

# แบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียม

## Hot Air Combines with Electric Field Drying Model using Math Model and Artificial Neural Network

ปวิวัติ วรามิตร<sup>1</sup> นันทวัฒน์ วีระยุทธ์<sup>2</sup> อัมไพศักดิ์ ทัพญญา<sup>2</sup> โสภณ ลินสร้าง<sup>1</sup> และ บัณฑิต กฤตาคม<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.สุรนารายณ์ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

E-mail : pathiwat.wa@rmuti.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ คือ บอระเพ็ด ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคืออุณหภูมิอบแห้ง 50-70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม 0.5-1.5 เมตรต่อวินาที และความเข้มสนามไฟฟ้า 0.5-1.5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียม ผลจากการศึกษาพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งได้ โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นป้อนไปข้างหน้าซึ่งมีกระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาควาร์ดท์สามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งได้แม่นยำกว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์

**คำสำคัญ:** การอบแห้ง, สนามไฟฟ้า, แบบจำลองคณิตศาสตร์, โครงข่ายประสาทเทียม

### Abstract

The objective of this study was to predict drying moisture ratio of hot air combines with electric field drying using math model and artificial neural network. *Tinospora crispa* was dried under drying temperatures of 50-70°C, air velocities of 0.5-1.5 m/s and 0.5-1.5 kV/cm of electric field. Subsequently, math model and artificial neural network were applied to describe the drying moisture ratio of the product. Furthermore, prediction result of math model and artificial neural network were compared with the experimental data. In this research, it was obviously found that math model and artificial neural network model can describe the drying moisture ratio effectively. Additionally, it was also found that prediction results of Multilayer feed forward Levenberg-Maquardt's Back-propagation artificial neural network is good agreement with experimental results than math model.

**Keywords:** Drying, Electric field, Math model, Artificial neural network



## บทนำ

บอระเพ็ดเป็นไม้เลื้อยที่พบโดยทั่วไปตามป่าดิบแล้ง ป่าเบญจพรรณและสามารถปลูกได้ง่าย โดยที่บอระเพ็ดนั้นถือเป็นพืชสมุนไพรที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยมีสรรพคุณเป็นยาบำรุงสุขภาพ เป็นยาอายุวัฒนะ บำรุงกำลัง ช่วยขับน้ำย่อย ทำให้เจริญอาหาร การประยุกต์ใช้บอระเพ็ดเพื่อรับประทานเป็นสมุนไพรนั้นสามารถทำได้หลายวิธีทั้งการรับประทานแบบสด หรือรับประทานแบบแห้ง เช่น ใช้ดองน้ำผึ้งกินเป็นประจำเป็นยาอายุวัฒนะ กินแล้วร่างกายแข็งแรงไม่เจ็บป่วยง่าย ในผู้ป่วยเบาหวานพบว่าการกินร่วมกับยาแผนปัจจุบันสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลได้ดี [1] ด้วยเหตุนี้จึงมีการแปรรูปบอระเพ็ดในรูปแบบต่างเพื่อการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นและสะดวกต่อการใช้งาน โดยการอบแห้งบอระเพ็ดเป็นอีกวิธีการหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการแปรรูปบอระเพ็ดเช่นกัน

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีต้นทุนในการสร้างเครื่องที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ [2] เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนสามารถใช้แหล่งความร้อนได้หลายแหล่งที่ทำได้ง่ายเช่น ขดลวดความร้อน น้ำมันเชื้อเพลิง แอลพีจี(LPG) พลังงานแสงอาทิตย์ หรือความร้อนทิ้งจากกระบวนการต่างๆ ในโรงงาน สำหรับแหล่งความร้อนที่นิยมประยุกต์ใช้กับเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนมากที่สุดคือขดลวดความร้อน แต่เนื่องจากเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนต้องอาศัยการเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนผ่านขดลวดความร้อน ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้ามากในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ ทำให้มีต้นทุนสูง และใช้เวลามากในการอบแห้ง ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งลมร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น โดยใช้สนามไฟฟ้าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนการอบแห้ง ซึ่งสนามไฟฟ้าที่ใช้จะต้องได้มาจากแหล่งกำเนิดที่มีต้นทุนการผลิตสนามไฟฟ้าต่ำ ผลของสนามไฟฟ้าต่อผลิตภัณฑ์ แบ่งออกได้เป็น 2 ทาง คือ

ผลทางความร้อน (Thermal Effect) และผลทางด้านอื่นที่ไม่ใช่ทางความร้อน (Athermal Effect) [3] ซึ่งผลของสนามไฟฟ้าสามารถจะเข้าถึงเนื้อภายในผลิตภัณฑ์ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์และกำลังของสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกมา สนามไฟฟ้าจะมีประจุไฟฟ้า 2 ชนิด คือ ประจุบวก และประจุลบ เมื่อโมเลกุลของน้ำภายในผลิตภัณฑ์มีการแตกตัวจากการได้รับประจุไฟฟ้า ทำให้ส่วนที่เป็นอิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก และส่วนที่เป็นโปรตอนจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และโปรตอนจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น น้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับความร้อนก็จะระเหยเป็นไอน้ำออกไป จึงสามารถลดการใช้พลังงานความร้อนจากเครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนลงได้ และใช้เวลาในการอบแห้ง (Drying time) ที่สั้นลง เป็นผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ ในการพัฒนาเครื่องอบแห้งลมร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น โดยใช้สนามไฟฟ้าเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนการอบแห้ง

การทราบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบจำลองกระบวนการอบแห้งให้มีความเหมาะสม [4] ดังนั้นแบบจำลองคณิตศาสตร์ (math model) และโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural networks) จึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาทางชีววิทยาและวิศวกรรมเคมี [5] โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ และโครงข่ายประสาทเทียมนี้ถูกใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของการอบแห้งของวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกัน เช่น *Echinacea angustifolia* [6] มันสำปะหลังและมะม่วง [7] แครอท [8-9] โสม [10] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้า



## รายการสัญลักษณ์

MR	อัตราส่วนความชื้น
$M_t$	ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (% dry basis)
$M_0$	ปริมาณความชื้นสมดุล (% dry basis)
$M_i$	ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (%dry basis)
$MR_{pre.i}$	อัตราส่วนความชื้นที่ทำนายด้วยแบบจำลอง
$MR_{exp.i}$	อัตราส่วนความชื้นจากข้อมูลการทดลอง
N	จำนวนของข้อมูล
t	เวลาในการอบแห้ง (นาที)
a, b, c, g, h, k, n	ตัวแปรคงที่ของแบบจำลองคณิตศาสตร์
s	ผลรวมที่ได้จากฟังก์ชันผลรวม
$x_i$	ค่าข้อมูลเข้าตัวที่ i
$w_i$	ค่าน้ำหนักของนิเวรอนตัวที่ i
$\Delta w_{ji}$	ค่าปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักที่โหนด i และ j
$\eta$	อัตราการเรียนรู้
$\delta_j$	ค่าผลต่างระหว่างค่าจริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ในรูปอนุพันธ์ของ Transfer function ที่โหนด j
$\alpha$	ค่าโมเมนตัม
$y_j$	คือค่าผลลัพธ์ของแบบจำลองที่โหนด j
n	รอบการปรับแก้
z	จำนวนนิเวรอนชั้นข้อมูลเข้า
b	ค่าความโน้มเอียง
f	Transfer function

## ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองโดยเป็นการวัดค่าทุกๆ 5 นาที มาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง จากนั้นทำนายและเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียม โดยมีผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือ บอระเพ็ด ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้ง คือ อุณหภูมิอบแห้ง 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความเร็วลม

0.5 1.0 และ 1.5 เมตรต่อวินาที และความเข้มสนามไฟฟ้า 0.5 1.0 และ 1.5 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิและความเร็วลม คือ Thermo couple Type-K รุ่น NR-81530 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -50 ถึง 500 องศาเซลเซียส และ Anemometer Vane Type บันทึกรายข้อมูลด้วย SD Card รุ่น AM-4217SD ช่วงการวัดความเร็วลม 0.3-35 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ การอบแห้งทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ลดลงทุกๆ 5 นาที



จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น โดยการวัดค่าน้ำหนักที่ลดลงของผลิตภัณฑ์จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ TRANSCELL รุ่น FAD-5 (rate capacity 10 กิโลกรัม) ที่ติดตั้งไว้กับถาด (Tray) วางผลิตภัณฑ์เพื่อวัดค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ลดลงในทันทีโดยไม่ต้องนำออกมาชั่งอีกครั้งเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการวัด เมื่อผลิตภัณฑ์ถูกลมร้อนพัดผ่าน จะเกิดการระเหยของน้ำทำให้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลง และโหลดเซลล์จะทำการวัดค่าและส่งค่ามาที่ Data logger ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL800 (setting accuracy  $\pm 0.2\%$  of full scale) ในรูปของแรงดันไฟฟ้าในหน่วยมิลลิโวลต์ (mV) จากนั้นจึงทำการปรับเทียบค่าแรงดันไฟฟ้านั้นเป็นน้ำหนักในหน่วยกรัม (g)

ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำผลิตภัณฑ์ที่อบจนน้ำหนักคงที่แล้วไปอบในตู้อบความชื้นที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงเพื่อหาความชื้นสุดท้าย เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าได้แสดงไว้ (Figure 1)

### การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง และแบบจำลองคณิตศาสตร์

อัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 จากนั้นนำข้อมูลอัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง และเวลาในการอบแห้งมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาค่าตัวแปรของแบบจำลองคณิตศาสตร์

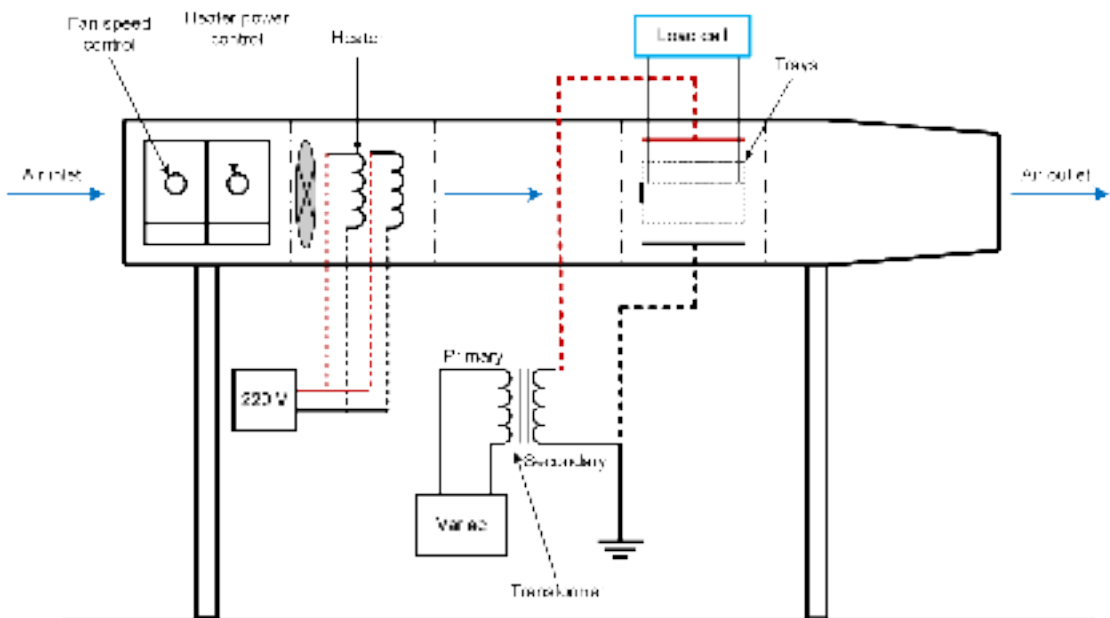


Figure 1. Drying model of the hot air combines with electric field [11]

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

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการวิเคราะห์ที่ใช้ข้อมูลอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจากการทดลองทั้งหมดเป็นข้อมูลป้อนเข้าของซอฟต์แวร์ Statistica ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางสถิติที่ช่วยวิเคราะห์การถดถอยด้วยวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จากนั้นนำค่าตัวแปรที่ได้มาแทนค่ากลับเพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นที่ทำนายโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมความคลาดเคลื่อนทั้งหมด (Root Mean Squared Error, RMSE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefcient of determination, r<sup>2</sup>) เป็นดัชนีชี้วัดแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมดังแสดงใน Figure 2 โดยที่ RMSE คำนวณได้จากสมการที่ 2

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

งานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองคณิตศาสตร์มาทั้งสิ้น 5 แบบจำลอง โดยที่แบบจำลองจะเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้ง(MR) ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของเวลาดังแสดงใน Table 1 และทำการวิเคราะห์เพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุดจาก 5 แบบจำลอง โดยดัชนีที่ใช้ชี้วัดคือค่า r<sup>2</sup> และค่า RMSE

### การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลสารสนเทศด้วยการคำนวณแบบคอนเนคชันนิสต์ (connectionist) เพื่อจำลองการทำงานของระบบเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ด้วยวัตถุประสงค์ที่จะสร้างเครื่องมือซึ่งมีความสามารถในการเรียนรู้ การจดจำรูปแบบ (pattern recognition) และการอุปมาความรู้ (knowledge deduction) เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ แนวคิดเริ่มต้นของเทคนิคนี้ได้มาจากการศึกษาข่ายงานไฟฟ้าชีวภาพ (bioelectric network) ในสมอง ซึ่งประกอบด้วย เซลล์ประสาท หรือ “นิวรอน” (neurons) และจุดประสานประสาท (synapses) แต่ละเซลล์ประสาทประกอบด้วยปลายในการรับกระแสประสาท เรียกว่า “เดนไดรต์” (dendrite) ซึ่งเป็น input

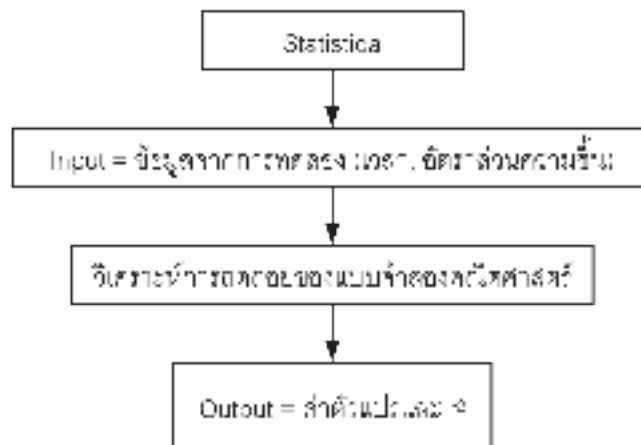


Figure 2. Regression analysis of mathematical model using Statistica software [12]



Table 1 Mathematical models for prediction of the moisture ratio in drying process [13]

No.	Model name	Model
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
3	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
4	Midilli	$MR = a \exp(-ktn) + bt$
5	Logistic	$MR = a / [1 + \exp(kt)]$

และปลายในการส่งกระแสประสาทเรียกว่า “แอกซอน” (axon) ซึ่งเป็นเหมือน output ของเซลล์ โดยที่เซลล์เหล่านี้จะทำงานด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี เมื่อมีการกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าภายนอกหรือกระตุ้นด้วยเซลล์ด้วยกันกระแสประสาทจะวิ่งผ่านเดนไดรต์เข้าสู่นิวเคลียสซึ่งจะเป็นตัว

ตัดสินใจว่าต้องกระตุ้นเซลล์อื่นๆหรือไม่ ถ้ากระแสประสาทแรงพอ นิวเคลียสก็จะกระตุ้นเซลล์อื่นๆ ต่อไปผ่านทางแอกซอนของมัน ตามหลักการนี้ข่ายงานประสาทจึงเกิดการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาท จนเป็นเครือข่ายที่ทำงานร่วมกัน (Figure 3)

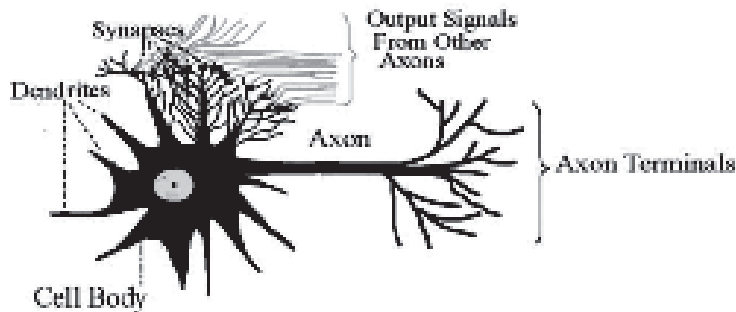


Figure 3. Artificial neural network in human [14]

โครงข่ายประสาทเทียม สามารถเลียนแบบพฤติกรรมที่มีความซับซ้อนสูงและมีความสามารถในการทำนายพฤติกรรมที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าของบอระเพ็ด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนทางจลนพลศาสตร์

โครงข่ายประสาทเทียมที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นป้อนไปข้างหน้า (multilayer feed forward neural network) และใช้กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่กระจายย้อนกลับของเลเวนเบิร์ก-มาควาดท์ (Levenberg-Maquardt's Back-Propagation) ซึ่งเป็นหนึ่งในโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้ที่สุด เนื่องจากเป็นโครงสร้าง

ที่ไม่ซับซ้อนและใช้เวลาไม่นานในการฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียม [15] Back-Propagation ยังเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อปรับค่าน้ำหนักในเส้นเชื่อมต่อระหว่างนิวรอนให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้นั้นขึ้นกับความแตกต่างของค่า

เอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3 ชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกหัดโครงข่ายประสาทเทียมจะมีคำตอบไว้คอยตรวจดูว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้คำตอบที่ถูกต้องหรือไม่ ถ้าคำตอบไม่ถูก วงจรข่ายก็จะปรับตัวเองเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้นดังแสดงใน Figure 4

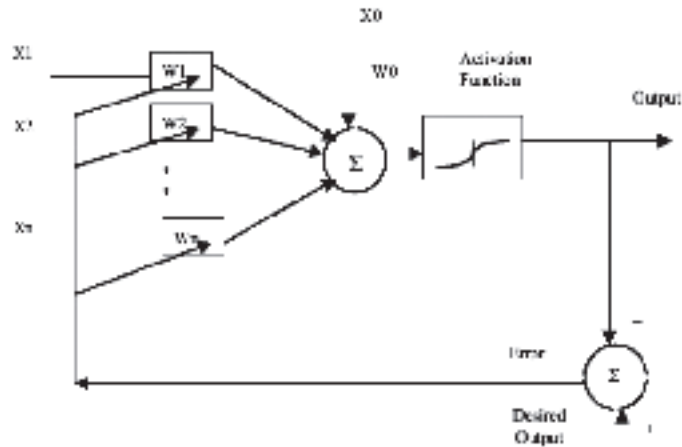


Figure 4. Learning system with back-propagation process [11]

$$\Delta w_{ji}(n+1) = \eta \delta(n) \cdot y_j(n) + \alpha \Delta w_{ji}(n) \quad (3)$$

งานวิจัยนี้ได้ใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมผ่านกล่องเครื่องมือโครงข่ายประสาทเทียม (neural network toolbox) โดยที่ข้อมูลอินพุต (input) ของโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย อุณหภูมิ ความเร็วลม เวลาและความเข้มสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง ข้อมูลเอาต์พุต (output) ของโครงข่ายประสาทเทียมคืออัตราส่วนความชื้นของการอบแห้ง และมีจำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) ของโครงข่ายประสาทเทียมหนึ่งชั้นซ่อนมีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน 10 นิวรอน และใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของโครงข่ายประสาทเทียมคือ tan sigmoid function และ pure linear function ในชั้นซ่อน และชั้น output ตามลำดับ [16] (Figure 5) โดยข้อมูลจากการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าจะนำมาใช้ฝึกหัด

และทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งการอบแห้ง จากข้อมูลทั้งสิ้น 864 ชุดข้อมูลจากการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าทุกเงื่อนไขการทดลอง โดยที่ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกใช้เพื่อการฝึกหัดแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและส่วนที่เหลือใช้เพื่อทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้ง การเรียนรู้ของนิวรอนเน็ตเวิร์คทำได้โดยการส่งข้อมูล เข้ามายังส่วนที่เรียกว่าเพอร์เซ็ปตรอน (Perceptron) ซึ่งสามารถเทียบได้กับเซลล์สมองของมนุษย์โดยที่เพอร์เซ็ปตรอนทำการรับข้อมูลที่อยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งเป็นตัวเลขเข้ามาคำนวณสำหรับฟังก์ชันผลรวม (Summation Function) มีการทำงานดังสมการที่ 4



$$s = \sum_{i=1}^z x_i w_i + b \quad (4)$$

และค่าเอพ็อกซ์ของแต่ละโหนดสามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^j x_i' w_i'\right) \quad (5)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ร้อยละ 75 ของข้อมูลการอบแห้ง ถูกใช้เพื่อฝึกหัดและอีกร้อยละ 25 ของข้อมูลการอบแห้ง ใช้เพื่อทดสอบการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นเปรียบเทียบผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียมกับอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งจากการทดลองโดยใช้ค่า RMSE และ  $r^2$  เป็นดัชนีชี้วัดในการเปรียบเทียบ

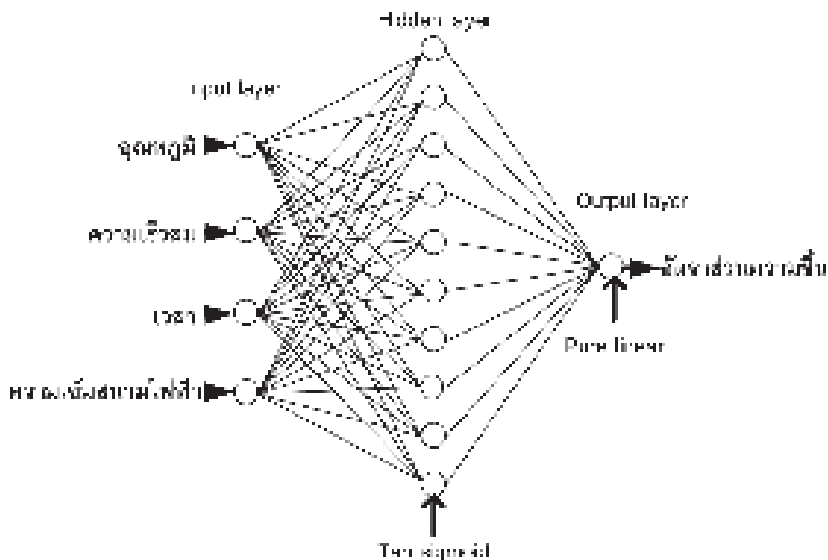


Figure 5. The used artificial neural network for determination of moisture ratio in drying process

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าโดยแบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยจะพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้ามากที่สุดก็คือ

แบบจำลองของ Logistic โดยมีค่า  $r^2$  มากที่สุดคือ 0.95137 และ RMSE น้อยที่สุดคือ 0.08852 (Table 2) ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าคงที่หรือสัมประสิทธิ์การแพร่จากแบบจำลองของ Logistic นั้นมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้ามากที่สุด





Table 2 Results of the analysis of mathematical models

Model	Variable	Variable value	$r^2$	RMSE
Newton	k	0.01330	0.94443	0.08942
Logarithmic	k	0.01202	0.94992	0.08906
	a	1.08117		
	c	-0.05949		
Modified Henderson and Pabis	k	0.01394	0.94655	0.08916
	g	0.01395		
	h	0.01398		
	a	0.34876		
	b	0.34876		
	c	0.34873		
Midilli	k	0.00595	0.95123	0.08892
	n	1.17235		
	a	0.98112		
	b	-0.00005		
Logistic	k	0.01900	0.95137	0.08852
	a	1.97029		

และเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์และโครงประสาทเทียม พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งได้แม่นยำกว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดย

มีค่า  $r^2$  มากกว่า และมีค่า RMSE น้อยกว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยมีค่า  $r^2$  เท่ากับ 0.99991 และ RMSE เท่ากับ 0.00381 ตามลำดับ (Figure 6-9)



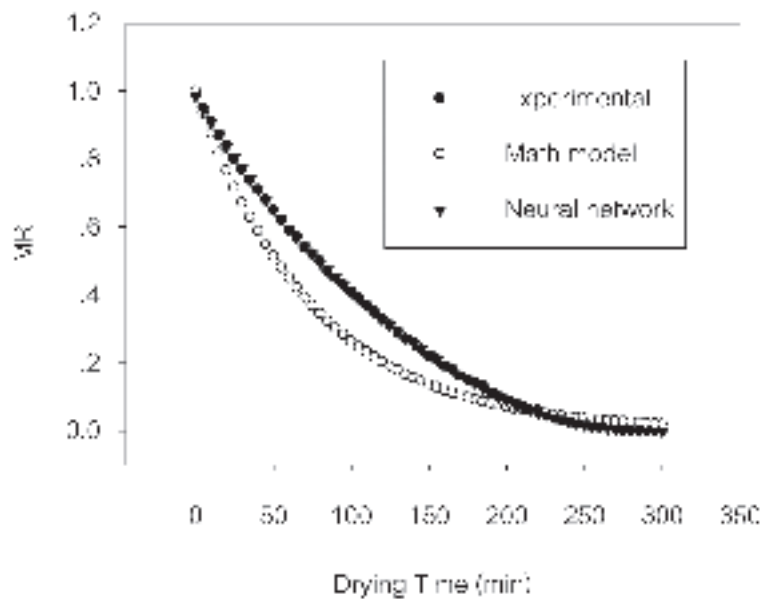


Figure 6. Results from the prediction of the moisture ratio at 50°C with air velocity and intensity of electric field values of 0.5 m/s and 0.5 kv/cm, respectively

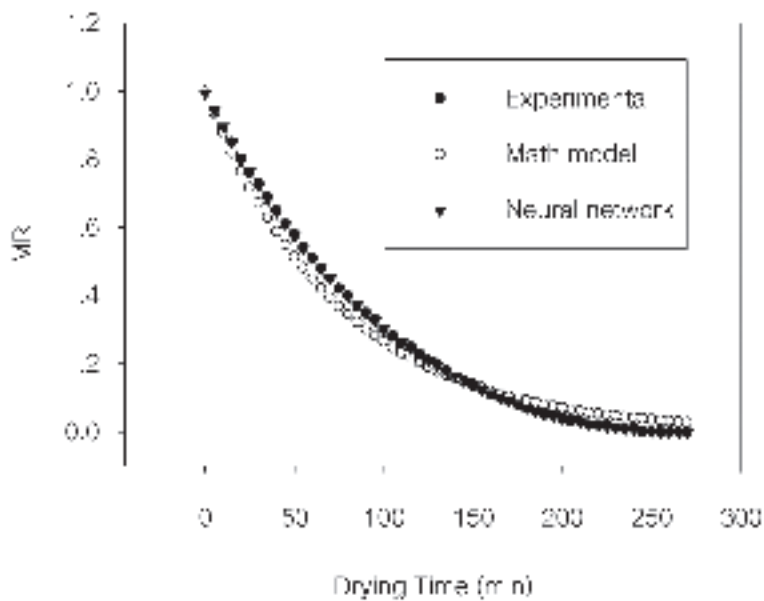
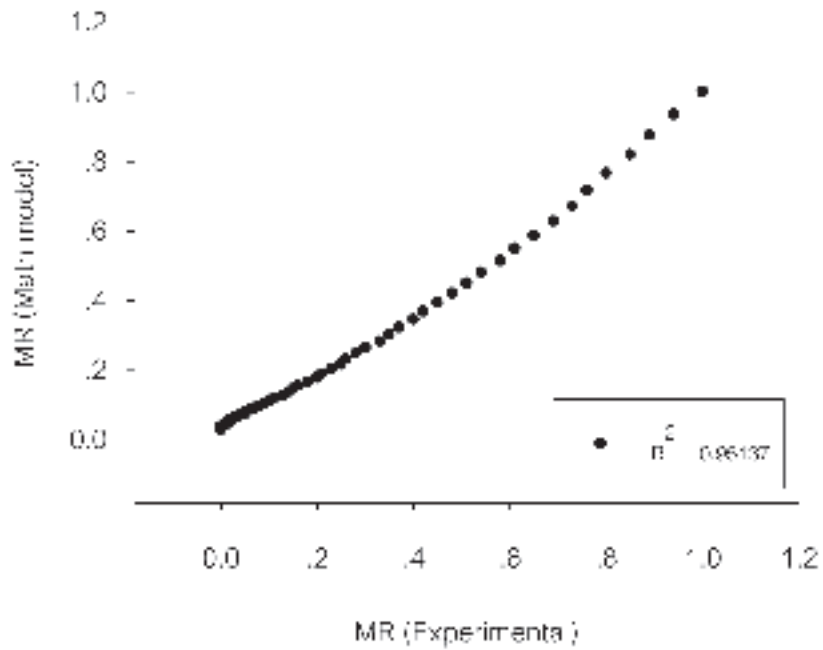
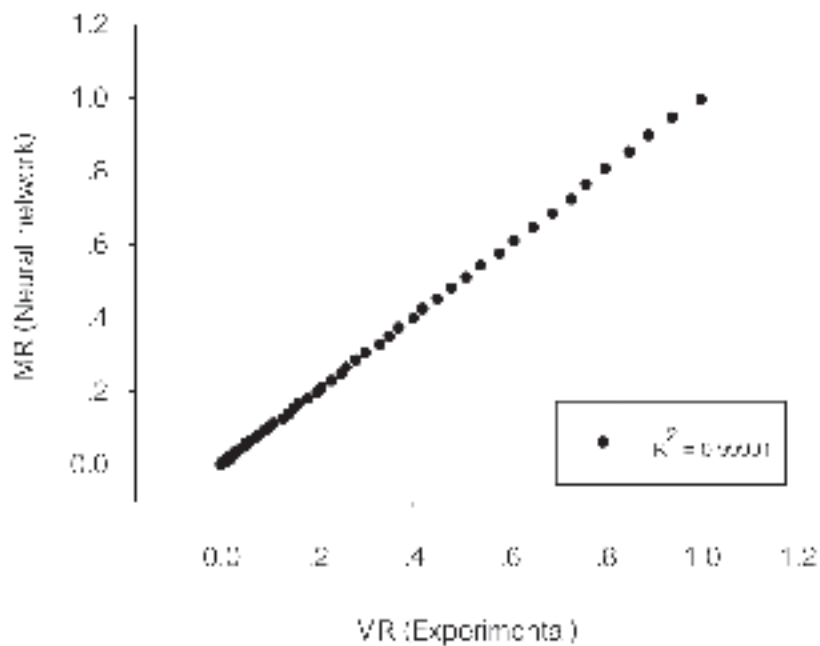


Figure 7. Results from the prediction of the moisture ratio at 50°C with air velocity and intensity of electric field values of 1.0 m/s and 0.5 kv/cm, respectively





**Figure 8.** Comparison the moisture ratio between the use of mathematical models and the experimental



**Figure 9.** Comparison the moisture ratio between the use of artificial neural network model and the experimental

จาก Figure 6-9 พบว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งบอระเพ็ดด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าได้แม่นยำมากกว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายพฤติกรรม การอบแห้งโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม ทั้งนี้เนื่องจาก โครงข่ายประสาทเทียมมีจุดเด่นในการเรียนรู้ สังเคราะห์ ทำนายผลลัพธ์ของปัจจัยแบบมีความสัมพันธ์ซับซ้อนและ ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี และโครงข่ายประสาทเทียมยังสามารถ ปรับแต่งความรู้ที่ซ่อนอยู่ภายในเครือข่ายที่มีการต่อเชื่อม โยงกันอย่างหนาแน่นด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุต มีการส่งผ่านข้อมูลที่ประมวลผลจาก อินพุตไปยังเอาต์พุต ดังนั้นการประมวลผลของโครงข่าย ประสาทเทียมจึงเป็นไปอย่างแม่นยำและรวดเร็ว

### บทสรุป

ผลจากการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วย ลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ และโครงข่ายประสาทเทียมพบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ และโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายพฤติกรรม การอบแห้งได้ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงข่ายประสาท เทียมสามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยลมร้อน ร่วมกับสนามไฟฟ้าได้แม่นยำกว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการอบแห้งผลิตภัณฑ์

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานที่สนับสนุน ทุนวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

1. โครงการอนุรักษ์พันธุพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี, “สรรพคุณสมุนไพร 200 ชนิด.” [บทความออนไลน์]. สืบค้นได้จาก: <[http://www.rspg.or.th/plants\\_data/herbs/herbs\\_\\_200.htm](http://www.rspg.or.th/plants_data/herbs/herbs__200.htm). 2554.
2. Chu, K.J. and Chou, S.K. 2003. Low-cost Drying Methods for Developing Countries. *Trends in Food Science & Technology*. 14: 519-528.
3. IEEE Engineering in Medicine and Biology. 2000. Possible Health Hazards Form Exposure to Power Frequency Electric and Magnetic Field. *A COMAR Technical Information Statement*. 19:131-137.
4. Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B. 2003. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*. 58: 277-283.
5. Baughman, D.R. and Liu, Y.A. 1995. *Neural Networks in Bio-Processing and Chemical Engineering*. Academic Press, New York, USA.
6. Erenturk, K., Erenturk, S., and Tabil, L.G. 2004. A comparative study for the estimation of dynamical drying behavior of Echinacea angustifolia : regression analysis and neural network. *Computers and Electronic in Agriculture*. 45: 71-90.
7. Hernandez-Perez, J.A., Garcia-Alvarado, M.A., Trystram, G., and Heyd, B. 2004. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 5: 57-64.



8. Kerr, W.L., Kerdpi boon, S., Devahastin, S. 2006. Neural network prediction of physical property changes of dried carrot as a function of fractal dimension and moisture content. *Food Research International*. 39: 1110–1118.
9. Erenturk, S. and Erenturk, K. 2007. Comparison of genetic algorithm and neural network approaches for the drying process of carrot. *Journal of Food Engineering*. 78: 905-912.
10. Martynenko, A.I. and Yang, S.X. 2006. Biologically inspired neural computation for Ginseng Drying rate . *Biosystems Engineering*. 95 (3): 385–396.
11. ปฏิวัติ วรามิตร, โสภณ ลินสร้าง, อธิพิพล วรพันธ์ และ บัณฑิต กฤตาคม. แบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสนามไฟฟ้าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 : 8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. Paper No. EN-102
12. ปฏิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา. การทำนายพฤติกรรมการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยใช้แบบจำลองเอมพีรีคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. : 5-7 พฤษภาคม 2553. จังหวัดเพชรบุรี. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. Paper No. ENETT6-1071.
13. ปฏิวัติ วรามิตร, บัณฑิต กฤตาคม, นันทวัฒน์ วีระยุทธ, อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ โสภณ ลินสร้าง. การทำนายเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้แบบจำลองเอมพีรีคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26. : 24-27 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. Paper No. ETM 2017.
14. ปฏิวัติ วรามิตร, นันทวัฒน์ วีระยุทธ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. 2553. การเปรียบเทียบแบบจำลองการอบแห้งด้วยลมร้อนระหว่างแบบจำลองเอมพีรีคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 : 60-68
15. Hagan, M.T., Demuth, H.B., and Beals, M. 1996. *Neural Network Design*. PWS Publishing Company, USA
16. นันทวัฒน์ วีระยุทธ, ปฏิวัติ วรามิตร และ อำไพศักดิ์ ทีบุญมา. สถาปัตยกรรมโครงสร้างที่เหมาะสมของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งด้วยลมร้อน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. : 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. Paper No. CST 009.

