

การทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัล และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

Prediction of hot air drying behavior using an empirical model and artificial neural network model

ปฐวีติ วรามิตร^{*} นันทวัฒน์ วีระยุทธ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 โทร 0-4535-3309 โทรสาร 0-4535-3308 Email: vandal_me@windowslive.com

Pathiwat Waramit^{*}, Nantawatana Weerayuth and Umphisak Teeboonma
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University
Warinchumrap District, Ubon Ratchathani Province, 34190 Tel: 0-4535-3309, Fax: 0-4535-3308,
Email: vandal_me@windowslive.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ ปลานิล และกล้วย ภายใต้อุณหภูมิอบแห้ง 60-80°C และความเร็วลม 0.5-1.0 m/s ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งที่ได้จากการทดลองมาทำนายและเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ผลจากการศึกษาพบว่า แบบจำลองเอมพีริคัล และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้แม่นยำ นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองเอมพีริคัล

คำสำคัญ : การอบแห้ง / แบบจำลองการอบแห้ง / โครงข่ายประสาทเทียม

Abstract

The objective of this research was to predict drying behavior of hot air drying using an empirical model (EM) and an artificial neural network model (ANNM). Tilapia and Banana were dried under drying temperature of 60-80°C and air velocity of 0.5-1.0 m/s. Subsequently, EM and ANNM were applied to describe the drying behavior of both products. Furthermore, prediction results

between EM and ANNM were compared with the experimental data.

In this research, it was obviously found that EM and ANNM can describe the drying behavior. Additionally, it was also found that prediction results of ANNM are good agreement with experimental results than that of EM.

Key words : Drying / Drying model / Artificial neural network

1. บทนำ

การอบแห้งคือกระบวนการลดความชื้นซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อมๆกัน [1] กระบวนการที่ซับซ้อนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ต่างกัน เช่น อุณหภูมิและความเร็วของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ ลักษณะทางกายภาพและความชื้นเริ่มต้นของวัสดุที่จะทำการอบแห้ง พื้นที่และความดันในการอบ [2] ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบจำลองกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสม [3] มีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกันจากนักวิจัยหลายกลุ่ม [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] นักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเพื่อกระบวนการอบแห้ง [11, 12, 13] ความสัมพันธ์สมการคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของวัสดุธรรมชาติ สมการเหล่านี้เน้นเฉพาะปัญหาที่มีความซับซ้อนไม่มากนัก เช่นสมการเอกซโปเนนเชียลอย่าง

แบบจำลองเอมพีริคัลส่วนใหญ่จะมีความแม่นยำเฉพาะผลการทดลองนั้นๆ แต่เมื่อเงื่อนไขเปลี่ยนไปแบบจำลองเอมพีริคัลที่ใช้จะเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขการทดลอง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้วิเคราะห์ตามหลักการของการถ่ายเทความร้อนและมวลสารโดยใช้สมการดิฟเฟอเรนเชียล แต่ผลลัพธ์สุดท้ายนั้นซับซ้อนและยากที่จะนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งจริง

จากเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) จึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาทางชีววิทยาและวิศวกรรมเคมี [14] โดยโครงข่ายประสาทเทียมนี้ถูกใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมกรอบแห้งของวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกัน เช่น *Echinacea angustifolia* [15] มันสำปะหลังและมะม่วง [16] แครอท [17, 18] โสม [19] และเพื่อนำเสนอให้เห็นถึงความสามารถของการแก้ปัญหาโดยโครงข่ายประสาทเทียม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งและเปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัล

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลกรอบแห้งด้วยลมร้อนที่ได้จากการทดลองมาทำนายและเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งโดยใช้แบบจำลองเอมพีริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ ปลายานิล และ กล้วย ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคือ อุณหภูมิอบแห้ง 60, 70 และ 80 °C และความเร็วลม 0.5, 0.7 และ 1.0 m/s ซึ่งสามารถสรุปเงื่อนไขการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขของการอบแห้งด้วยลมร้อน

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ(°C)	ความเร็วลม(m/s)
ปลายานิล, กล้วย	60	0.5
	60	0.7
	60	1.0
	70	0.5
	70	0.7
	70	1.0
	80	0.5
	80	0.7
	80	1.0

2.1 แบบจำลองเอมพีริคัลของการอบแห้ง

อัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งจากการทดลองคำนวณตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 1

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_t คือ ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (% dry basis)

M_e คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (% dry basis)

M_i คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (%dry basis)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองเอมพีริคัลมาทำการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 13 แบบจำลองเพื่อทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งโดยที่พฤติกรรมกรอบแห้งจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนความชื้น (MR) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาแสดงในตารางที่ 2 หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์หาแบบจำลองเอมพีริคัลที่เหมาะสมด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เพื่อหาค่าตัวแปรของแบบจำลอง และใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Root mean squared error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, r^2) เป็นดัชนีชี้วัดแบบจำลองเอมพีริคัลที่เหมาะสมโดย RMSE คำนวณได้จากสมการที่ 2

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

เมื่อ $MR_{pred,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายด้วยแบบจำลองเอมพีริคัล

$MR_{exp,i}$ คือ ค่าอัตราส่วนความชื้นจากข้อมูลการทดลอง

N คือ จำนวนของข้อมูล

ตารางที่ 2 แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้ง [20, 21]

ลำดับที่	ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page I	$MR = \exp(-(kt)^n)$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
6	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
7	Two term	$MR = a \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$
8	Two term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
9	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
10	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
11	Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
12	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$
13	Logistic	$MR = a / [1 + \exp(kt)]$

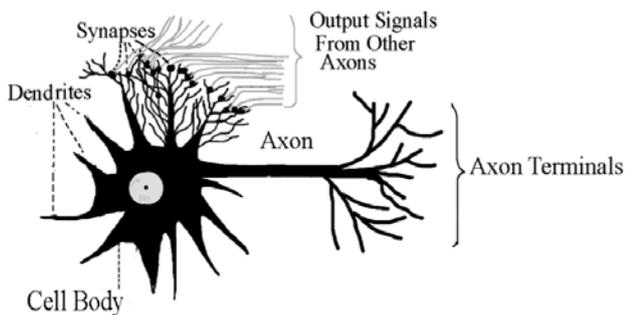
2.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

2.2.1 หลักการโครงข่ายประสาทเทียม

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) มักจะเรียกสั้น ๆ ว่า ข่ายงานประสาท (Neural network หรือ Neural net) คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณแบบคอนเนกชันนิสต์ (Connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ ด้วยวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือที่มีความสามารถในการเรียนรู้การจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) และการอุปมาความรู้ (Knowledge deduction)

เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาข่ายงานไฟฟ้าชีวภาพ (Bioelectric network) ในสมอง ซึ่งประกอบด้วย เซลล์ประสาท หรือ "นิวรอน" (Neurons) และจุดประสานประสาท (Synapses) แต่ละเซลล์ประสาทประกอบด้วยปลายในการรับกระแสประสาท เรียกว่า "เดนไดรต์" (Dendrite) ซึ่งเป็น input และปลายในการส่งกระแสประสาทเรียกว่า "แอกซอน" (Axon) ซึ่งเป็นเหมือน output ของเซลล์ เซลล์เหล่านี้ทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกัน กระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรต์เข้าสู่นิวเคลียสซึ่งจะเป็นตัวตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่น ๆ ต่อหรือไม่ ถ้ากระแสประสาทแรงพอ นิวเคลียสก็จะกระตุ้นเซลล์อื่น ๆ ต่อไปผ่านทางแอกซอนของมัน ตามโมเดลนี้ ข่ายงานประสาทเกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาท จนเป็นเครือข่ายที่ทำงานร่วมกันดังแสดงในรูปที่ 1

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเลียนแบบพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนสูงได้เป็นอย่างดี มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear) ในงานวิจัยนี้จึงได้นำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งด้วยลมร้อนของปลาแห้ง และกล้วย ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนของคุณสมบัติทางกล



รูปที่ 1 แบบจำลองเซลล์ประสาทในสมองมนุษย์

2.2.2 สถาปัตยกรรมโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

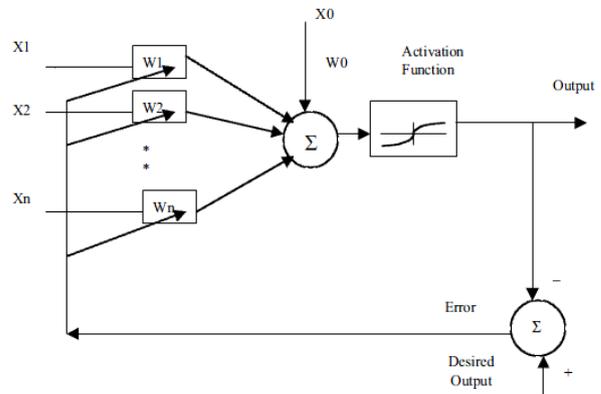
แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นป้อนไปข้างหน้า (Multilayer feed forward neural network) และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาควาดท์ (Levenberg-Maquardt 's Back-propagation) ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้ที่สุด [22] เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและใช้เวลาไม่นานในการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียม [23]

Back-propagation ยังเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่ยอมรับเพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างนิวรอนให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาจจะขึ้นกับความแตกต่างของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ ชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียมจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าคำตอบไม่ถูก วงจรข่ายก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2

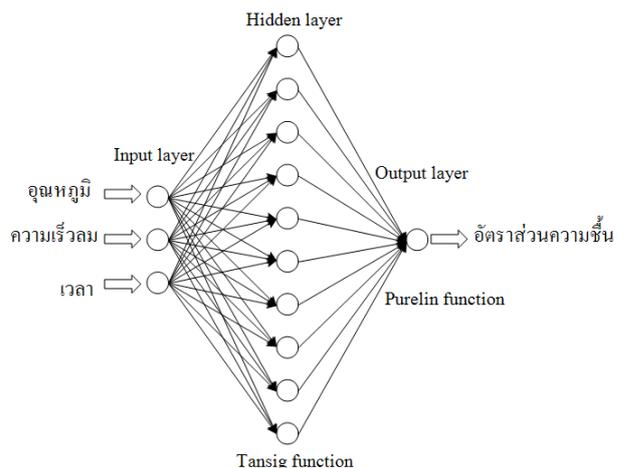
2.2.3 ข้อมูลนำเข้าและนำออกของโครงข่ายประสาทเทียม

งานวิจัยนี้ได้ใช้งานแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมผ่านกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network toolbox) ของซอฟต์แวร์ MATLAB โดยที่ข้อมูลนำเข้า (input) ของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย อุณหภูมิ, ความเร็วลม และเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ข้อมูลนำออก (output) ของโครงข่ายประสาทเทียมคืออัตราส่วนความชื้นของการอบแห้ง และมีจำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) ของโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งชั้นซ่อนมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 10 นิวรอน และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของโครงข่ายประสาทเทียมคือ Tansig function และ Purelin function ในชั้นซ่อน และชั้น output ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3

จากนั้นเปรียบเทียบผลการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับแบบจำลองเอมพีริคัลโดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของผลรวมของความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ในการเปรียบเทียบ



รูปที่ 2 กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับ



รูปที่ 3 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง

ข้อมูลจากการอบแห้งปลาแห้งและกล้วยด้วยลมร้อนจะนำมาใช้ฝึกหัดและทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้ง จากข้อมูลทั้งสิ้น 802 ชุดข้อมูลจากการอบแห้ง

ด้วยลมนรอนท้้ง 9 เงื่อนไข โดยที่ซุดข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกใช้เพื่อกการฝึกหัดแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและส่วนที่ เหลือจะใช้เพื่อกทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนาย พฤติกรรมการอบห้้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ 75 เปอร์เซนต์ของข้อมูลการ ออบห้้งจะถูกใช้เพื่อกฝึกหัดและอีก 25 เปอร์เซนต์ของข้อมูลการอบห้้ง จะใช้เพื่อกทดสอบการทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งของแบบจำลอง โครงข่ายประสาทเทียม

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการวิเคราะห์หาแบบจำลองเอมพีริคัลที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์การถดถอยเพื่อกหาแบบจำลองเอมพีริคัลที่ เหมาะสมสำหรับการทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งปลานิลและกล้วย ด้วยลมนรอนแสดงอยู่ในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (r^2) และค่า รากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนท้้งหมด (RMSE) เมื่อ เทียบกับข้อมูลการทดลองของแบบจำลองเอมพีริคัลท้้ง 13 แบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการอบห้้ง ปลานิลด้วยลมนรอน

ปลานิล		
ชื่อแบบจำลอง	r^2	RMSE
Newton	0.94040	0.12101
Page	0.94071	0.12154
Modified Page I	0.94071	0.12154
Henderson and Pabis	0.94043	0.12116
Wang and Singh	0.91281	0.13143
Logarithmic	0.94140	0.12124
Two term	0.94043	0.12116
Two term exponential	0.94084	0.12154
Modified Henderson and Pabis	0.94043	0.12116
Midilli	0.94144	0.11259
Approximation of diffusion	0.94140	0.12121
Verma et al.	0.94088	0.12162
Logistic	0.93821	0.12361

จากตารางที่ 3 พบว่าแบบจำลองของ Midilli มีความเหมาะสมมาก ที่สุดในการทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งปลานิลด้วยลมนรอนโดยมีค่า r^2 มากที่สุดเท่ากับ 0.94144 และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.11259

สำหรับการทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งกล้วยด้วยลมนรอน พบว่า แบบจำลองของ Logistic สามารถทำนายได้ดีที่สุดโดยมีค่า r^2 มากที่สุด เท่ากับ 0.95024 และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.09864 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองเอมพีริคัลสำหรับการอบห้้ง กล้วยด้วยลมนรอน

กล้วย		
ชื่อแบบจำลอง	r^2	RMSE
Newton	0.94385	0.10379
Page	0.94916	0.10316
Modified Page I	0.94916	0.10315
Henderson and Pabis	0.94523	0.09978
Wang and Singh	0.93619	0.12153
Logarithmic	0.94877	0.10482
Two term	0.94523	0.09978
Two term exponential	0.94385	0.11103
Modified Henderson and Pabis	0.94523	0.09978
Midilli	0.94985	0.10431
Approximation of diffusion	0.94969	0.10305
Verma et al.	0.94955	0.10517
Logistic	0.95024	0.09864

3.2 ผลการทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งโดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับแบบจำลองเอมพีริคัล

ผลการทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งปลานิลและกล้วยด้วยลมนรอน โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผล การทำนายพฤติกรรมกรอบห้้งโดยแบบจำลองเอมพีริคัล โดยใช้ค่า r^2 และค่า RMSE เป็นดัชนีชี้วัดดังแสดงในตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การอบห้้งปลานิลด้วยลมนรอน

ปลานิล			
แบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง	r^2	RMSE
เอมพีริคัล	Midilli	0.94144	0.11259
โครงข่ายประสาทเทียม	Multilayer feed forward back propagation	0.99984	1.38e-5

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์การอบห้้งกล้วยด้วยลมนรอน

กล้วย			
แบบจำลอง	ชื่อแบบจำลอง	r^2	RMSE
เอมพีริคัล	Logistic	0.95024	0.09864
โครงข่ายประสาทเทียม	Multilayer feed forward back propagation	0.99980	2.25e-5

จากตารางที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนาย พฤติกรรมกรอบห้้งโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีกว่า แบบจำลองเอมพีริคัล ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

มีจุดเด่นในการเรียนรู้ สังเคราะห์ ทำนายผลลัพธ์ของปัจจัยแบบมีความสัมพันธ์ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี และโครงข่ายประสาทเทียมยังสามารถปรับแต่งความรู้ที่ซ่อนอยู่ภายในเครือข่ายที่มีการต่อเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่น มีการส่งผ่านข้อมูลที่จะประมวลผลจากอินพุตไปยังเอาต์พุตแบบขนาน ดังนั้นการประมวลผลของโครงข่ายประสาทเทียมจึงเป็นไปอย่างแม่นยำและรวดเร็ว

4. บทสรุป

ผลจากการวิจัยการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งด้วยลมร้อนโดยใช้แบบจำลองเอมพีรีคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมพบว่าทั้งแบบจำลองเอมพีรีคัล และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งได้แม่นยำ โดยที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายได้แม่นยำกว่าแบบจำลองเอมพีรีคัล นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งผลิตภัณฑ์มากกว่าแบบจำลองเอมพีรีคัล

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Gogus, F., "The effect of movement of solutes on millard reaction during drying," Ph.D. Thesis, Leeds University, Leeds, 1994
2. Akpinar, E.K., Bicer, Y., Yildiz, C., "Thin layer drying of red pepper," *Journal of Food Engineering*, Vol. 59, pp. 99–104, 2003.
3. Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B., "Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying," *Journal of Food Engineering*, Vol. 58, pp. 277–283, 2003.
4. Passamai, V., Saravia, L., "Relationship between a solar drying model of red pepper and the kinetics of pure water evaporation I," *Drying Technology*, Vol. 15 (5), pp. 1419–1432, 1977a.
5. Passamai, V., Saravia, L., "Relationship between a solar drying model of red pepper and the kinetics of pure water evaporation II," *Drying Technology*, Vol. 15 (5), pp. 1433–1457, 1977b.
6. Midilli, A., Olgun, H., Ayhan, T., "Experimental studies of mushroom and pollen drying," *International Journal of Energy Research*, Vol. 23, pp. 1143–1152, 1999.
7. Sarsavadia, P.N., Sawhney, R.L., Pangavhane, D.R., Singh, S.P., "Drying behavior of brined onion slices," *Journal of Food Engineering*, Vol. 40, pp. 219–226, 1999.
8. Midilli, A., "Determination of pistachio drying behavior and conditions in a solar drying system," *International Journal of Energy Research*, Vol. 23, pp. 1143–1152, 2001.

9. Azzouz, S., Guizani, A., Jomaa, W., Belghith, A., "Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes," *Journal of Food Engineering*, Vol. 55, pp. 323–330, 2002.
10. Kaymak-Ertekin, F., "Drying and rehydrating kinetics of green and red peppers," *Journal of Food Science*, Vol. 67 (1), pp. 168–175, 2002.
11. Diamante, L.M., Munro, P.A., "Mathematical modeling of hot air drying of sweet potato slices," *International Journal of Food Science Technology*, Vol. 26, pp. 99–109, 1991.
12. Diamante, L.M., Munro, P.A., "Mathematical modeling of thin layer solar drying of sweet potato slices," *Solar Energy*, Vol 51, pp. 271–276, 1993.
13. Ratti, C., Mujumdar, A.S., "Solar drying of foods: modeling and numerical simulation," *Solar Energy*, Vol. 60, pp. 151–157, 1997.
14. Baughman, D.R., Liu, Y.A., "Neural Networks in Bio-Processing and Chemical Engineering," Academic Press, New York, 1995.
15. Erenturk, K., Erenturk, S., and Tabil, L.G., "A comparative study for the estimation of dynamical drying behavior of *Echinacea angustifolia* : regression analysis and neural network," *Computers and Electronic in Agriculture*, Vol. 45, pp. 71–90, 2004.
16. Hernandez-Perez, J.A., Garcia-Alvarado, M.A., Trystram, G., and Heyd, B., "Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, Vol. 5, pp. 57–64, 2004.
17. Kerr, W.L., Kerdpiroon, S., Devahastin, S., "Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content," *Food Research International*, Vol. 39, pp. 1110–1118, 2006.
18. Erenturk, S., Erenturk, K., "Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot," *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, pp. 905–912, 2007.
19. Martynenko, A.I., Yang, S.X., "Biologically inspired neural computation for Ginseng Drying rate," *Biosystems Engineering*, Vol. 95 (3), pp. 385–396, 2006.
20. Ruiz Celma, A., Rojas, S., and Lopez-Rodriguez, F., "Mathematical modeling of thin-layer infrared drying of wet olive husk," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 47, pp. 1810–1818, 2008.
21. Jain, D., Pathare, P.B., "Selection and Evaluation of Thin Layer Drying Models for Infrared Radiative and Convective Drying of Onion Slices," *Biosystems Engineering*, Vol. 89(3), pp. 289–296, 2004.
22. Movagharnejad, K., Nikzad, M., "Modeling of tomato drying using artificial neural network," *Computers and electronics in agriculture*, Vol. 59, pp. 78–85, 2007.

23. Hagan, M.T., Demuth, H.B., and Beals, M., "Neural Network Design," PWS Publishing Company, USA, 1996.