสมการที่ 1 ดังนั้นกราฟแสดงอัตราส่วนความชื้นของ

ผลิตภัณฑ์ออบแท้งจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปแบบของสมการ ดังแสดงในตารางที่ 1

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

โดยที่

MR = อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M = ความชื้นขณะเวลาใด ๆ (% , d.b.)

M_e = ความชื้นสมดุล (% , d.b.)

M_0 = ความชื้นเริ่มต้น (% , d.b.)

ตารางที่ 1 รูปแบบสมการการออบแท้งแบบชั้นบาง

Name	Model	References
1. Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Bruce [7]
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page [8]
3. Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	White [9]
4. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis [10]
5. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul and Pehlivan [11]
6. Two-term model	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Henderson [12]
7. Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-k a t)$	Yaldiz et al. [13]
8. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh [14]
9. Simplified Fick's diffusion	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante and Munro [15]
10. Modified Page equation-II	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$	Diamante and Munro [15]
11. Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al. [16]

สำหรับการทดลองนี้เป็นการศึกษาสมการการออบแท้งแบบชั้นบางและจะทำการออบแท้งจนกว่ามวลของผลิตภัณฑ์ออบแท้งคงที่ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ [17]

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการการออบแท้งแบบชั้นบางจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Non-linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการ

ทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น สมการที่มีค่า Correlation coefficient (R^2) มากที่สุด ค่า Reduced chi-square (χ^2) และ Root mean square error (RMSE) น้อยที่สุดจะเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับนำไปทำนายการออบแท้งนี้ ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. Correlation coefficient (R^2)

2. Reduced chi-square (χ^2)

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

3. Root mean square error (RMSE)

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

โดยที่

i = ลำดับที่

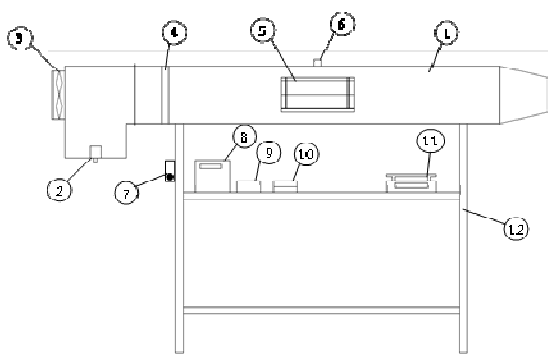
N = จำนวนของค่า MR ที่ได้บันทึกผลการทดลอง

z = จำนวนของค่าคงที่ของแต่ละสมการ

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองได้สร้างเครื่องอบแห้งที่ทำมาจากแผ่นสังกะสีหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนมีขนาด กว้าง 25 cm ยาว 150 cm และสูง 25 cm ความร้อนที่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สด้วยหัวพ่นไฟและใช้พัดลมเป็นอุปกรณ์ในการเป่าอากาศร้อนให้ไหลผ่านชั้นของตาข่ายสแตนเลสแล้วไหลเข้าไปยังห้องอบแห้ง ภายในห้องอบแห้งจะประกอบไปด้วยถาดอบแห้งที่ทำมาจากตาข่ายสแตนเลสและถูกต่อเข้ากับโหลดเซลล์ (Load cell) เพื่อทำการวัดมวลของผลิตภัณฑ์ ระหว่างกระบวนการอบแห้ง โดยจะทำการบันทึกมวลที่วัดได้ทุก 5 นาทีเข้าไปยัง Data logger และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป อุปกรณ์ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง

ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ห้องอบแห้งทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาดกว้าง 25 cm ยาว 150 cm สูง 25 cm 2) หัวพ่นไฟ 3) พัดลม 4) ช่องใส่ตาข่าย 5) ถาดรองผลิตภัณฑ์ 6) โหลดเซลล์ 7) ชุดปรับอัตราการไหลของแก๊ส 8) Data logger 9) ชุดปรับความเร็วลม 10) ตัวแปลงแรงดันไฟฟ้า 11) เครื่องชั่งน้ำหนัก 12) ขาตั้ง

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้จะควบคุมอุณหภูมิอากาศร้อนและความเร็วลมให้คงที่ (ตำแหน่งที่ 2) ก่อนที่จะไหลผ่านชั้นตาข่ายสแตนเลสแล้วไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง คือ อุณหภูมิ 70 °C และความเร็ว 2 m/s [2] สำหรับลักษณะของตาข่ายสแตนเลสจะใช้ตาข่ายที่มีจำนวนของช่องว่างต่อหนึ่งนิ้วคือ PPI=8 [18] และใช้จำนวนของชั้นตาข่ายสแตนเลส 3 ค่าคือ 2 4 และ 6 ชั้น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการอบแห้งคือ เนื้อปลานิล โดยนำเนื้อปลานิลมาหั่นให้ได้ขนาดกว้าง 3 cm ยาว 3 cm และหนา 1 cm เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมร้อนได้ตามสภาวะที่ต้องการจะนำเนื้อปลานิลที่หั่นเตรียมไว้วางบนถาดอบแห้งโดยไม่ให้เนื้อปลานิลซ้อนทับกัน กำหนดให้มวลเริ่มต้นของเนื้อปลานิลเท่ากันทุกการทดลองคือ 0.5 kg เมื่อเริ่มกระบวนการอบแห้งมวลของเนื้อปลานิลจะถูกบันทึกเข้าไปใน data logger ในช่วงเวลาทุก 5 นาที จนกว่ามวลจะคงที่จึงสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง ข้อมูลที่บันทึกได้จะนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

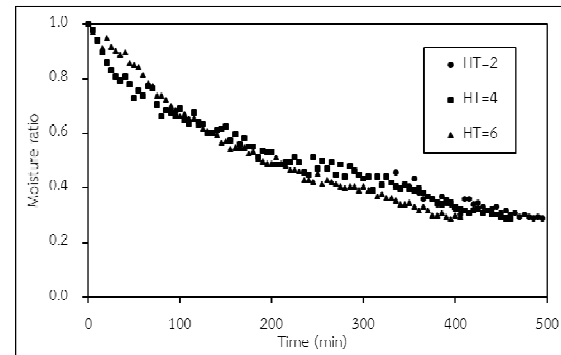
4. ผลการทดลอง

จากการทดลองโดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 70 °C ความเร็วลมร้อน 2 m/s จำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้วของตาข่ายสแตนเลส PPI=8 และใช้จำนวนของชั้นตาข่ายสแตนเลส 3 ค่าคือ 2 4 และ 6 ชั้น บันทึกมวลของผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้งทุก 5 นาที จนกว่ามวลคงที่จึงหยุดกระบวนการอบแห้ง จากผลการทดลองพบว่าจำนวนชั้นของตาข่ายสแตนเลสมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งคือ เมื่อใช้

จำนวนชั้นตาข่ายสแตนเลสมากขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนความชื้นลดลง และจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อย ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อเวลาในการอบแห้งมากกว่า 100 นาที เนื่องจากตาข่าย สแตนเลสจะเริ่มดูดซับความร้อนและแปลงรังสีได้มากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิอากาศที่ไหลผ่านชั้นตาข่ายเข้าไปสู่ห้องอบแห้งสูงขึ้น อัตราส่วนความชื้นจึงลดลง แสดงได้ดังรูปที่ 2

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปหาสมการอบแห้งแบบชั้นบาง โดยใช้สมการในตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาการอบแห้งโดยใช้วิธี Non-linear Regression และนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายได้ของแต่ละสมการไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยใช้ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติเป็นเกณฑ์ในการเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าอัตราส่วน

ความชื้นสำหรับการอบแห้งนี้ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองเทียบกับจำนวนชั้นของตาข่ายสแตนเลสและเวลาอบแห้ง

ตารางที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 11 สมการ

Model	Correlation	HT=2	HT=4	HT=6
Lewis	R^2	0.94670	0.95030	0.98530
	χ^2	0.00326	0.00294	0.00074
	RMSE	0.05681	0.05397	0.02709
Page	R^2	0.98390	0.98340	0.99220
	χ^2	0.00049	0.00050	0.00031
	RMSE	0.02202	0.02219	0.01752
Modified Page	R^2	0.94670	0.95030	0.98530
	χ^2	0.00329	0.00298	0.00075
	RMSE	0.05681	0.05397	0.02709
Henderson and Pabis	R^2	0.96670	0.96940	0.98670
	χ^2	0.00104	0.00094	0.00055
	RMSE	0.03186	0.03027	0.02322
Logarithmic	R^2	0.97600	0.86430	0.99460
	χ^2	0.00074	0.04082	0.00022
	RMSE	0.02678	0.19876	0.01469

ตารางที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการอบแห้งแบบชั้นบางทั้ง 11 สมการ (ต่อ)

Model	Correlation	HT=2	HT=4	HT=6
Two-term model	R^2	0.98590	0.98690	0.99480
	x^2	0.00044	0.00041	0.00022
	RMSE	0.02061	0.01975	0.01440
Approximation of diffusion	R^2	0.97370	0.97580	0.99410
	x^2	0.00122	0.00108	0.00024
	RMSE	0.03461	0.03251	0.01524
Wang and Singh	R^2	0.95020	0.95030	0.99030
	x^2	0.00244	0.00237	0.00043
	RMSE	0.04895	0.04812	0.02047
Simplified Fick's diffusion	R^2	0.96670	0.96940	0.98670
	x^2	0.00105	0.00095	0.00056
	RMSE	0.03186	0.03027	0.02322
Modified Page equation-II	R^2	0.98390	0.57240	0.99220
	x^2	0.00050	0.00558	0.00032
	RMSE	0.02202	0.07346	0.01752
Midilli	R^2	0.98590	0.98650	0.99430
	x^2	0.00045	0.00042	0.00024
	RMSE	0.02087	0.02004	0.01501

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของสมการ Two term model เมื่อจำนวนชั้นของตาข่ายต่างกัน

Model	HT	a	k_0	b	k_1
Two term model	2	0.81039	0.00209	0.19495	0.03653
	4	0.82751	0.00221	0.18304	0.04401
	6	0.51578	0.00161	0.49400	0.00703

จากตารางที่ 2 เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ทางสถิติของสมการแบบชั้นบางทั้ง 11 สมการ ซึ่งได้จากการนำผลการคำนวณค่าระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง (MR, experiment) มาเปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายได้จาก

สมการแบบชั้นบาง (MR, predict) พบว่ารูปแบบของ Two term model มีค่าความสัมพันธ์ทางสถิติดีที่สุด ใน 11 สมการนี้ ดังนั้นในการศึกษานี้ Two term model จึงเป็นรูปแบบสมการที่สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อปลานิลได้ใกล้เคียงกับผล

การทดลองมากที่สุด โดยค่าคงที่ของ Two term model (a , b , k_0 , k_1) เมื่อจำนวนชั้นของตาข่ายต่างกันแสดงได้ในตารางที่ 3

จากนั้นจะนำรูปแบบของ Two term model มาพัฒนาใหม่เพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นที่อยู่ในฟังก์ชันของเวลาและจำนวนชั้นของตาข่ายสแตนเลส โดยใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอย (Regression) ซึ่งจะทำให้ค่าคงที่ a , b , k_0 และ k_1 จะอยู่ในเทอมของค่า HT ผลที่ได้แสดงได้ดังสมการที่ 2 และผลการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นของสมการที่ 2 กับผลที่ได้จากการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3 สำหรับสมการที่พัฒนาขึ้นนี้จะนำไปใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นในช่วงของค่า $HT=2-6$ ชั้นเท่านั้น และต้องใช้เงื่อนไขในการอบแห้งเช่นเดียวกับการทดลองนี้

$$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad R^2 > 0.98 \quad (2)$$

โดยที่

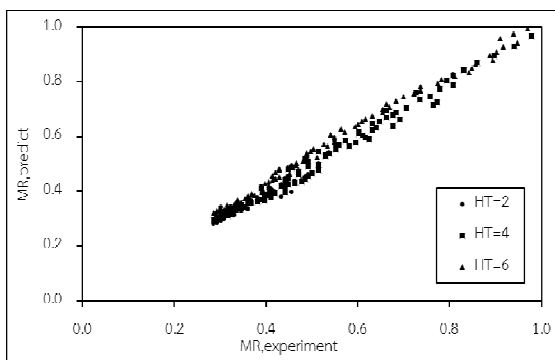
$$a = -0.0411HT^2 + 0.2552HT + 0.4644$$

$$b = 0.0404HT^2 - 0.2481HT + 0.5297$$

$$k_0 = -9 \times 10^{-5} HT^2 + 0.0006HT + 0.0013$$

$$k_1 = -0.0056HT^2 + 0.0371HT - 0.0154$$

HT = จำนวนชั้นของตาข่ายสแตนเลส



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายของ Two term model กับผลที่ได้จากการทดลอง

5. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นตาข่ายสแตนเลสที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งเนื้อปลา จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้จำนวนชั้นของตาข่ายสแตนเลสเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราส่วนความชื้นในผลิตภัณฑ์อบแห้งมีค่าลดลงและทำให้เวลาในการอบแห้งลดลงเช่นกัน เนื่องจากตาข่ายสแตนเลสมีความสามารถในการดูดซับความร้อนและเปล่งรังสี เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านจึงทำให้อุณหภูมิอากาศที่ใช้ออบแห้งสูงขึ้น โดยจำนวนชั้นเท่ากับ 6 ชั้น จะใช้เวลาในการอบแห้งเร็วที่สุด

การศึกษาสมาการอบแห้งแบบชั้นบางพบว่า Two term model สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด โดย Two term model ที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความเชื่อมั่น $R^2 > 0.98$ สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าอัตราส่วนความชื้นในช่วงของค่า $HT=2-6$ ชั้น และต้องใช้เงื่อนไขในการอบแห้งเช่นเดียวกับการทดลองนี้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ช่วยสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Luampon, R., Teelakulpisut, S. and Artnaseaw, A. (2012). Thin layer drying of carrot slices by heat pump vacuum dryer, Advance Science Letters, vol. 19(11), November 2012, pp. 3342-3345.
- [2] ประทีป ตุ่มทอง อำไพศักดิ์ ทิบุญมา ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และ ธนกร หอมจำปา (2555). การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งปลานิลด้วยลมร้อน, วารสารงานวิจัยวิทยาศาสตร์เกษตร, 43(3), หน้า 115-118.



- [3] Mital, R., Gore, J. and Viskanta, R. (1997). A study of the struck of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners, *Combustion and Flame*, vol. 111, pp. 175-184.
- [4] Krittacom, B. and Kamiuto, K. (2009). Radiation emission characteristics of an open-cellular porous burner, *Journal of Thermal Science*, vol. 4, pp 13-24.
- [5] Paengkanya, S., Soponronnarit, S. and Nathakaranakule, A. (2015). Application of microwaves for drying of durian chips, *Food and Bioproduct Processing*, vol. 96, pp. 1-11.
- [6] Baker, C.G.J. (2005). Energy efficient dryer operation-an update on developments, *Drying Technology*, vol. 23, pp. 2071-2087.
- [7] 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.
- [8] Page, G.E. (1949). Factors influencing the maximum rate so of air drying shelled corn in thin layers, M.S. thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA.
- [9] White, G.M., Ross, I.J. and Ponekert, R. (1981). Fully exposed drying of popcorn, *Transactions of the ASAE*, vol. 24, pp. 466-468.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation, *Transactions of ASAC*, vol. 17, pp. 1167-1172.
- [13] Yaldiz, O., Ertekin, C. and Uzun, H.I. (2001). Mathematical modeling of Thin layer solar drying of sultana grapes, *Energy*, vol. 26(5), pp. 457-465.
- [14] 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.
- [15] 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, pp. 99-108.
- [16] Midilli, A., Kucuk, H. and Yapar, Z. (2002). A new model for single layer drying, *Drying Technology*, vol. 20(7), pp. 1503-1513.
- [17] Akgun, N.A. and Doymaz, I. (2005). Modeling of olive cake thin-layer drying process, *Journal of Food Engineering*, vol. 68, pp. 455-461.
- [18] Luampon, R. and Krittacom B. (2016). Study Drying Kinetic of Tilapia using Hot Air Flowing through the Porous Media, paper presented in 13th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Udonthani, Thailand.