



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร)

ปริญญา

การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

เทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การทำนายค่าความต้านแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยแบบจำลองเชิงปริมาณ

Edgewise Compression Prediction of Corrugated Boards Using Quantitative Models

นามผู้วิจัย นายบูรินธร สันติชีวะเสถียร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิพิมพ์ ญีสุข, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎกานันท์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิพิมพ์ ญีสุข, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทำนายค่าความต้านแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
ด้วยแบบจำลองเชิงปริมาณ

Edgewise Compression Prediction of Corrugated Boards  
Using Quantitative Models

โดย

นายบุรินทร์ สันติชีวะเสถียร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2555

บุรินทร์ สันติชีวะเสถียร 2555: การทำนายค่าความต้านแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยแบบจำลองเชิงปริมาตร ปรินญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร) สาขาการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิพิมพ์ จวีสุข, Ph.D. 163 หน้า

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณ แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่วงข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ (Backpropagation Neural Network; BPN) และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี (Radial Basis Function Network; RBFN) กับแบบจำลองดั้งเดิมได้แก่ แบบจำลองของ Whitsitt และแบบจำลองที่ปรับจากของ Whitsitt โดย Markstorm ในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (Edgewise Compression Test; ECT) จากปัจจัยออกแบบจำนวน 16 ปัจจัย โดยทดลองสร้างแบบจำลอง 3 รูปแบบตามประเภทของแผ่นกระดาษลูกฟูก ได้แก่ แบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ได้ทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นในแบบจำลองเดี่ยว แบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและแบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นในแบบจำลองเดียวกันนั้นให้ผลการทำนายไม่แตกต่างจากแบบจำลองที่ทำนายแยกระหว่างแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 และ 5 ชั้นและอยู่ในช่วงที่อุตสาหกรรมยอมรับได้ โดยแบบจำลองที่ทำนายค่า ECT ที่มีความถูกต้องสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นได้ในแบบจำลองเดี่ยว ได้แก่ แบบจำลอง 16-12-1 BPN และแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล โดยแบบจำลอง BPN มีค่าความคลาดเคลื่อนในรูปค่าสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (MAE) เป็น 11.79 นิวตันและร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (MAPE) เท่ากับ 4.23 % ในขณะที่แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียล มีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE เป็น 14.58 นิวตันและ MAPE เท่ากับ 5.14 % การตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น โดยมีปัจจัยตัดสินใจ 4 ประการคือ ความถูกต้องในการทำนาย ECT ระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน และความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าแบบจำลอง BPN ถูกเลือกให้เป็นแบบจำลองที่จะนำไปใช้งานจริง โดยปัจจัยตัดสินใจที่สำคัญที่สุดคือ ความถูกต้องในการทำนาย นอกจากนี้แบบจำลอง BPN นั้นสามารถใช้บ่งชี้ว่าปัจจัยออกแบบที่สำคัญได้แก่ น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก และน้ำหนักของกระดาษทำลอนที่ติดกับกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง

Burinthon Santichewasatian 2012: Edgewise Compression Prediction of Corrugated Boards Using Quantitative Models. Master of Science (Agro-Industry Technology Management), Major Field: Agro-Industry Technology Management, Department of Agro-Industry Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Ravipim Chaveesuk, Ph.D. 163 pages.

This research compared multiple regression model, polynomial regression model, backpropagation neural network (BPN) model and radial basis function network (RBFN) model with traditional models i.e. Whitsitt model and modified Whitsitt model by Markstorm in predicting edgewise compression of corrugated board (ECT) from 16 design factors. Three types of model format based on type of corrugated board were studied: model for single and double wall board, model for single wall board only and model double wall board only. The result indicated that the model for single and double wall board was comparable to the others in terms of prediction accuracy and was in an acceptable industrial range. The 16-12-1 BPN model and polynomial regression model were 2 best choices in predicting ECT of single and double wall at the same time. The BPN model had mean absolute error (MAE) of 11.79 newton and mean absolute percentage error (MAPE) of 4.23% while the polynomial regression model had MAE of 14.58 newton and MAPE of 5.14%. Selection of the best model for industrial practice by analytic hierarchy process (AHP) under 4 decision factors, i.e. prediction accuracy, model development and training time, cost of developing and training, and model update capability indicated that the BPN model was the best choice. The most important decision criterion was prediction accuracy. In addition, the BPN model identified that the most influential design factor affecting the ECT prediction were the basis weight of the inner liner, the length of corrugated board and the basis weight of corrugated medium that connected to the inner liner.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิพิมพ์ ฉวีสุข อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลักผู้ให้วิชาความรู้ และให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย ตลอดจนกรุณาให้คำปรึกษา  
แนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชญญรัตน์ จัญกาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ ความ  
ช่วยเหลือ และคำปรึกษาดังกล่าวไว้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่ง  
สอน และให้วิชาความรู้ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ในชีวิตในอนาคตต่อไป

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมและแวดวงวิชาการกองกระดาษลูกฟูก คุณมยุรี  
ภาคคำเจียก คุณสุทธิพงษ์ ณ สงขลา อาจารย์เลอพงศ์ จารุพันธ์ และดร.สุพจน์ ประทีปถิ่นทอง  
สำหรับการให้อนุญาตเข้าสัมภาษณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ  
และให้คำแนะนำต่าง ๆ ด้วยความยินดีเสมอมา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่หน้าผู้ควบคุมเครื่องมือที่ส่วนกลาง  
ของคณะอุตสาหกรรมเกษตรที่ให้ความช่วยเหลือดูแลเป็นอย่างดี ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยี  
การบรรจุและวัสดุสำหรับการอนุญาตให้ใช้เครื่องมือทดสอบ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ผู้ควบคุม  
เครื่องมือที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ สำหรับการสอนและอำนวยความสะดวกในการ  
ใช้เครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณบริษัท แม่พิมพ์ จำกัด สำหรับเครื่องมือในการตัดกระดาษลูกฟูก ขอขอบคุณพี่  
ๆ ที่บริษัท แม่พิมพ์ จำกัด ที่ช่วยเหลือในการสอนวิธีใช้งานเครื่องมือและให้ความสะดวกในการ  
เดินทางไปยังบริษัท ขอขอบคุณกลุ่มบริษัทสยามบรรจุภัณฑ์ ที่ให้เข้าชมโรงงานผลิตกองกระดาษ  
ลูกฟูกและความรู้ในภาคอุตสาหกรรม

บุรินทร์ สันติชีวะเสถียร

เมษายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	110
สรุป	110
ข้อเสนอแนะ	112
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	113
ภาคผนวก	120
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ	121
ภาคผนวก ข ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผล	123
ภาคผนวก ค โครงสร้างและผลจากแบบจำลอง	126
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	163

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ประเภทของลอนลูกฟูก	6
2	ปริมาณการใช้กล่องกระดาษลูกฟูกในประเทศไทยในช่วงปีพ.ศ. 2543-2554	9
3	มาตราส่วนในการเปรียบเทียบปัจจัยตัดสินเป็นคู่ ๆ ระหว่าง X กับ Y	29
4	ชนิดและน้ำหนักกระดาษที่ใช้ในงานวิจัย	36
5	การแปลงข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง	38
6	ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น	45
7	ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น	52
8	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Whitsitt ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น	55
9	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น	56
10	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	59
11	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	63
12	การเปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT	64
13	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ที่ดีที่สุดในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	65
14	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ที่ดีที่สุดในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	65
15	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Whitsitt ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	66
16	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น	67

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	69
18	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	73
19	เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น	73
20	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	74
21	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	74
22	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Whitsitt ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	75
23	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น	76
24	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณในการทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	78
25	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	81
26	เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น	81
27	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	82
28	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	82
29	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในการทำนายค่า ECT สำหรับกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	83

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
30	ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	89
31	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	95
32	ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงสุด 3 อันดับต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	101
33	ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงสุด 3 อันดับต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	102
34	ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงสุด 3 อันดับต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	103
35	เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า ECT	104
36	อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง	104
37	ค่าน้ำหนักของปัจจัยตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญแต่ละราย	105
38	ค่าน้ำหนักของแต่ละแบบจำลองต่อปัจจัยตัดสินใจ	107

## ตารางผนวกที่

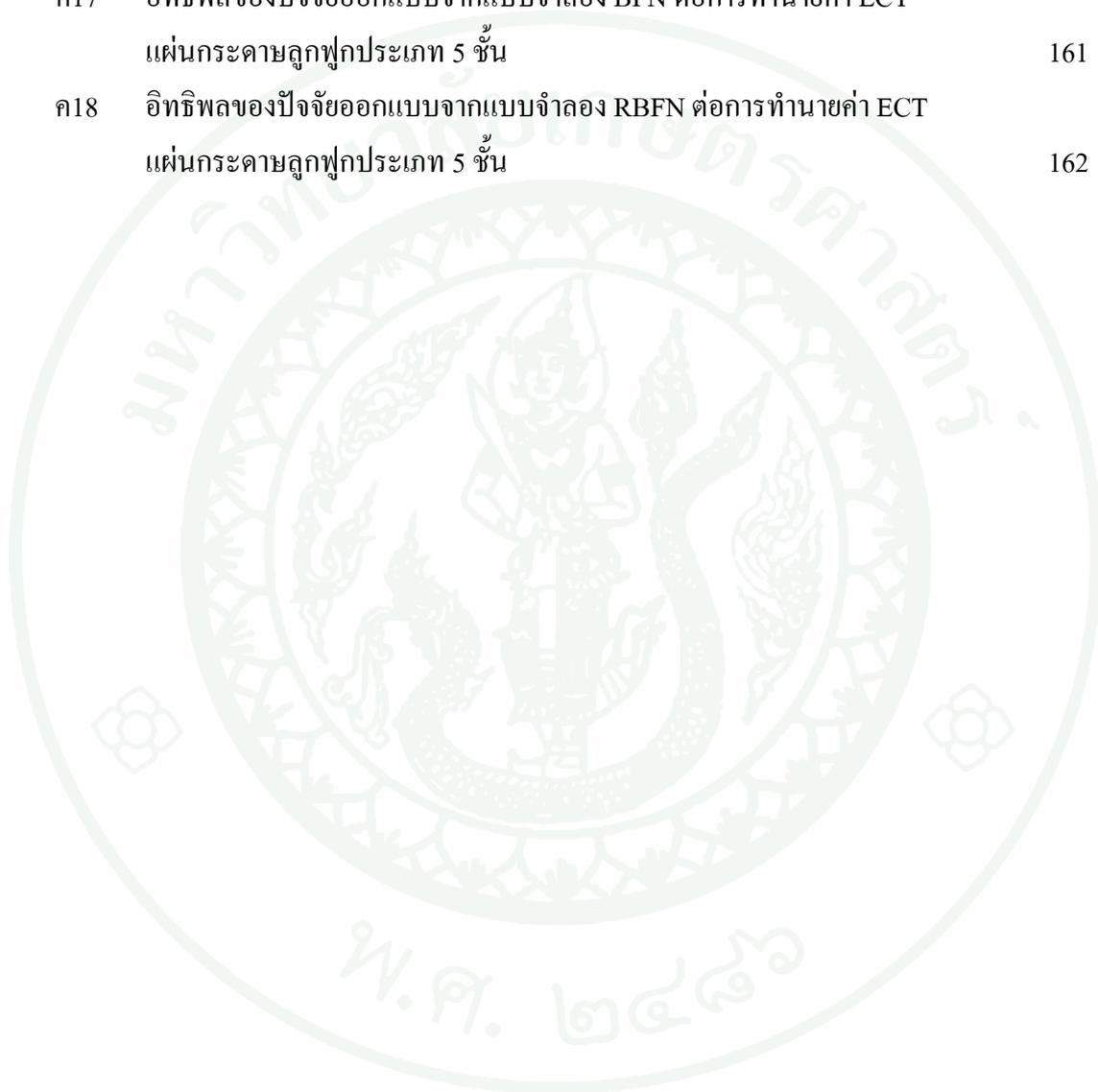
ข1	ค่าความต้านแรงกดวงแหวนของแผ่นกระดาษ	124
ข2	คะแนนการประเมินแบบจำลองทางเลือก	125
ข3	ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและทดสอบแบบจำลอง	125
ค1	ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	127
ค2	ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	131
ค3	ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	135

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ค4 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	138
ค5 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	140
ค6 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	142
ค7 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	144
ค8 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลต่อการ ทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	145
ค9 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง BPN ต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	149
ค10 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง RBFN ต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น	150
ค11 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	151
ค12 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลต่อการ ทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	152
ค13 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง BPN ต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	156
ค14 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง RBFN ต่อการทำนาย ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	157
ค15 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	158
ค16 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลต่อการ ทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	159

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค17	อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง BPN ต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	161
ค18	อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง RBFN ต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น	162



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ประเภทของลอนลูกฟูก	6
2	ประเภทของแผ่นกระดาศลูกฟูก	7
3	การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน	11
4	การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาศลูกฟูก	12
5	การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของกล่องกระดาศลูกฟูก	12
6	เครือข่ายประสาทเทียมชีวภาพ	19
7	โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียม	20
8	ลำดับชั้นการวิเคราะห์ในกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น	28
9	การเปรียบเทียบค่า ECT ที่ความยาวและความสูงต่าง ๆ ระหว่างกระดาศลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น	54
10	เปรียบเทียบระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดฝึก	85
11	เปรียบเทียบระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดทดสอบ	87
12	เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดฝึกสำหรับกระดาศลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	91
13	เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดทดสอบสำหรับกระดาศลูกฟูกประเภท 3 ชั้น	93
14	เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดฝึกสำหรับแผ่นกระดาศลูกฟูก 5 ชั้น	97
15	เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดทดสอบสำหรับแผ่นกระดาศลูกฟูก 5 ชั้น	99
16	แสดงน้ำหนักที่ใช้ในการตัดสินใจแบบจำลอง	107
17	ความอ่อนไหวของความถูกต้องในการทำนาย	108
18	ความอ่อนไหวของระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน	108
19	ความอ่อนไหวของค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน	109
20	ความอ่อนไหวของความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน	109

# การทำนายค่าความต้านแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ด้วยแบบจำลองเชิงปริมาณ

## Edgewise Compression Prediction of Corrugated Boards Using Quantitative Models

### คำนำ

กล่องกระดาษลูกฟูกเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ สามารถย่อยสลาย น้ำหนักเบา และสะดวกต่อการขนย้าย เป็นต้น (วิจิตร, 2548) ความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูกเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบกล่องกระดาษลูกฟูก (Whitsitt and Mckee, 1966) ความแข็งแรงนี้มีความสำคัญโดยตรงต่อการรองรับน้ำหนักสินค้าในการวางซ้อนระหว่างการขนส่งหรือการจัดเก็บ (Kyung and Hwan, 2010) และปกป้องสินค้าที่มีความเสียหายได้ง่าย (Talbi *et al.*, 2009)

องค์ประกอบของแผ่นลูกฟูกและความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งแรงของกล่องลูกฟูก การทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงมีอยู่หลายวิธีการ ได้แก่ ความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (Edge Crush) ความต้านทานการโค้งงอ (Bending) ความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting Strength) ความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกในแนวระนาบ (Flat Crush) เป็นต้น (อัญชลี และคณะ, 2545) อย่างไรก็ตามการทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรับแรงกดของแผ่นกระดาษลูกฟูก (Mckee *et al.*, 1963) การทราบค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกจึงมีประโยชน์ในการนำไปใช้สำหรับการออกแบบโครงสร้างของกล่องกระดาษลูกฟูก

ในการออกแบบโครงสร้างกล่องกระดาษลูกฟูกได้แก่ ขนาด รูปทรง และการเลือกกระดาษที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นลูกฟูก จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยเพื่อความรวดเร็วในการทำนาย การมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วยลดเวลาในการออกแบบ ประหยัด

ต้นทุนและเวลา โดยไม่จำเป็นต้องมีการทดสอบกล่องที่ออกแบบทำให้สามารถได้กล่องกระดาษลูกฟูกที่ทำจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีระดับความแข็งแรงเหมาะสมกับประเภทสินค้าที่ขนส่ง

Whitsitt (1990) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งจัดเป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้บ่งบอกความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก เนื่องจากเป็นแบบจำลองเชิงเส้นไม่ซับซ้อนสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย โดยมี Markstorm (1999) ปรับแบบจำลองของ Whitsitt ให้เป็นสากลมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองทั้ง 2 ประเภทไม่สามารถทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้ถูกต้องในระดับสูง และหากทำนายไม่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดการประมาณการที่ผิดพลาดไม่ว่าการทำนายจะน้อยกว่าค่าจริง (Underestimate) หรือสูงกว่าค่าจริง (Overestimate) ทำให้เกิดความเสียหายในระหว่างการใช้งานขึ้นได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกระหว่างแบบจำลองดั้งเดิมทั้ง 2 ประเภทกับแบบจำลองทางเลือกใหม่ได้แก่ แบบจำลองการถดถอย และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

แบบจำลองทางเลือกใหม่นี้เป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่จำลองความสัมพันธ์จากข้อมูลที่มีความสัมพันธ์เชิงซ้อนได้ดีจึงมีความเป็นไปได้ที่จะจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการออกแบบของแผ่นกระดาษลูกฟูกกับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกซึ่งสามารถเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย ลดระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบ และลดต้นทุนในการทดสอบ เป็นต้น

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์สำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากปัจจัยการออกแบบ
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกของแบบจำลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยกับแบบจำลองดั้งเดิม
3. เพื่อทราบปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากการบ่งชี้ของแบบจำลองที่สร้างขึ้น
4. เพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

## การตรวจเอกสาร

งานวิจัยนี้สร้างและคัดเลือกแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากปัจจัยออกแบบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษลูกฟูกและกล่องกระดาษลูกฟูก โดยแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ศึกษาคือ แบบจำลองการถดถอย แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม ดังนั้นเนื้อหาทั้งหมดประกอบด้วยหัวข้อหลักดังนี้

1. แผ่นกระดาษลูกฟูก
2. กล่องกระดาษลูกฟูก
3. การทดสอบกระดาษลูกฟูกและกล่องกระดาษลูกฟูก
4. แบบจำลองเชิงประจักษ์เพื่อการทำนายความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก
5. กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## แผ่นกระดาษลูกฟูก

### 1. โครงสร้างของแผ่นกระดาษลูกฟูก

โครงสร้างของแผ่นกระดาษลูกฟูกประกอบด้วยกระดาษทำผิวกล่องด้านนอก (Outer Liner) กระดาษทำลอนลูกฟูก (Corrugating Medium) และกระดาษทำผิวกล่องด้านใน (Inner Liner) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2528) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1 กระดาษทำผิวกล่องด้านนอก หมายถึง กระดาษแผ่นเรียบที่ใช้ประกบกับลอนลูกฟูก โดยเป็นแผ่นที่อยู่ด้านนอกของแผ่นกระดาษลูกฟูก และกล่องกระดาษลูกฟูก

1.2 กระดาษทำลอนลูกฟูก หมายถึง กระดาษที่นำมาขึ้นรูปเป็นลอนใช้ปะติดระหว่างกระดาษทำผิวกล่องด้านนอกกับกระดาษทำผิวกล่องด้านใน

1.3 กระดาษทำฟิวกล่องด้านใน หมายถึง กระดาษที่ใช้ประกบกับลอนลูกฟูก โดยเป็นแผ่นที่อยู่ด้านในของแผ่นกระดาษลูกฟูกและกล่องกระดาษลูกฟูก

## 2. ประเภทของกระดาษทำฟิวและทำลอนลูกฟูก

กระดาษคราฟท์ (Kraft Paper) หมายถึงกระดาษเหนียวสีน้ำตาลที่นิยมใช้เป็นกระดาษที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นลูกฟูก กระดาษคราฟท์มีหลายประเภทแต่ละประเภทจะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป (อัญจน, 2546) กระดาษคราฟท์ที่ผลิตในประเทศไทยโดยบริษัทสยามคราฟท์ จำกัดมีหลายประเภท ซึ่งมีชื่อทางการค้าที่สามารถกล่าวได้ ดังนี้

2.1 KRAFT A (KA) ลักษณะกระดาษเป็นสีเหลืองทอง เป็นกระดาษที่นำมาทำเป็นกระดาษทำฟิวกล่องอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีสมบัติที่ทนต่อความชื้น สีฟิวกระดาษมีความสม่ำเสมอ มีความเหนียวสามารถรองรับการพิมพ์ได้ และผ่านการนำเยื่อกระดาษหมุนเวียนใช้ใหม่บ่อยครั้ง เหมาะสำหรับสินค้าที่ต้องการการปกป้อง หรือสินค้าที่ต้องกันกระแทก กระดาษคราฟท์ประเภทนี้สามารถใช้ทำฟิวกล่องสำหรับสินค้าหลายประเภท เช่น อาหารกระป๋อง เฟอร์นิเจอร์ เครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่มีจำหน่าย เช่น 125, 150, 185 และ 230 กรัมต่อตารางเมตร

2.2 KRAFT I (KI) ลักษณะกระดาษเป็นสีน้ำตาลอ่อน เป็นกระดาษที่เหมาะสมแก่การใช้งานในด้านการพิมพ์ มีลักษณะพื้นฐานทั่วไปคล้ายกับแบบ KA แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าแบบ KA เนื่องจากผ่านการขัดฟอกสี ใช้ในสินค้าส่งออกที่ต้องการความแข็งแรงน้อยกว่าแบบ KA น้ำหนักมาตรฐาน เช่น 125, 150 และ 185 กรัมต่อตารางเมตร

2.3 KRAFT S (KS) ลักษณะกระดาษเป็นสีขาว เป็นกระดาษที่ใช้ในงานเน้นการพิมพ์เป็นหลัก เน้นความสวยงามของการพิมพ์ มีความแข็งแรงและทนต่อความชื้นเช่นเดียวกับแบบ KA ใช้ในสินค้าประเภท อาหาร ผักผลไม้ กล่องนม ดอกไม้ สินค้าส่งออก เป็นต้น น้ำหนักมาตรฐาน เช่น 140 และ 170 กรัมต่อตารางเมตร

2.4 KRAFT T (KT) ลักษณะกระดาษเป็นสีน้ำตาล เป็นกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษที่ใช้แล้ว ผลิตขึ้นเพื่อรองรับการรักษาสภาพแวดล้อมและลดปริมาณกระดาษที่ถูกผลิตขึ้นใหม่ น้ำหนักมาตรฐาน เช่น 125, 150 และ 185 กรัมต่อตารางเมตร

### 3. ประเภทของลอนลูกฟูก

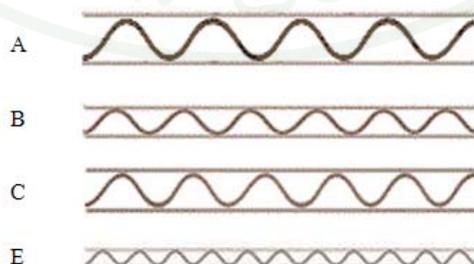
ลอนลูกฟูกที่มักพบในอุตสาหกรรมแบ่งเป็น 4 ประเภทดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทของลอนลูกฟูก

ลอน	จำนวนลอนต่อ เมตร	ความสูงลอน (มิลลิเมตร)	Take up factor*	การใช้งาน
A	110±10	4.67	1.58	เหมาะกับสินค้าต้องรับ น้ำหนักการเรียงซ้อนมาก
B	155±10	2.46	1.38	เหมาะกับสินค้าที่รับ น้ำหนักได้ด้วยตัวเอง
C	130±10	3.61	1.50	เหมาะกับสินค้าที่รับ น้ำหนักได้ปานกลาง จนถึงไม่ได้
E	297±15	1.14	1.27	เหมาะกับกล่องที่ต้อง รองรับการพิมพ์

หมายเหตุ \*Take up factor คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวของลอนลูกฟูกที่ยึดออกต่อความยาว  
ของ กระดาษแผ่นเรียบ

ที่มา: American Society for Testing Materials (2005)



ภาพที่ 1 ประเภทของลอนลูกฟูก

#### 4. ประเภทของแผ่นกระดาษลูกฟูก

อัญชลี และคณะ (2545) ได้แบ่งประเภทของแผ่นกระดาษลูกฟูกเป็น 4 ประเภท (ภาพที่ 2) ดังนี้

4.1 แผ่นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (Single Face Board) คือแผ่นกระดาษลูกฟูก 2 ชั้นที่ประกอบด้วยกระดาษทำผิว 1 แผ่นและกระดาษทำลอนอีก 1 แผ่น ใช้เป็นวัสดุกันกระแทกกันรอยขีดข่วนในสินค้าที่สามารถแตกหรือมีรอยได้ เช่น หลอดไฟฟ้า ขวดแก้ว เป็นต้น

4.2 แผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น (Single Wall Board) คือแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษทำผิว 2 แผ่นและกระดาษทำลอนอีก 1 แผ่น โดยประกบกระดาษทำผิวให้กระดาษทำลอนอยู่ระหว่างกระดาษทั้ง 2 แผ่น

4.3 แผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น (Double Wall Board) คือแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษทำผิว 3 แผ่นและกระดาษทำลอนอีก 2 แผ่น โดยประกบให้ลอนลูกฟูกอยู่ระหว่างแผ่นกระดาษทั้ง 3 แผ่น นำมาใช้ในงานที่ต้องรองรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นกว่าแบบแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น

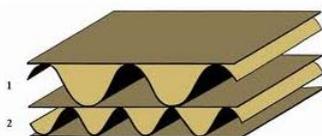
4.4 แผ่นกระดาษลูกฟูก 7 ชั้น (Triple Wall Board) คือแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ประกอบด้วยกระดาษทำผิว 4 แผ่นและกระดาษทำลอนอีก 3 แผ่น โดยการประกบกระดาษทำผิวและกระดาษทำลอนสลับกันไป



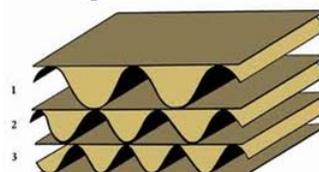
Single Face Board



Single Wall Board



Double Wall Board



Triple Wall Board

ภาพที่ 2 ประเภทของแผ่นกระดาษลูกฟูก

## กล่องกระดาษลูกฟูก

### 1. บทบาทและหน้าที่ของกล่องกระดาษลูกฟูก

กล่องกระดาษลูกฟูกเป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมนำมาใช้บรรจุผลิตภัณฑ์เพื่อการขนส่งประเภทต่าง ๆ เช่น อาหาร เครื่องดื่ม เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือ สารเคมี เป็นต้น กล่องกระดาษลูกฟูกทำจากแผ่นกระดาษลูกฟูก มีทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นหรือ 7 ชั้น กล่องลูกฟูกมีบทบาทสำคัญในการช่วยปกป้องผลิตภัณฑ์ไม่ให้ผลิตภัณฑ์เสียหายระหว่างการจัดเก็บและการขนส่ง เราสามารถประเมินความสามารถในการปกป้องผลิตภัณฑ์ของกล่องกระดาษลูกฟูกจากความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกและการออกแบบโครงสร้างของกล่อง ความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกแปรผันตามปัจจัยออกแบบเบื้องต้นได้แก่ ประเภทของกระดาษรวมทั้งน้ำหนักของกระดาษที่เป็นองค์ประกอบ จำนวนชั้นของแผ่นกระดาษ ความยาว ความกว้าง และความสูง ผู้ใช้ควรเลือกใช้กล่องกระดาษที่มีการออกแบบตามความเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อย่างเช่น ผักผลไม้ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวในการเสียหายได้ง่ายหรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูงอาจต้องเลือกใช้แผ่นกระดาษที่มีความแข็งแรงมากกว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวในการเสียหาย หรือมีมูลค่าน้อยกว่า อย่างเช่น อาหารกระป๋อง หรือสินค้าที่รับน้ำหนักได้ด้วยตัวเอง เป็นต้น ในปัจจุบันกล่องกระดาษลูกฟูกส่วนมากออกแบบโครงสร้างและกราฟฟิคให้สวยงามเพื่อช่วยทำหน้าที่ส่งเสริมการขาย ณ จุดซื้อ รวมถึงเพิ่มมูลค่าและภาพลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น

### 2. ปริมาณการใช้กล่องกระดาษลูกฟูกในประเทศไทย

ปริมาณการใช้กล่องกระดาษลูกฟูกในประเทศไทยมีการเติบโตมากขึ้นในระยะสิบปีที่ผ่านมาจนถึงประมาณช่วงสี่ปีที่ผ่านมาที่ปริมาณการใช้ค่อนข้างคงที่และมีการลดลงเล็กน้อย ปริมาณการใช้กล่องกระดาษลูกฟูกในประเทศไทยในช่วงปีพ.ศ. 2543-2554 เป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้กล่องกระดาษลูกฟูกในประเทศไทยในช่วงปีพ.ศ. 2543-2554

ปีพ.ศ.	ปริมาณการใช้กล่องกระดาษลูกฟูก (ตัน)	อัตราการเติบโต (ร้อยละ)
2543	339,530	-
2544	453,858	33.67
2545	463,331	2.09
2546	476,373	2.81
2547	508,958	6.84
2548	536,553	5.42
2549	560,190	4.41
2550	596,670	6.51
2551	694,665	16.42
2552	626,857	-9.76
2553	672,367	7.26
2554	676,462	0.61

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (2555)

### 3. การผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก

การผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกแบ่งได้ 2 ขั้นตอนดังนี้

3.1 การผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูก ในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดแผ่นกระดาษลูกฟูกจากการนำแผ่นกระดาษแผ่นเรียบ และกระดาษทำลอนมาประกบติดกัน ขั้นตอนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกเริ่มจากการประกบกันระหว่างกระดาษทำลอนและกระดาษแผ่นเรียบแผ่นแรก ซึ่งในภายหลังกระดาษแผ่นนี้จะเป็นกระดาษผิวกล่องด้านใน โดยกระดาษทำลอนจะผ่านการปรับสภาพ (Pre-Conditioner) ทำให้กระดาษอ่อนตัวขดเป็นลอนได้ดี ส่วนกระดาษแผ่นเรียบจะผ่านเครื่องให้ความร้อน (Pre-Heater) เพื่อไล่ความชื้น กระดาษทำลอนจะถูกดึงเข้าเครื่องทำลอน (Corrugated Roll) จากนั้นกระดาษที่เป็นชั้นลอนแล้วจะผ่านเครื่องทากาวบนยอดลอนแล้วไปประกบกับกระดาษแผ่นเรียบได้เป็นกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (Single Face) จากนั้นยอดลอนอีกด้าน

จะถูกทากาวแล้วประกบติดกับกระดาษแผ่นเรียบอีกแผ่นหนึ่งจากนั้นนำกระดาษผ่านเครื่องให้ความร้อน (Heating Plate) สำหรับกระดาษลูกฟูกแบบ 5 ชั้นจะทำต่อเนื่องจากขั้นตอนนี้ โดยการนำกระดาษลูกฟูกหน้าเดียว (Single Face) อีกแผ่นหนึ่งมาประกบเพิ่มเติม แผ่นกระดาษลูกฟูกนี้จะถูกนำไปผ่านการตัดขอบและตัดแบ่ง (Slitter & Scorer) ในด้านกว้างและทำเส้นพับฝากล่อง จากนั้นจะมีการตัดกระดาษให้ได้ตามด้านยาวที่ต้องการด้วยเครื่องตัดกระดาษ (Cut Off) สุดท้ายแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ตัดแล้วจะถูกนำเข้าสู่เครื่องซ้อนลำเลียง (Stacker) เพื่อรอการนำไปพิมพ์และผลิตกล่องต่อไป

3.2 การผลิตกล่องกระดาษลูกฟูก ในการผลิตกล่องกระดาษลูกฟูกนั้นทำโดยการนำแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผลิตไว้แล้วมาทำเส้นพับรอยและเจาะร่องจากนั้นทำการขึ้นรูปและยึดติดด้วยการติดกาวหรือการเย็บลวด

#### 4. ประเภทของกล่องกระดาษลูกฟูก

กล่องกระดาษลูกฟูกแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ดังนี้

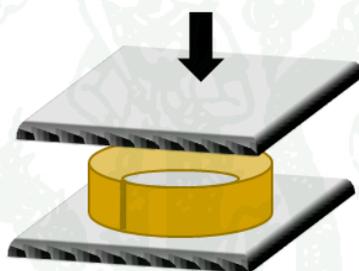
4.1 กล่องกระดาษลูกฟูกแบบสล็อต (Slotted Container) หมายถึงกล่องที่ผลิตมาจากแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีร่องสล็อต (Slot) โดยกล่องจะผ่านเครื่องเจาะร่องและพับรอย แล้วนำไปขึ้นรูปจะได้เป็นกล่องกระดาษลูกฟูก

4.2 กล่องกระดาษลูกฟูกไดคัท (Die Cut Container) คือกล่องที่มีรูปทรงหลากหลาย มีการเจาะรูหิ้ว มีการออกแบบโครงสร้างในลักษณะพิเศษ โดยรูปทรงที่ออกแบบมาเพื่อความสวยงามและความสะดวกในการใช้งาน ส่วนใหญ่แล้วกล่องกระดาษลูกฟูกแบบไดคัทจะถูกออกแบบให้มีรูปร่างที่มีความพิเศษเพื่อส่งเสริมการขายสินค้า

## การทดสอบกระดาษลูกฟูกและกล่องกระดาษลูกฟูก

### 1. ความต้านทานแรงกดวงแหวนของแผ่นกระดาษ

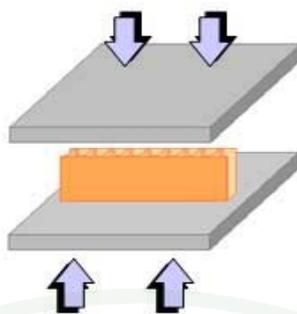
ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring Crush Test; RCT) หมายถึงค่าความต้านของแผ่นกระดาษที่ถูกนำมาขดเป็นวงแล้วนำมาออกแรงกดลงด้วยความเร็วคงที่จนแผ่นกระดาษไม่สามารถทนต่อแรงกดต่อไปได้อีก มีหน่วยเป็นนิวตันต่อความยาว ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนนี้สามารถหาได้ทั้งจากการกดแผ่นกระดาษในแนวตามเครื่องจักร (Machine Direction; MD) และในแนวขวางเครื่องจักร (Cross Direction; CD) ซึ่งค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนวขวางเครื่องจักรจะมีค่ามากกว่าในแนวตามเครื่องจักร (Popil, 2009) และมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ภาพที่ 3 แสดงการทดสอบค่า RCT



ภาพที่ 3 การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

### 2. ความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

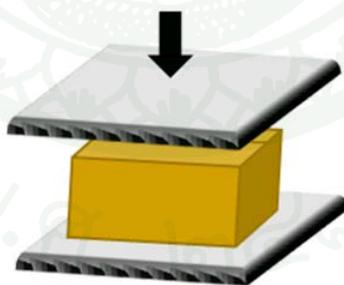
ความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (Edgewise Compression Test; ECT) หมายถึงค่าความต้านทานของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากการออกแรงกดแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยอัตราเร็วคงที่จนแผ่นกระดาษลูกฟูกรับแรงกดต่อไปไม่ได้อีก โดยมีหน่วยเป็นนิวตันต่อขนาดความยาว ในการทำการทดสอบหาค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะวางกระดาษลูกฟูกในแนวตั้งดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

### 3. ความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกในแนวตั้ง

ความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกในแนวตั้ง (Box Compression Test; BCT) หมายถึง ค่าความต้านทานของกล่องกระดาษลูกฟูกจากการกดลงกล่องกระดาษลูกฟูกด้วยอัตราเร็วคงที่จนกล่องเสียรูปหรือรับแรงกดต่อไปไม่ได้ โดยมีหน่วยเป็นนิวตัน หรือกิโลกรัมแรง การทดสอบนี้จะทดสอบความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูก นำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูกในการขนส่ง ตั้งแต่การจัดเรียงซ้อน น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่นำมาใส่ในกล่อง จนถึงลักษณะการขนส่งกล่องกระดาษลูกฟูก (เจนยุทธ, 2551) ภาพที่ 5 แสดงการทดสอบค่า BCT



ภาพที่ 5 การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของกล่องกระดาษลูกฟูก

การวัดค่าความต้านทานแรงกดนี้ทำได้โดยวางกล่องลงบนแท่นกดกล่องแล้วให้แท่นกดกดลงบนระนาบกล่องด้วยความเร็วคงที่จนถึงจุดที่ทำให้กล่องเสียรูปทรงไปจากเดิม นอกจากกล่องกระดาษลูกฟูกแล้วยังสามารถวัดค่าจากกล่องที่ทำจากไม้ หรือวัสดุที่มีรูปทรงกล่องได้

#### 4. การทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

การทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกสามารถทำได้โดยศึกษาปัจจัยเบื้องต้นองค์ประกอบของแผ่นกระดาษลูกฟูก อาทิเช่น ชนิดของกระดาษ น้ำหนักของกระดาษ ประเภทของลอนลูกฟูก มิติของแผ่นกระดาษ เป็นต้น

Whitsitt (1985) ทดลองหาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการเสีรูปร่างเนื่องจากการรับน้ำหนักจากแรงกดบนแผ่นกระดาษลูกฟูก ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยการเสีรูปร่างจะมีความสัมพันธ์กับแรงที่กระทำแตกต่างกันไปเมื่อมีการทดลองซ้ำกับแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ผลิตคนละชุดกัน ต่อมาในปี ค.ศ. 1990 Whitsitt ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบและกระดาษทำลอนสำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นดังสมการที่ 1 และสำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้นดังสมการที่ 2

$$ECT = 0.8(L_1 + tM + L_2) + 2.1 \quad (1)$$

โดยที่	ECT	คือ ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$L_1$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	t	คือ Take up factor ของลอนลูกฟูก
	M	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอน
	$L_2$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง

$$ECT = 0.8(L_1 + tM_1 + L_2 + tM_2 + L_3) + 2.1 \quad (2)$$

โดยที่	ECT	คือ ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$L_1$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	t	คือ Take up factor ของลอนลูกฟูก
	$M_1$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอนที่ 1
	$L_2$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบกลาง
	$M_2$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอนที่ 2
	$L_3$	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง

ต่อมา Markstrom (1999) ได้นำแบบจำลองของ Whitsitt มาปรับให้เป็นสากลที่สามารถกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้เหมาะสมกับข้อมูลไว้เป็นดังสมการที่ 3

$$ECT = k(L_1 + tM + L_2) + c \quad (3)$$

โดยที่	ECT	คือ ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	k, c	คือ ค่าคงที่
	L <sub>1</sub>	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	t	คือ Take up factor ของลอนลูกฟูก
	M	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอน
	L <sub>2</sub>	คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง

และค่า ECT นี้สามารถนำไปใช้ในการทำนายความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกในแนวตั้ง (Box Compression Test; BCT) ซึ่งใช้ในการระบุความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูกต่อไป

## 5. การทำนายค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูก

การทำนายค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกทำเพื่อประโยชน์ในการขนส่งสินค้า โดยทั่วไปแล้วการขนส่งสินค้าจะขนส่งทีละปริมาณมากเพื่อให้ประหยัดต้นทุนการขนส่ง การนำกล่องกระดาษลูกฟูกเรียงซ้อนกันจะช่วยทำให้ใช้พื้นที่ในการขนส่งสินค้าแต่ละรอบได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การคำนวณความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูกวิธีการหนึ่งคือการคำนวณค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกในแนวตั้ง มีผู้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกในแนวตั้งหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

McKee *et al.* (1963) ได้พัฒนาแบบจำลองการทำนายค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกมาตั้งแต่ ค.ศ. 1963 แสดงได้ดังสมการที่ 4

$$P = 2.028 P_m^{0.746} (\sqrt{D_x D_y})^{0.254} Z^{0.492} \quad (4)$$

โดยที่	P	คือ ค่าความต้านทานแรงกดกล่องกระดาษลูกฟูก
	$P_m$	คือ ค่าความต้านทานต่อแรงกดลอนแผ่นกระดาษลูกฟูก หาได้จากการวัดค่าต้านทานแรงกดของแผ่นกระดาษลูกฟูกรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่กระทำในแนวทิศทางเดียวกับแนวตั้งของลอนลูกฟูกจนแผ่นกระดาษลูกฟูกยุบตัวลง
	$D_x$	คือ ค่าความต้านทานต่อการโค้งงอของแผ่นกระดาษลูกฟูกในแนวตามเกรนคือ ของกระดาษ (Machine Direction)
	$D_y$	คือ ค่าความต้านทานต่อการโค้งงอของแผ่นกระดาษลูกฟูกในแนวขวางเกรนของกระดาษ (Cross Direction)
	Z	คือ เส้นรอบรูปของฐานกล่องที่รับแรงกดในแนวตั้ง

จากนั้น McKee *et al.* (1963) ได้ทำการปรับแบบจำลองใหม่เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจและนำไปใช้โดยเป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดกล่องกระดาษลูกฟูก (Box Compression Test; BCT) และค่าความต้านทานต่อแรงกดลอนแผ่นกระดาษลูกฟูก (Edge Crush Test; ECT) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากง่ายต่อการใช้งานดังสมการที่ 5

$$BCT = 5.87 ECT \sqrt{ZH} \quad (5)$$

โดยที่	BCT	คือ ค่าความต้านทานแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูกในแนวตั้ง
	ECT	คือ ค่าความต้านทานแรงกดของลอนลูกฟูกในแนวตั้ง
	Z	คือ เส้นรอบรูปกล่อง
	H	คือ ความหนาของแผ่นกระดาษลูกฟูก

## แบบจำลองเชิงประจักษ์เพื่อการทำนายความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

จากการที่แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกของ Whitsitt (1990) และแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) เมื่อนำไปใช้งานมีการใช้ประโยชน์จากปัจจัยนอกแบบที่เกี่ยวข้องเพียงแค่ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก และค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ได้จะต้องขึ้นกับค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเท่านั้นทำให้แบบจำลองทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมามีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยชิ้นแรกที่ได้มีการนำแบบจำลองเชิงประจักษ์ ซึ่งสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกกับปัจจัยนอกแบบ โดยแบบจำลองที่สนใจได้แก่ แบบจำลองการถดถอย และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้มากยิ่งขึ้น

### 1. แบบจำลองการถดถอย

แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) หมายถึง แบบจำลองที่ใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวขึ้นไป คือระหว่างตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระจำนวนหนึ่งตัวแปรหรือมากกว่าหนึ่งตัวแปรกับตัวแปรตามจำนวนหนึ่งตัวแปร (Kutner *et al.*, 2008) ศึกษาเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต้นแล้วเก็บค่าตัวแปรตามที่เปลี่ยนไป จากนั้นสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภทในรูปแบบเชิงเส้นหรือไม่เชิงเส้น อย่างไรก็ตามแบบจำลองการถดถอยจะต้องตรวจสอบเงื่อนไขที่ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความน่าเชื่อถือเช่น ค่าความคลาดเคลื่อนจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ไม่มีสหสัมพันธ์ร่วมและมีความแปรปรวนคงที่เป็นต้น ก่อนการนำไปใช้จริง (กัลยา, 2546) แบบจำลองการถดถอยที่เลือกศึกษาในงานวิจัยนี้มีดังต่อไปนี้

#### 1.1 แบบจำลองการถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยอย่างง่าย เป็นแบบจำลองการถดถอยเบื้องต้นที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหนึ่งตัวแปรและตัวแปรตามหนึ่งตัวแปรซึ่งอยู่ในรูปสมการเส้นตรงที่มีค่าความความคลาดเคลื่อนจากการประมาณค่าข้อมูลตัวแปรตามเฉลี่ยน้อยที่สุด ดังสมการที่ 6

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

โดยที่  $Y_i$  คือ ตัวแปรตามจากตัวอย่างที่  $i$   
 $\beta_0, \beta_1$  คือ สัมประสิทธิ์ของการถดถอย  
 $X_i$  คือ ตัวแปรต้นของตัวอย่างที่  $i$   
 $\varepsilon_i$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มของตัวอย่างที่  $i$

แบบจำลองการถดถอยอย่างง่ายมีข้อจำกัดคือจะพิจารณาความสัมพันธ์เพียงตัวแปรต้นตัวเดียวทำให้ไม่สามารถจำลองความสัมพันธ์ที่แท้จริง และไม่สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอื่นที่อาจมีอยู่ได้

## 1.2 แบบจำลองการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยพหุคูณ เป็นแบบจำลองการถดถอยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นจำนวนหลายตัวแปรกับตัวแปรตามหนึ่งตัวแปร ดังสมการที่ 7

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

โดยที่  $Y_i$  คือ ตัวแปรตามจากตัวอย่างที่  $i$   
 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  คือ สัมประสิทธิ์ของการถดถอย  
 $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ik}$  คือ ตัวแปรอิสระที่  $k$  ของตัวอย่างที่  $i$   
 $\varepsilon_i$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มของตัวอย่างที่  $i$

การนำตัวแปรเข้าสมการทำได้ 4 วิธีคือ Enter นำตัวแปรเข้าแบบจำลองพร้อมกันทั้งหมด Forward นำตัวแปรเข้าแบบจำลองทีละตัวจนเข้าไม่ได้อีก Backward เริ่มจากนำตัวแปรเข้าแบบจำลองทั้งหมดแล้วค่อยนำออกจนนำออกไม่ได้อีก Stepwise นำตัวแปรเข้าแบบจำลองด้วยวิธีผสมระหว่าง Forward และ Backward (Kutner, 2008)

อย่างไรก็ตามแบบจำลองการถดถอยพหุคูณนั้นจะแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรตามและไม่ได้พิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น

### 1.3 แบบจำลองการถดถอยพหุนาม (Polynomial Regression Model)

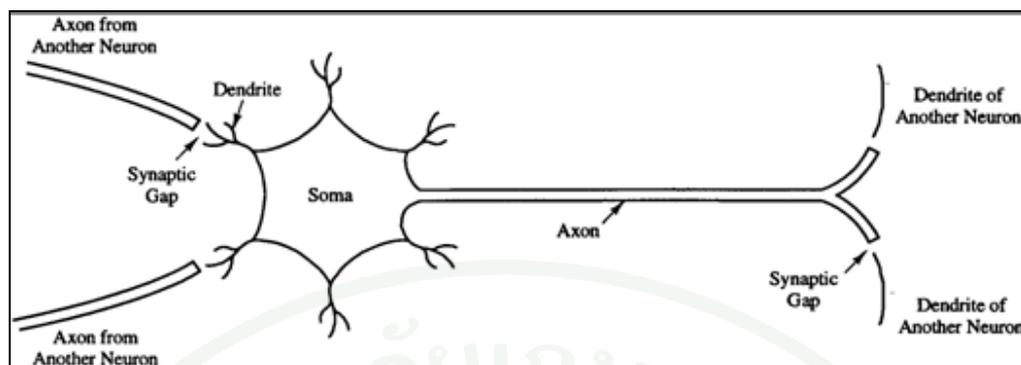
แบบจำลองการถดถอยพหุนาม เป็นแบบจำลองถดถอยที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นจำนวนหลายตัวแปรกับตัวแปรตามหนึ่งตัวแปร แต่ตัวแปรต้นนั้นอยู่ในรูปพหุนามพหุนามอันดับต่างๆและอาจมีพจน์ที่แสดงอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างตัวแปรต้นด้วย ดังสมการที่ 8

$$Y_i = \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^p \beta_k Z_k(X_{ij}) + \varepsilon_i \quad (8)$$

โดยที่	$Y_i$	คือ ตัวแปรตามจากตัวอย่างที่ $i$
	$\beta_k$	คือ สัมประสิทธิ์ของการถดถอย
	$X_{ij}$	คือ ตัวแปรต้นที่ $j$ จากตัวอย่างที่ $i$
	$Z_k(X_{ij})$	คือ สมการฟังก์ชันของ $X_{ij}$
	$\varepsilon_i$	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มของตัวอย่างที่ $i$

## 2. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) เป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Model) ที่สร้างขึ้นมาจากการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Fausett, 1994) แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองที่เลียนแบบการทำงานของเครือข่ายระบบประสาทชีวภาพเช่นในสมองหรือระบบประสาทของสิ่งมีชีวิต โครงสร้างของระบบประสาทชีวภาพประกอบด้วยนิวรอนจำนวนมากที่จะมีการส่งสัญญาณในรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจากนิวรอนตัวหนึ่งสู่นิวรอนอีกตัวหนึ่ง ระหว่างทางสัญญาณไฟฟ้านั้นจะผ่านกระบวนการทางเคมีที่มีการปรับสัญญาณไฟฟ้าที่เข้ามาในช่องว่างไซแนป (Synaptic Gap) จากนั้นจะไปรวมที่จุดรวมสัญญาณในส่วนเซลล์ประสาท (Soma) จนมีสัญญาณมากพอถึงระดับหนึ่งแล้วจะถูกส่งต่อไปยังนิวรอนอื่น



ภาพที่ 6 เครือข่ายประสาทเทียมชีวภาพ

ที่มา: Fausett (1994)

## 2.1 องค์ประกอบของเครือข่ายประสาทชีวภาพ

เครือข่ายประสาทชีวภาพมี 4 องค์ประกอบหลักคือ

2.1.1 แอกซอน (Axon) เป็นช่องทางผ่านของสัญญาณไฟฟ้าในระบบประสาท

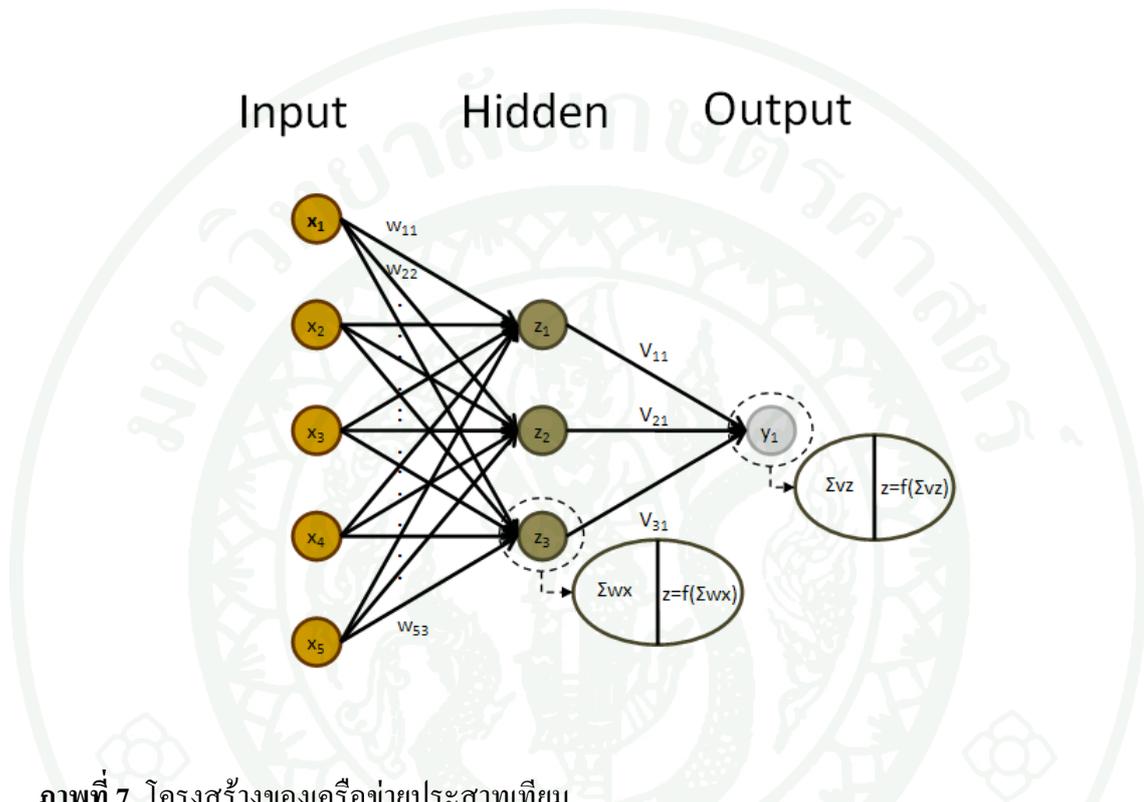
2.1.2 เดนไดรต์ (Dendrite) เป็นฝอยแขนงของระบบประสาทตรงส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างช่องว่างไซแนปส์กับตัวเซลล์

2.1.3 ไซแนปส์ (Synapse) เป็นช่องว่างระหว่างแอกซอนกับเดนไดรต์ เป็นจุดส่งถ่ายข้อมูล

2.1.4 ตัวเซลล์หรือโซมา (Soma) เป็นจุดรวมสัญญาณ สัญญาณที่มารวมที่โซมาจะถูกรวบรวมไว้จนถึงค่าความจุหนึ่งก่อนถึงจะถูกปลดปล่อยผ่านแอกซอนออกไป

## 2.2 องค์ประกอบของเครือข่ายประสาทเทียม

เครือข่ายประสาทเทียมจะมีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่คล้ายคลึงกันกับเครือข่ายประสาททางชีวภาพ แต่จะดัดแปลงมาเป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งสรุปองค์ประกอบของเครือข่ายประสาทเทียมได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 โครงสร้างของเครือข่ายประสาทเทียม

2.2.1 นิวรอนนำเข้า (Input Neuron) คือนิวรอนที่เป็นตัวผ่านข้อมูลหรือสัญญาณจากภายนอกเข้าไปประมวลผลในเครือข่ายประสาทเทียม ( $x_i$ )

2.2.2 น้ำหนักที่เส้นเชื่อมโยง (Weight) คือค่าคงที่ที่กำกับไว้ที่แต่ละเส้นเชื่อม ซึ่งเชื่อมระหว่างแต่ละนิวรอนในชั้นเดียวกันหรือระหว่างชั้น ( $w_{ij}$  และ  $v_{jk}$ )

2.2.3 นิวรอนชั้นซ่อน (Hidden Neuron) คือนิวรอนที่เชื่อมต่ออยู่ในชั้นระหว่างนิวรอนนำเข้าและนิวรอนผลลัพธ์ ( $z_j$ )

2.2.4 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation Function) คือฟังก์ชันคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณผลลัพธ์ หรือค่ากระตุ้นที่นิวรอนประมวลผล ฟังก์ชันกระตุ้นที่นิยมใช้กันมีดังนี้

ก. ฟังก์ชันบ่งชี้ (Identity Function) เป็นฟังก์ชันที่ให้ผลลัพธ์เท่ากับข้อมูลนำเข้า

ข. ฟังก์ชันไบนารี (Binary Step Function) เป็นฟังก์ชันที่ให้ผลลัพธ์ 2 ค่าคือ 1 หรือ 0 สำหรับข้อมูลนำเข้าแบบไบนารีและ 1 หรือ -1 สำหรับข้อมูลนำเข้าแบบไบโพลาร์

ค. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Function) เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน (Nonlinear Function) มีลักษณะผลลัพธ์คล้ายตัว S ฟังก์ชันสำหรับข้อมูลนำเข้าแบบไบนารีแสดงดังสมการที่ 9 และ ฟังก์ชันสำหรับข้อมูลนำเข้าแบบไบโพลาร์แสดงดังสมการที่ 10

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\sigma x)} \quad (9)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าพารามิเตอร์ของความชัน

$$f(x) = \frac{1 - \exp(-\sigma x)}{1 + \exp(-\sigma x)} \quad (10)$$

ง. ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิกแทนเจน (Hyperbolic Tangent) เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนมีผลลัพธ์อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 และฟังก์ชันแสดงดังสมการที่ 11

$$f(x) = \frac{1 - \exp(-2x)}{1 + \exp(-2x)} \quad (11)$$

2.2.5 อัตราการเรียนรู้และโมเมนตัม (Learning Rate and Momentum) คือค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกว่าเครือข่ายประสาทเทียมจะปรับน้ำหนักไปในอัตรามากน้อยหรือไปในทิศทางใด โดยการใช้อัตราการเรียนรู้ต่ำจะทำให้เครือข่ายประสาทเทียมมีระยะเวลาในการเรียนรู้นาน ในทางกลับกันหากอัตราการเรียนรู้สูงการปรับน้ำหนักจะใช้ระยะเวลาน้อย โดยที่จะปรับน้ำหนักไปในทิศทางลดค่าความคลาดเคลื่อน ส่วนค่าโมเมนตัมจะช่วยในการควบคุมอัตราการเรียนรู้และยอมให้มีการปรับน้ำหนักไปในทิศทางที่เพิ่มค่าความคลาดเคลื่อนได้จึงช่วยควบคุมให้เครือข่ายปรับน้ำหนักไปในทิศทางที่ไม่ตกสู่จุดค่าความคลาดเคลื่อนของการเรียนรู้ไม่ต่ำที่สุด (Local Minimum of Error) (Fausett, 1994)

2.2.6 นิวรอนผลลัพธ์ (Output Neuron) คือนิวรอนที่เชื่อมต่อกับนิวรอนในชั้นซ่อนสุดท้ายทำหน้าที่ส่งผลลัพธ์ หรือค่ากระตุ้นออกจากเครือข่ายประสาทเทียม ( $y_k$ )

### 2.3 หลักการทำงานของเครือข่ายประสาทเทียม

การทำงานของเครือข่ายประสาทเทียมเริ่มจากข้อมูลจากภายนอกถูกป้อนเข้ามาสู่ชั้นนิวรอนนำเข้า นิวรอนนำเข้าจะผ่านข้อมูลเข้าสู่ระบบเครือข่ายประสาทเทียม โดยผ่านเส้นเชื่อมต่อที่มีค่าน้ำหนักเฉพาะกำกับ ค่าน้ำหนักนี้เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับข้อมูลนำเข้าที่ส่งไปยังนิวรอนประมวลผล เมื่อข้อมูลที่มีการปรับน้ำหนักแล้วส่งเข้าสู่นิวรอนประมวลผลในชั้นถัดไปคือชั้นซ่อนหรือชั้นผลลัพธ์ นิวรอนประมวลผลจะรวมค่าข้อมูลที่ปรับน้ำหนักแล้วไปผ่านฟังก์ชันกระตุ้น เพื่อคำนวณผลลัพธ์แล้วส่งต่อไปยังชั้นถัดขึ้นไปหรือเป็นผลลัพธ์ของเครือข่าย

### 2.4 ลักษณะสำคัญที่ใช้ในการกำหนดประเภทของเครือข่ายประสาทเทียม

ลักษณะสำคัญที่ใช้ในการกำหนดประเภทของเครือข่ายประสาทเทียมมีดังต่อไปนี้

#### 2.4.1 โครงสร้างพื้นฐานของการจัดเรียงชั้นนิวรอน

ก. เครือข่ายแบบชั้นเดียว (Single Layer Net) หมายถึงเครือข่ายประสาทเทียมแบบเบื้องต้นที่มีเพียงชั้นนำเข้าและชั้นผลลัพธ์เท่านั้น เป็นเครือข่ายประสาทเทียมที่ใช้แก้ปัญหาไม่ซับซ้อน

ข. เครือข่ายแบบหลายชั้น (Multilayer Net) หมายถึง เครือข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยชั้นซ่อนอย่างน้อย 1 ชั้นขึ้นไป โดยชั้นซ่อนนี้จะอยู่ระหว่างนิวรอนชั้นนำเข้าและนิวรอนชั้นผลลัพธ์และทำหน้าที่ประมวลผล เครือข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นนี้จะสามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมากได้ เช่นเครือข่ายแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

## 2.4.2 รูปแบบการเชื่อมโยงระหว่างชั้นนิวรอน

ก. เครือข่ายแบบส่งข้อมูลไปด้านหน้าเท่านั้น (Feedforward Net) หมายถึงแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่นิวรอนนำเข้าจะไม่เชื่อมโยงกับนิวรอนในชั้นนำเข้าตัวเอง แต่จะเชื่อมโยงกับนิวรอนในชั้นถัดไปและจะส่งสัญญาณไปในชั้นถัดไปเท่านั้น เช่น เครือข่ายแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

ข. เครือข่ายแบบมีการส่งสัญญาณตอบกลับ (Recurrent Net) หมายถึงแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมที่นิวรอนในชั้นนำเข้ามีการเชื่อมโยงกับชั้นถัดไป หรือจะเชื่อมโยงกับนิวรอนในชั้นนำเข้าเองก็ได้ โดยสัญญาณจะสามารถถูกส่งไปด้านหน้าสู่ชั้นถัดไปหรือมีการส่งสัญญาณย้อนกลับมายังชั้นก่อนหน้าได้

## 2.4.3 ลักษณะการเรียนรู้พื้นฐาน

การเรียนรู้ของเครือข่ายได้แก่การกำหนดค่าน้ำหนักให้กับเส้นเชื่อมโยงจากผลการเรียนรู้ เพื่อให้เครือข่ายสามารถแก้ปัญหาได้ การเรียนรู้พื้นฐานของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมมี 2 ประเภทหลักดังนี้

ก. การเรียนรู้แบบมีผู้สอน (Supervised Learning) การเรียนรู้แบบมีผู้สอนนี้จะต้องมีข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์เป้าหมายเพื่อให้เครือข่ายประสาทเทียมปรับค่าน้ำหนักของเส้นเชื่อมโยงจนทำให้ได้ผลลัพธ์ของเครือข่ายที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เท่านั้น เช่น เครือข่ายแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

ข. การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised Learning) การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนนี้จะให้เครือข่ายเรียนรู้ด้วยตนเอง โดยไม่มีการกำหนดผลลัพธ์เป้าหมาย และจะปรับค่าน้ำหนักเพื่อจัดกลุ่มข้อมูลนำเข้าที่เหมือนกันไว้ในกลุ่มเดียวกัน เช่น Kohonen Self-Organizing Maps (SOM)

## 2.5 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับ

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับ (Backpropagation Neural Network; BPN) ได้แก่ เครือข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น มีการเชื่อมโยงข้อมูลแบบไปข้างหน้าเท่านั้น โดยขั้นตอนทำงานของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับหลักมีด้วยกัน 3 ขั้นตอนคือการส่งข้อมูลไปประมวลผล คำนวณและส่งค่าความคลาดเคลื่อนกลับ และปรับค่าน้ำหนักที่เส้นเชื่อมโยงในแต่ละเส้น

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมในแต่ละแบบจะมีวิธีการเรียนรู้และปรับน้ำหนักของค่าคงที่ที่เส้นเชื่อมโยงเป็นเอกลักษณ์ของตัวเอง โดยแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับจะมีวิธีการเรียนรู้และปรับน้ำหนักดังนี้

### 2.5.1 การส่งข้อมูลไปประมวลผล

ก. เริ่มต้นที่นิวรอนนำเข้ารับข้อมูลจากภายนอกแล้วส่งสัญญาณต่อไปตามเส้นเชื่อมโยงเพื่อปรับน้ำหนักแล้วส่งต่อสู่นิวรอนในชั้นซ่อน

ข. นิวรอนที่ชั้นซ่อนทำการรวบรวมข้อมูลที่ปรับค่าน้ำหนักแล้วจากทุกเส้นเชื่อมโยงและนำไปประมวลผลโดยผ่านฟังก์ชันกระตุ้นแล้วส่งผลลัพธ์หรือค่ากระตุ้นได้ต่อไปยังชั้นผลลัพธ์

ค. นิวรอนในชั้นผลลัพธ์จะรวมค่าผลลัพธ์หรือค่ากระตุ้นของนิวรอนชั้นซ่อนที่ผ่านการปรับน้ำหนักแล้วจากนั้นนำผลรวมไปผ่านฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อคำนวณผลลัพธ์ของเครือข่าย

### 2.5.2 คำนวณและส่งค่าคลาดเคลื่อนย้อนกลับ

ก. นำผลลัพธ์ที่ได้จากเครือข่ายในข้อ 2.5.1 มาเปรียบเทียบกับค่าจริงจากข้อมูล ที่เรียกว่าผลลัพธ์เป้าหมายเพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน

ข. นำข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนส่งกลับไปยังนิวรอนในชั้นซ่อนและคำนวณหาค่าน้ำหนักที่จะใช้ปรับในเส้นเชื่อมโยงระหว่างชั้นผลลัพธ์กับชั้นซ่อน

ค. นำข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนจากนิเวรอนในชั้นซ่อนส่งกลับไปยังนิเวรอนชั้นนำเข้าเพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักที่จะใช้ปรับในเส้นเชื่อมโยงระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นนำเข้า

### 2.5.3 ปรับค่าน้ำหนักที่เส้นเชื่อมโยงพร้อมกันทั้งเครือข่าย

## 2.6 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี (Radial Basis Function Network; RBFN) เป็นแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นที่มีการเชื่อมโยงข้อมูลแบบไปด้านหน้าเท่านั้นคล้ายแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับความแตกต่างอยู่ที่กลไกในการเรียนรู้หรือการประมวลผล

แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมีจะเรียนรู้หรือประมวลผลแบบไม่มีผู้สอนที่ชั้นซ่อน โดยฟังก์ชันที่ใช้ในการประมวลผลจะอยู่บนพื้นฐานของรัศมีที่เรียกว่า Radial Basis Function (RBF) หรือ Kernel Function ดังสมการที่ 12 การเรียนรู้ในชั้นแรกนี้เพื่อกำหนดค่าศูนย์กลางของหน่วยซ่อน และความกว้างของรัศมีทำการของฟังก์ชันที่เหมาะสม

$$z_j(\mathbf{x}) = K \left( \frac{\|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_j\|}{\sigma_j} \right) \quad (12)$$

โดยที่	$Z_j$	คือ ค่ากระตุ้นของหน่วยซ่อนที่ $j$
	$K$	คือ ฟังก์ชันรัศมีสมมาตร
	$\mathbf{x}$	คือ เวกเตอร์นำเข้า
	$\boldsymbol{\mu}_j$	คือ ศูนย์กลางของหน่วยซ่อนที่ $j$
	$\sigma_j$	คือ ความกว้างรัศมีทำการของหน่วยซ่อนที่ $j$

ฟังก์ชันดังกล่าวนั้นจะมีค่าสูงที่สุดที่จุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน (Zhang and Zhang, 2004; Shamsavand and Ahmadpour, 2005) ส่วนการเรียนรู้หรือประมวลผลที่ชั้นผลลัพธ์นั้นจะเป็นแบบมีผู้สอนและเป็นเพียงแค่การรวมผลลัพธ์ของหน่วยซ่อนที่มีการปรับน้ำหนักที่เส้นเชื่อมโยงระหว่างหน่วยซ่อนกับหน่วยผลลัพธ์เท่านั้น โดยรายละเอียดการเรียนรู้และปรับน้ำหนักของแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมีมีดังนี้

### 2.6.1 การส่งข้อมูลไปประมวลผล

ก. เริ่มจากนิรอนนำเข้ารับข้อมูลจากภายนอกเข้าแล้วส่งสัญญาณไปยังนิรอนในชั้นซ่อน

ข. นิรอนในชั้นซ่อนใช้ข้อมูลนำเข้าในการคำนวณหาค่าศูนย์กลางฟังก์ชัน RBF ซึ่งมักจะใช้วิธี K-means และคำนวณหารัศมีทำการหรือความกว้างของฟังก์ชัน ซึ่งมักจะคำนวณด้วยระยะทางเฉลี่ยในหน่วยยูคลิเดียน (Mean Euclidean Distance) แล้วประมวลผลเพื่อคำนวณค่าผลลัพธ์ หรือค่ากระตุ้นของหน่วยซ่อนจากนั้นจึงส่งสัญญาณผ่านเส้นเชื่อมโยงแล้วปรับน้ำหนักไปยังนิรอนในชั้นผลลัพธ์

ค. นิรอนในชั้นผลลัพธ์จะรวมผลลัพธ์หรือค่ากระตุ้นของนิรอนในชั้นซ่อนที่ผ่านการปรับน้ำหนักมาแล้วเป็นผลลัพธ์ของเครือข่าย

2.6.2 คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนและน้ำหนักที่จะใช้ปรับกลับ และส่งค่าความคลาดเคลื่อนและน้ำหนักที่จะใช้ปรับกลับไปยังเส้นเชื่อมโยงเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้แก่แบบจำลองในการประมวลผลครั้งต่อไป

### 2.6.3 ปรับค่าน้ำหนักที่เส้นเชื่อมโยง

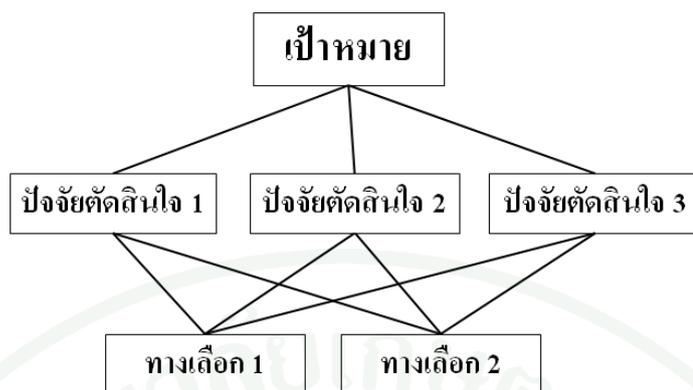
## กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process; AHP) หมายถึง กระบวนการในการตัดสินใจเลือกทางเลือกหลาย ๆ อย่างเป็นระบบเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบที่เหมาะสมที่สุดจากปัจจัยหลาย ๆ ตัวและบุคคลที่เกี่ยวข้องกับเรื่องใด ๆ ที่ต้องการตัดสินใจ กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นถูกนำไปใช้ในหลายสาขาวิชาเช่น การวางแผนการขนส่ง การตลาด การคัดสรรบุคคลเข้าทำงาน เป็นต้น (Canada, 1989) หลักการตัดสินใจต่อปัญหาของ กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจ (Decision Hierarchy) โดยการนำปัญหามาแบ่งย่อย เป็นลำดับชั้น โดยการกำหนดเป้าหมาย (Objective) ปัจจัยตัดสินใจ (Attribute) และทางเลือก (Alternative)
2. เปรียบเทียบความสำคัญสัมพัทธ์ของปัจจัยตัดสินใจ
3. เปรียบเทียบการประเมินสัมพัทธ์ของทางเลือกในแง่ปัจจัยตัดสินใจแต่ละตัว
4. ตรวจสอบความสอดคล้องของการเปรียบเทียบทั้งหมด
5. ระบุทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด

### 1. การกำหนดเป้าหมายและปัจจัยตัดสินใจ

กำหนดเป้าหมาย ปัจจัยตัดสินใจ และทางเลือกจากปัญหา แล้วสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจ โดยที่เป้าหมายที่ต้องการตัดสินใจจะอยู่ที่ระดับชั้นที่ 1 หรือระดับชั้นบนสุด แล้วให้ปัจจัยตัดสินใจ อยู่ในระดับชั้นที่ 2 และให้ทางเลือกที่ถูกตัดสินใจในระดับชั้นที่ 3 ดังในภาพที่ 5 ปัจจัยตัดสินใจแต่ละตัวควรจะเป็นอิสระต่อกัน สำหรับปัจจัยตัดสินใจนั้นสามารถกำหนดปัจจัยตัดสินใจย่อยได้ซึ่งจะเกิดเป็นระดับชั้นย่อยต่อมาจากระดับชั้นที่ 2 กลายเป็นระดับชั้นที่ 3 และระดับชั้นของทางเลือกจะถูกเลื่อนออกไปอีกหนึ่งขั้นคือ ระดับชั้นที่ 4 (Saaty, 1996)



ภาพที่ 8 ลำดับชั้นการวิเคราะห์ในกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

ที่มา: คัดแปลงจาก Canada (1996)

## 2. การเปรียบเทียบความสำคัญสัมพัทธ์ของปัจจัยตัดสินใจ

การให้น้ำหนักความสำคัญสำหรับปัจจัยตัดสินใจหลักและปัจจัยตัดสินใจย่อยทำได้โดยดำเนินการเปรียบเทียบน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยตัดสินใจเพื่อกำหนดระดับความสำคัญแก่ทุกปัจจัยตัดสินใจ โดยการเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ (Pairwise Comparison) ซึ่งกระทำโดยบุคคลที่มีความรู้และเข้าใจกับเป้าหมายที่ต้องการตัดสินใจเพื่อให้ได้ค่าความสำคัญที่ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด การเปรียบเทียบระหว่าง 2 ปัจจัยตัดสินใจ เช่นระหว่าง X กับ Y จะใช้คะแนน 1 ถึง 9 และค่าส่วนกลับ (Reciprocal) ซึ่งแสดงถึงระดับความสำคัญของปัจจัยหนึ่งเหนืออีกปัจจัยหนึ่ง สำหรับค่าส่วนกลับนั้นใช้กับการเปรียบเทียบเมื่อความสำคัญนั้นสลับกัน (Inversion Comparison) เช่น ต้องการเปรียบเทียบ Y เทียบกับ X แทนที่จะเป็น X เทียบกับ Y ก็จะใช้ค่าส่วนกลับของการเปรียบเทียบ X เทียบกับ Y ในตอนแรกในการแสดงผล (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 มาตรฐานในการเปรียบเทียบปัจจัยตัดสินใจเป็นคู่ ๆ ระหว่าง X กับ Y

ระดับความ ความสำคัญ	ใช้กรณีที่ X นั้นเทียบกับ Y	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 ปัจจัยส่งผลกระทบต่อเป้าหมายเท่าๆ กัน
3	สำคัญกว่าเล็กน้อย	การวินิจฉัยแสดงถึงความสำคัญของปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับเล็กน้อย
5	สำคัญกว่าปานกลาง	การวินิจฉัยแสดงถึงความสำคัญของปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับปานกลาง
7	สำคัญกว่ามาก	ปัจจัยหนึ่งมีความสำคัญกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับอีกปัจจัยหนึ่ง ในทางปฏิบัติปัจจัยนั้นมีอิทธิพลเหนือกว่าอย่างเห็นได้ชัด
9	สำคัญกว่ามากที่สุด	มีหลักฐานยืนยันความสำคัญในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับที่สูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้
2, 4, 6, 8	สำหรับระดับความสำคัญที่อยู่ระหว่างกลางเพื่อลดช่องว่างระหว่างระดับความรู้สึกลับ	

ที่มา: Saaty (1996)

ค่าระดับคะแนนที่ได้จากการเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ ตลอดทุกคู่ที่เป็นไปได้ จะนำมารวมกันเป็นเมตริกซ์ของค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยตัดสินใจ และคำนวณผลรวมน้ำหนักก่อนจะนำมาปรับให้อยู่ในระดับมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) คะแนนที่ถูกปรับแล้วซึ่งจะทำให้มีผลรวมเป็น 1 ดังนั้นสามารถใช้เป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยตัดสินใจแต่ละตัว

### 3. การประเมินทางเลือกในแง่ปัจจัยตัดสินใจ

ในการประเมินคะแนนสัมพัทธ์ให้กับทางเลือกเมื่อพิจารณาจากปัจจัยตัดสินใจแต่ละตัวนั้น ถ้าปัจจัยตัดสินใจอยู่ในรูปเชิงคุณภาพ จะใช้การเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ ๆ ตามปัจจัยตัดสินใจแต่ละตัว โดยใช้คะแนนมาตรฐานที่ระบุไว้ในข้อ 2 โดยให้บุคคลที่มีความรู้และเข้าใจกับทุก

ทางเลือกที่ต้องการตัดสินใจเพื่อให้ได้ลำดับตรงกับความ เป็นจริงมากที่สุด แต่สำหรับปัจจัยตัดสินใจที่เป็นเชิงปริมาณให้นำค่าตัวเลขมาปรับให้อยู่ในระดับมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) ให้มีผลรวมเป็น 1 จากนั้นสามารถใช้สัดส่วนที่ปรับมาตรฐานแล้วเป็นค่าคะแนนประเมินได้

#### 4. การตรวจสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจ

ในการให้คะแนนเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ ของบุคคลหลาย ๆ รายอาจเกิดความไม่สอดคล้องในการให้คะแนนขึ้นได้ จึงต้องมีการตรวจสอบความสอดคล้องให้ค่าน้ำหนักของ ความสำคัญของปัจจัยตัดสินใจ และน้ำหนักในการจัดลำดับของทางเลือกเมื่อพิจารณาปัจจัยแต่ละตัว การตรวจสอบความสอดคล้องทำได้โดยการคำนวณความสอดคล้อง (Consistency Ratio) หรือค่า CR จากเมตริกซ์การเปรียบเทียบ ค่า CR ที่ได้จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.10 (Canada, 1996) จึงจะถือว่าคะแนนที่ให้มีความสอดคล้องสามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจเป้าหมายได้

#### 5. การตัดสินใจว่าทางเลือกใดเหมาะสมที่สุด

เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่จะตัดสินใจว่าทางเลือกใดเป็นทางเลือกที่เหมาะสมต่อเป้าหมายที่ตั้งไว้มากที่สุด โดยการคำนวณคะแนนรวมที่ได้จากการประเมินของแต่ละทางเลือกตามสมการที่ 13

$$\text{คะแนนรวมของทางเลือกที่ } k = \sum_{\text{ทุก } i \text{ ปัจจัยตัดสินใจ}} (\text{น้ำหนักความสำคัญของปัจจัยตัดสินใจใน } i \times \text{คะแนนประเมินของทางเลือกที่ } k \text{ ในปัจจัยตัดสินใจที่ } i) \quad (13)$$

ทางเลือกใดมีค่าคะแนนรวมสูงที่สุด ทางเลือกนั้นจะเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเป้าหมายที่กำหนดไว้

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกสามารถทำได้หลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การศึกษาลักษณะการเลี้ยวรูปของแผ่นกระดาษลูกฟูก การศึกษาการทนทานต่อการยืดตัวของแผ่นกระดาษลูกฟูก การศึกษาความแข็งแรงของการยึดตัวในแต่ละชั้นของแผ่นกระดาษลูกฟูก การศึกษาแรงดันทะลุแผ่นกระดาษลูกฟูก การศึกษาความต้านทานแรงกดวงแหวนของแผ่นกระดาษลูกฟูก การศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักกระดาษ เป็นต้น ถึงแม้ว่าการศึกษาคูสมบัติแต่ละประเภทจะมีวิธีการแตกต่างกัน แต่การศึกษาทุกประเภทที่กล่าวมาข้างต้นคำนึงถึงค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก การทดสอบหาค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกโดยตรงได้แก่ การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งการทดสอบนี้วิเคราะห์แรงกระทำในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ในขณะที่แรงกระทำในแนวตั้งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการรองรับน้ำหนักของกล่องกระดาษลูกฟูกซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สร้างจากแผ่นกระดาษลูกฟูก การศึกษาคูสมบัติของแผ่นกระดาษลูกฟูกเริ่มจาก Mckee *et al.* (1961) ที่ทดสอบหาค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ค่าความสูงและความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูกในระดับต่าง ๆ พบว่าค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งนี้สามารถเป็นตัวแทนของความแข็งแรงของกระดาษลูกฟูกในแนวขวางเครื่องจักรหรือแนวเดียวกับการใช้งานในการรองรับน้ำหนักได้ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงที่พบคือ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกระดาษลูกฟูก รวมถึงความสูงและความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก ผู้วิจัยสรุปว่าในงานวิจัยชิ้นนี้ยังมีจุดอ่อนอยู่ที่การเตรียมชิ้นตัวอย่างแผ่นกระดาษลูกฟูกยังไม่ดีพอทำให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่น้อยกว่าความเป็นจริง หลังจากนั้นได้มีการทำการวิจัยเจาะลึกถึงแผ่นกระดาษที่เป็นส่วนประกอบของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดย The Institute of Paper Chemistry (1965) ซึ่งศึกษาผลกระทบของมิติด้านรูปร่างของตัวอย่างกระดาษแผ่นเรียบต่อความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบ และกระดาษทำลอน โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงความสูงเพียงเล็กน้อยไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนจะลดลงเมื่อเพิ่มความสูงและมีไม่มีลักษณะการเลี้ยวรูปอย่างมีรูปแบบ ต่อมา Whitsitt and Mckee (1966) ได้ศึกษาผลกระทบของรูปร่างกล่องกระดาษลูกฟูกและความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกในการรองรับน้ำหนักวางซ้อน ได้ผลว่าค่าความแข็งแรงของกล่องกระดาษลูกฟูกในแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด และพบเพิ่มเติมว่าระยะเวลาในการรับน้ำหนักจะขึ้นกับเส้นรอบรูปและความสูงของกล่องกระดาษลูกฟูก โดยที่ระยะเวลาในการรองรับน้ำหนักจะนานขึ้นเมื่อเส้นรอบรูปน้อย ในทางกลับกันระยะเวลาในการรองรับน้ำหนักจะนานขึ้นเมื่อความสูง ความหนาและค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของ

แผ่นกระดาษลูกฟูกมากขึ้น นอกจากนี้ความสูงของกล่องกระดาษลูกฟูกซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาและค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทดสอบทำให้ไม่สามารถยืนยันลักษณะความสัมพันธ์อย่างแน่นอนได้แต่สามารถยืนยันได้ว่ากล่องกระดาษลูกฟูกแบบ 5 ชั้นมีความสามารถในการรองรับน้ำหนักมากกว่าแบบ 3 ชั้น

ในช่วงถัดมาการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกและกล่องกระดาษจะมุ่งไปที่ผลขององค์ประกอบของกระดาษลูกฟูกต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก วิธีการทดสอบรวมไปถึงการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบหาค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก หรือการวิเคราะห์กระบวนการผลิตแผ่นกระดาษลูกฟูกในโรงงาน ทว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกมีดังนี้ ในปี ค.ศ. 1982 Hahn *et al.* ได้ศึกษาลักษณะการเสียรูปของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากการทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งต่ออุปกรณ์ยึดแผ่นกระดาษลูกฟูกระหว่างการทดสอบ นักวิจัยใช้แบบจำลองการถอดอยในการจำลองการโค้งในการเสียรูปต่อแรงกระทำ ได้ผลว่าลักษณะการเสียรูปจะเป็นไปในทิศทางที่ไม่เป็นเส้นตรงจะเป็นเส้นโค้ง โดยจะเสียรูปในลักษณะโค้งจากจุดเริ่มต้นมากขึ้นเรื่อยๆ และจะโค้งออกมาเมื่อเพิ่มแรงกดกระทำมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1985 Whitsitt ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งพบว่าลักษณะในการเสียรูปของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง นอกจากนี้ยังได้พยายามหาความต้านทานแรงกดดวงแหวนของแผ่นกระดาษและสรุปว่าความต้านทานแรงกดดวงแหวนของแผ่นกระดาษจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อนำมาประกอบเป็นแผ่นกระดาษลูกฟูก ซึ่งหมายความว่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะมีค่ามากกว่าการนำค่าความต้านทานแรงกดดวงแหวนของแผ่นกระดาษที่เป็นส่วนประกอบมารวมกัน ต่อมา Whitsitt (1988) ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยกระบวนการผลิตที่มีผลต่อคุณสมบัติของแผ่นและกล่องกระดาษลูกฟูก โดยศึกษาปัจจัยการผลิตดังต่อไปนี้ เพิ่มความดันในช่วงการผลิตแบบเปียก ลดทิศทางในการเลื่อนตัวของกระดาษระหว่างการผลิต และการเพิ่มความแข็งแรงในแก่กระดาษ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่าความต้านทานแรงกดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความดันในช่วงผลิตด้วยวิธีการผลิตแบบเปียกเนื่องจากช่วยเพิ่มพันธะในการจับตัวของเส้นใย ในขณะที่การเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษแผ่นเรียบส่งผลให้เกิดการเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกและการคงรูปได้ ซึ่งมีความสำคัญโดยตรงต่อคุณสมบัติในการใช้งานของกล่องกระดาษลูกฟูก อีก 5 เดือนต่อมา Schramper and Whitsitt (1988) ศึกษาเพื่อปรับปรุงวิธีการทดสอบค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในแง่ความง่ายและความรวดเร็วของวิธีการเพื่อเป็นทางเลือกใหม่แก่การทดสอบค่าความต้านทานแรง

กคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูก วิธีการทดสอบใหม่ที่ผู้วิจัยแนะนำให้เปลี่ยนแปลงขนาดของ ชั้นแผ่นกระดาดลูกฟูกตัวอย่าง และมีเครื่องรองรับที่ยึดกับชั้นตัวอย่างเฉพาะในช่วงต้นของการ ทดสอบ

หลังจากการทำวิจัยเจาะลึกเกี่ยวกับปัจจัยและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบค่า ความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกแล้วแนวของงานวิจัยก็เปลี่ยนเป็นการสร้าง แบบจำลองทำนายค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาด ซึ่งมีผู้วิจัยหลายรายแต่ แบบจำลองที่เป็นที่นิยมและถูกนำไปใช้จริงมีดังนี้ Whitsitt (1990) สร้างแบบจำลองที่ทำนายค่า ความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกจากค่าความต้านทานแรงกควงแหวนของ แผ่นกระดาดแผ่นเรียบและกระดาดทำลอน โดยพัฒนาแบบจำลองจำนวน 2 แบบจำลอง แบบจำลอง แรกใช้สำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้งที่อยู่ระหว่าง 4.0-5.6 kN/m และอีกแบบจำลอง ใไว้ทำนายค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้งที่อยู่ระหว่าง 6.6-10.5 kN/m แบบจำลองของ Whitsitt นี้เป็น แบบจำลองที่สามารถทำความเข้าใจแล้วนำไปใช้งานได้ง่ายจึงได้รับความสนใจและถูกนำไปอ้างอิง ถึงในอีกหลายงานจนถึงปัจจุบัน ในปีเดียวกัน Urbanik (1990) พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ค่าความ ต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกให้มีความถูกต้องแล้วสรุปเป็นทฤษฎีของความ ต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูก และสร้างสมการความสัมพันธ์ที่นำไปทำนายค่า ความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกแบบ 3 ชั้น ได้ดีแต่แบบจำลองอยู่ในรูปตัว แปรและค่าสัมประสิทธิ์ทางคณิตศาสตร์จำนวนมากจนทำให้บุคคลทั่วไปยากต่อการทำความเข้าใจ และมีกรนำไปใช้น้อยมาก ต่อมา Kroeschell (1992) ทำการวิจัยหาข้อดีและข้อจำกัดในการทดสอบ ค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูก พบว่าค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้ง ของแผ่นกระดาดลูกฟูกไม่มีความอ่อนไหวต่อกระบวนการผลิตแผ่นกระดาดลูกฟูก และสรุปว่าค่า ความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกมีความเกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานแรงกค ในแนวตั้งของกล่องกระดาดลูกฟูกจริง แต่หากผู้วิจัยต้องการสร้างกล่องที่มีประสิทธิภาพในการใช้ งานได้ดีจะมองในแง่ของความต้านทานเพียงอย่างเดียวไม่ได้ต่อมา Westerlind and Carlsson (1992) ทำการทดสอบค่าความต้านทานในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกด้วยวิธีที่ทำให้การวัดมีความ แม่นยำ โดยการสร้างตัวช่วยรองรับแผ่นกระดาดลูกฟูกทำให้แผ่นกระดาดไม่เสีรูปเนื่องจาก ลักษณะการเสีรูปที่ต่างกันมีผลต่อค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้ง ทว่าพบว่าค่าความต้านทาน แรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง และยังคงลองสร้างแบบจำลอง ที่ทำนายค่าความต้านทานแรงกคในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกขึ้นจากการรวมค่าความ ต้านทานในแนวตั้งขององค์ประกอบแผ่นกระดาดลูกฟูกซึ่งคล้ายคลึงกับแบบจำลองของ Whitsitt แต่แตกต่างกันที่ค่าคงที่ในแบบจำลอง

งานวิจัยเกี่ยวกับแผ่นกระดาษลูกฟูกยังคงดำเนินต่อไป แต่ละผู้วิจัยได้ใช้ความสามารถที่ตนเองถนัดประยุกต์และเริ่มเกิดมุมมองในการทำงานวิจัยที่แปลกใหม่ในเรื่องเก่า ในปี ค.ศ. 1994 Batelka ได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกโดยสนใจตัวแปรที่มีผลมาจากกระบวนการผลิตคือ ความเอียงของลอนลูกฟูก ความสูงต่ำของลอนลูกฟูก และแรงดันในเครื่องตัดกระดาษ พบว่า ลอนตรงมากขึ้นไม่เอียง และลอนลูกฟูกสม่ำเสมอ มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง การเพิ่มความดันขึ้นในระดับปานกลางของเครื่องตัดกระดาษทำให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งเพิ่มขึ้น ในเดียวกัน Urbanik *et al.* (1994) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการลดเวลาในการเตรียมขึ้นตัวอย่าง ซึ่งปกติจะต้องเตรียมขึ้นตัวอย่างและควบคุมขึ้นตัวอย่างก่อนนำมาทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการวิจัยนี้หุ้มขึ้นตัวอย่างด้วยพาราฟินหลังจากตัดกระดาษ วิธีนี้จะช่วยทำให้ลดเวลาในการควบคุมขึ้นตัวอย่างจาก 24 ชั่วโมงเหลือ 2 ชั่วโมง โดยที่ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ยังมีงานวิจัยที่เจาะลึกไปถึงกระบวนการผลิตเพื่อที่จะปรับปรุงให้แผ่นกระดาษลูกฟูกมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้นเช่นงานวิจัยของ Orloff *et al.* (1999) นำวิธีการผลิตกระดาษแบบ Impulse Dried คือใช้ตัวให้ความร้อนทำให้กาวแห้งด้านเดียวเข้ามาเปรียบเทียบกับวิธีการผลิตปกติที่ใช้ตัวให้ความร้อนประกบทั้ง 2 ด้าน พบว่าการผลิตกระดาษแบบ Impulse Dried ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกเพิ่มมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยในช่วงปี ค.ศ. 1999 เป็นต้นไปจะเป็นการนำงานวิจัยเก่ามาปรับปรุงหรือการทบทวนซ้ำและนำไปประยุกต์ให้เหมาะสมกับสถานที่และเทคโนโลยีที่ผู้วิจัยมีอยู่ Markstrom (1999) ได้ประมวลความรู้ของแบบจำลองในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยมีแบบจำลองของ Whitsitt เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่ถูกนำมารวมอยู่และได้เสนอแนะให้ปรับค่าคงที่ในแบบจำลองของ Whitsitt ให้เหมาะสมกับข้อมูลค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีอยู่ ทางด้าน Urbanik *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาผลของรูปร่างลอนลูกฟูกต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกและการเสียรูปโค้งงอ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ความสูงลอน ความกว้างที่ฐาน รัศมีความโค้งของลอน ทำการสร้างแบบจำลองความแข็งแรงและการเสียรูปทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงเพื่อจะประมาณค่าในเชิงทฤษฎีของลอนรูปแบบอื่นที่ไม่ได้ทดสอบในการวิจัยนี้ ในปี ค.ศ. 2009 สถาบันผู้กำหนดมาตรฐานสากลในการทำทดลองทางด้านกระดาษและบรรจุภัณฑ์ (Technical Association of the Pulp and Paper Industry; TAPPI) ได้รวบรวมเนื้อหาความรู้ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกกับความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของกล่องกระดาษลูกฟูก และสรุปยืนยันว่าความต้านทานทั้งสองมีความสัมพันธ์กันและสามารถเป็นตัวแทนกันได้ ต่อมา

Dimitrov (2010) ได้นำความรู้พื้นฐานที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองหรือลักษณะปัจจัยต่าง ๆ มาประยุกต์ทำงานวิจัยของตนเองในพื้นที่ว่าช่วงเวลาและสถานที่แตกต่างกันมีโอกาสที่ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะเปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งผลการศึกษาค้นคว้าพบความแตกต่างทางด้านค่าคงที่ในแบบจำลองแต่อยู่บนหลักการพื้นฐานในแง่ปัจจัยต้นเดียวกับงานวิจัยในอดีต



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. วัสดุดิบ

แผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น (Single Wall) และแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น (Double Wall) ที่มีชนิดของกระดาษและน้ำหนักกระดาษดังตารางที่ 4 ส่วนชนิดของลอนลูกฟูกที่ใช้สำหรับการทดสอบมีทั้งหมด 3 ชนิดคือ ลอน B, C และ E

ตารางที่ 4 ชนิดและน้ำหนักกระดาษที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดกระดาษ	น้ำหนักกระดาษ (g/m <sup>2</sup> )			
CA	105	125		
KA	125	150	185	230
KI	125	150	185	
KS	170			

#### 2. เครื่องมือ

- 2.1 เครื่องตัดกระดาษ (Kongsberg XL20, Norway)
- 2.2 ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (WTB Binder KBF 240, Germany)
- 2.3 เครื่องทดสอบความต้านทาน (Testometric Micro 350, England)
- 2.4 โปรแกรม PASW Statistics version 18
- 2.5 โปรแกรม Neural Works Explorer (Student version)
- 2.6 โปรแกรม Minitab version 15
- 2.7 โปรแกรม Expert Choice 2000

## วิธีการ

งานวิจัยนี้พัฒนาและคัดเลือกแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากปัจจัยออกแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนในการวิจัยออกเป็น 5 ส่วนคือ (1) การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ปัจจัยการออกแบบต่าง ๆ (2) การสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (3) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง (4) การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าที่ได้จากแบบจำลอง และ (5) การตัดสินใจเลือกแบบจำลองเพื่อการใช้งานจริง

### 1. การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ปัจจัยการออกแบบต่าง ๆ

ปัจจัยออกแบบที่พิจารณางานวิจัยนี้ได้แก่ จำนวนชั้นของกระดาษลูกฟูก ชนิดของกระดาษ ชนิดของลอนลูกฟูก ความยาว และความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก ดำเนินการหาค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ดังนี้

1.1 ตัดแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ระดับคือ 6, 8, 10 เซนติเมตร และที่ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูกซึ่งเทียบได้กับความสูงของกล่องกระดาษลูกฟูก 3 ระดับคือ 2, 3, 4 เซนติเมตร ซึ่งครอบคลุมการทดสอบมาตรฐาน ISO 3037 (1994) โดยเครื่องตัด Kongsberg XL20

1.2 ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกตามมาตรฐาน ISO 3037 (1994) ด้วยเครื่อง Testometric Micro 350 บันทึกค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกอยู่ในหน่วยกิโลนิวตันต่อเมตร

### 2. การจัดเตรียมข้อมูล

2.1 นำข้อมูลค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ปัจจัยการออกแบบต่าง ๆ มาจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนำเข้าและตัวแปรผลลัพธ์ โดยตัวแปรนำเข้าได้แก่ปัจจัยออกแบบทั้งหมดจำนวน 16 ปัจจัย ในขณะที่ตัวแปรผลลัพธ์ได้แก่ ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกจำนวน 1 ตัวแปรจะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ทั้งหมด 197 ค่า สำหรับปัจจัยออกแบบที่มีค่าเชิงกลุ่ม หรือมาตรนามบัญญัติ (Nominal Scale) ให้ทำ

การเข้ารหัสเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง ในขณะที่ปัจจัยออกแบบที่มีค่าเชิงปริมาณ หรืออยู่ในรูป มาตรฐานอัตราส่วน (Ratio Scale) ให้ใช้ค่าจริงในการสร้างแบบจำลอง การแปลงข้อมูลแสดงในตาราง ที่ 5

ตารางที่ 5 การแปลงข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง

ปัจจัยออกแบบ	ค่ารหัสนำเข้า/ หน่วยวัด
ตัวแปรนำเข้า	
1. ชนิดของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $B_1$ )	CA=1, KA=2, KS=3, KI=4
2. น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_1$ )	กรัมต่อตารางเมตร
3. ชนิดของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $B_2$ )	CA=1, KA=2, KS=3, KI=4
4. น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_2$ )	กรัมต่อตารางเมตร
5. ชนิดของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $B_3$ )	CA=1, KA=2, KS=3, KI=4
6. น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_3$ )	กรัมต่อตารางเมตร
7. ชนิดของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $B_4$ )	CA=1, KA=2, KS=3, KI=4
8. น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_4$ )	กรัมต่อตารางเมตร
9. ชนิดของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $B_5$ )	CA=1, KA=2, KS=3, KI=4
10. น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_5$ )	กรัมต่อตารางเมตร
11. ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก (L)	เซนติเมตร
12. ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก (H)	เซนติเมตร
13. จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนที่ 1 ( $F_{1,m}$ )	ลอนต่อเมตร
14. ความสูงของลอนลูกฟูกของลอนที่ 1 ( $F_{1,h}$ )	มิลลิเมตร
15. จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนที่ 2 ( $F_{2,m}$ )	ลอนต่อเมตร
16. ความสูงของลอนลูกฟูกของลอนที่ 2 ( $F_{2,h}$ )	มิลลิเมตร
ตัวแปรผลลัพธ์	
ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT)	นิวตัน

2.2 นำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปัจจัยออกแบบและค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกทั้งหมด 197 ค่ามาแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่ ชุดฝึก (Training Set) จำนวน 80% ของข้อมูลทั้งหมด และชุดทดสอบ (Testing Set) จำนวน 20% ของข้อมูลทั้งหมด โดยการสุ่มด้วยฟังก์ชัน RAND ใน Microsoft Excel ข้อมูลชุดฝึกจะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ส่วนชุดทดสอบจะใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพในการทำนาย และความสามารถในการใช้งานทั่วไปของแบบจำลอง

### 3. การสร้างแบบจำลองและทดสอบแบบจำลอง

แบบจำลองที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มี 6 ประเภท ได้แก่แบบจำลองดั้งเดิมของ Whitsitt (1990) แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) แบบจำลองการถดถอยพหุคูณ แบบจำลองโพลิโมเนียล แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี และเนื่องจากแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น และ 5 ชั้นมีค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลอง 3 รูปแบบหลักคือ แบบจำลองสำหรับทำนายทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น แบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น และแบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

#### 3.1 แบบจำลองของ Whitsitt (1990)

นำปัจจัยออกแบบต่าง ๆ ยกเว้นความสูง ไปคำนวณค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของแผ่นกระดาษที่ใช้เป็นส่วนประกอบของแผ่นกระดาษลูกฟูก โดยกลุ่มสยามบรรจุกัมภ์ (2553) ดังแสดงในตารางผนวกที่ ข1 แล้วนำมาทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นด้วยแบบจำลองของ Whitsitt (1990) ในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

#### 3.2 แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999)

นำปัจจัยออกแบบต่าง ๆ ยกเว้นความสูงไปคำนวณค่าความต้านทานแรงกดวงแหวน (กลุ่มสยามบรรจุกัมภ์, 2553) แล้วนำมาคำนวณค่าคงที่  $k$  และค่าคงที่  $c$  ที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft Excel (Albright *et al.*, 2005) จากข้อมูลชุดฝึก เพื่อสร้างแบบจำลองที่ปรับจาก

แบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) ตามสมการที่ 3 ค่าคงที่  $k$ ,  $c$  ที่เหมาะสมจะเป็นค่าที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกของข้อมูลในชุดฝึกที่ต่ำที่สุด จากนั้นนำไปทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

### 3.3 แบบจำลองการถดถอย

สร้างและทวนสอบแบบจำลองการถดถอยด้วยโปรแกรม PASW version 18 ดังนี้ นำข้อมูลชุดฝึกมาสร้างแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองถดถอยโพลิโนเมียล ด้วยวิธีการเลือกตัวแปรต้นเข้าไปในสมการถดถอยที่แตกต่างกัน 4 วิธีคือ Enter, Stepwise, Backward, Forward สำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบ โพลิโนเมียลให้แสดงตัวแปรนำเข้าไปในรูปของค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ย  $x_{ij} - \bar{x}_i$  เพื่อลดผลของสหสัมพันธ์ร่วม (Multicollinearity) จากตัวแปรนำเข้า

โดยที่  $x_{ij}$  หมายถึง ค่าตัวแปรปัจจัยการออกแบบที่  $i$  ของข้อมูลลำดับที่  $j$   
 $\bar{x}_i$  หมายถึง ค่าเฉลี่ยของปัจจัยการออกแบบที่  $i$  ตลอดทุก ๆ ลำดับ  $j$

เลือกโครงสร้างและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากค่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ในรูปค่าสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Error; MAE) รากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root Mean Square Error; RMSE) ร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error; MAPE) ที่ต่ำที่สุดของชุดทดสอบ ดังสมการที่ 14, 15 และ 16

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100}{n} \quad (16)$$

โดยที่  $y_i$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ได้จากการทดสอบของข้อมูลลำดับที่  $i$   
 $\hat{y}_i$  คือ ความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ได้จากการทำนายของข้อมูลลำดับที่  $i$   
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลที่ทำนาย

ตรวจสอบความเหมาะสม หรือความน่าเชื่อถือของแบบจำลองการถดถอยประกอบด้วย การตรวจสอบเงื่อนไขทางสถิติ ได้แก่ ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติด้วยวิธี Kolmogorov-Smirnov (Sheskin, 2000) ซึ่งต้องไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่โดยการสร้างแผนภาพระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ที่ต้องไม่พบการกระจายออกที่ปลายใดปลายหนึ่ง ตรวจสอบว่ามีค่าผิดปกติ (Outlier) หรือไม่ ตรวจสอบระดับความรุนแรงของสหสัมพันธ์ร่วมระหว่างตัวแปรต้น (Multicollinearity) ด้วยค่า Variance Inflation Factor (VIF) ซึ่งต้องไม่เกิน 10 (Kutner *et al.*, 2008)

3.4 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

ถึงแม้ว่าการสร้างแบบจำลอง 2 ประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แน่นอนระหว่างตัวแปรนำเข้าและตัวแปรผลลัพธ์ แต่โครงสร้างและพารามิเตอร์ในการเรียนรู้มีผลต่อความสามารถในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ดังนั้นการสร้างและทดสอบแบบจำลองมีขั้นตอนดังนี้ สร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมีด้วยโปรแกรม NeuralWorks Explorer จากข้อมูลชุดฝึก ปรับค่าตัวแปรทั้งหมดให้อยู่ในช่วงการเรียนรู้ที่เหมาะสมโดยการใช้คำสั่ง MinMax Table และ Bipolar จากโปรแกรม NeuralWorks Explorer กำหนดจำนวนรอบการเรียนรู้ (Epochs) ที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Save Best ให้แบบจำลองเรียนรู้และหยุดทดสอบกับชุดทดสอบทุก 1,000 รอบ จนถึงรอบการเรียนรู้สูงสุดที่ 500,000 รอบ และเลือกรอบการเรียนรู้ที่เหมาะสมเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายของชุดทดสอบต่ำที่สุดก่อนจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อป้องกันการเรียนรู้มากเกินไป (Overtraining) ตามคำแนะนำของ NeuralWare (1996) เลือกโครงสร้างและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากแบบจำลองที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูปแบบ MAE, RMSE และ MAPE ของการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกต่ำที่สุด

### 3.4.1 กำหนดโครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ดังนี้

ก. นิวรอนในชั้นนำเข้า (Input Neurons) ทั้งหมด 16 นิวรอนเท่ากับจำนวนปัจจัย  
ออกแบบ 16 ปัจจัย

ข. จำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) 1 ชั้น

ค. นิวรอนในชั้นผลลัพธ์ (Output Neurons) จำนวน 1 นิวรอนแสดงค่าความ  
ต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT)

ง. อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) ที่ 0.2 และปรับลดอัตราการเรียนรู้ลงเหลือร้อยละ  
ละ 90 ทุก ๆ 500 รอบการฝึก

จ. ฟังก์ชันกระตุ้น (Transfer Function) เป็นไฮเพอร์โบลิกแทนเจน  
(Hyperbolic tangent)

ฉ. โมเมนตัม (Momentum) ที่ 0.9

### 3.4.2 การหาโครงสร้างและพารามิเตอร์ในการเรียนรู้ที่เหมาะสมศึกษาตัวแปรดังนี้

ก. น้ำหนักสุ่มเริ่มต้น (Random Initial Weight) ปรับค่าน้ำหนักสุ่มเริ่มต้น 3 ครั้ง

ข. จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน (Hidden Neurons) ทดลองแปรค่าในช่วง 1-16  
นิวรอน

ค. กฎการเรียนรู้ (Learning Rule) แบบ Delta Rule และ Extended Delta Bar Delta  
Rule (EDBD)

#### 4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

แบบจำลองในการทำนายค่าที่ดีควรมีค่าทำนายที่ใกล้เคียงกับค่าแท้จริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายต่ำทั้งชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและชุดข้อมูลอื่น ๆ หรือเรียกว่ามีความสามารถในการใช้งานทั่วไป (Generalization Capability) ที่ดี จากการเปรียบเทียบความถูกต้องของการทำนายและความสามารถในการใช้งานทั่วไป โดยนำแบบจำลองแต่ละประเภทที่คัดเลือกได้จากข้อ 3 มาเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ MAE, RMSE และ MAPE ของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบ แบบจำลองในการทำนายที่ดีต้องมีความถูกต้องในการทำนายค่าในทุกชุดข้อมูลสูง นอกจากนี้สามารถวิเคราะห์ความถูกต้องในการทำนายโดยสร้างแผนภาพระหว่างค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่แท้จริงกับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ได้การทำนาย

#### 5. การบ่งชี้ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

นำแบบจำลองที่มีความถูกต้องในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก และความสามารถในการใช้งานทั่วไปสูงมาใช้ในการบ่งชี้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกของแบบจำลองทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองสำหรับทำนายทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น แบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น และแบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น ดังนี้

5.1 แบบจำลองการถดถอย พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐาน โดยปัจจัยออกแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาตรฐานสูงสุดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ และส่งผลต่อการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

5.2 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ให้แปรค่าปัจจัยออกแบบไปร้อยละ 5 แล้วพิจารณาว่าค่าทำนายความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเท่าใด ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงมาก แสดงว่าปัจจัยออกแบบดังกล่าวมีความสำคัญมากหรือมีความ

ไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าทำนายสูง ซึ่งการตรวจสอบนี้ทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน Explain ใน โปรแกรม NeuralWorks Explorer (NeuralWare, 1996)

## 6. การตัดสินใจเลือกใช้งานแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของ แผ่นกระดาดลูกฟูก

นำกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) มาใช้ในการตัดสินใจเลือกกว่าแบบจำลองใด เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมแก่การใช้งานในเชิงปฏิบัติมากที่สุดโดยใช้ โปรแกรม Expert Choice (2000) ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

6.1 กำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ ได้แก่ ความถูกต้องในการทำนาย ระยะเวลาในการ พัฒนาและทดลองใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน และความสามารถในการปรับ แบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน (Schwalbe, 2009)

6.2 สัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมและแวดวงวิชาการกล่อกกระดาดลูกฟูกจำนวน 5 ท่านเพื่อให้เปรียบเทียบระดับความสำคัญสัมพัทธ์ของเกณฑ์ตัดสินใจเป็นคู่ๆ ป้อนข้อมูลใน โปรแกรม Expert Choice เพื่อคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ตัดสินใจแต่ละตัว

6.3 ให้ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านประเมินคะแนนสัมพัทธ์ของแบบจำลองแต่ละประเภทตามเกณฑ์ ตัดสินใจแต่ละตัวโดยการเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ เช่นข้อ 6.2 ป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม Expert Choice เพื่อคำนวณคะแนนรวมของแบบจำลองแต่ละประเภทที่ได้จากเกณฑ์ตัดสินใจทั้ง 4 เกณฑ์

6.4 เลือกแบบจำลองที่ได้คะแนนรวมสูงที่สุดไปใช้งานจริง

## ผลและวิจารณ์

### 1. การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูก

#### 1.1 ความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูก (ECT) จากกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูก 3 ชั้น

กระดาดแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดาดทำ ลอน	กระดาดแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)
CA125	CA125	CA125	B	6	2	2.94±0.09
					3	2.62±0.25
					4	2.18±0.06
				8	2	2.61±0.13
					3	2.45±0.16
			10	4	2.22±0.16	
				2	2.70±0.08	
				3	2.83±0.08	
				4	2.35±0.19	
				CA125	CA125	CA125
3	2.08±0.33					
4	2.17±0.16					
3	2	2.04±0.11				
	3	2.26±0.14				
	4	2.37±0.16				

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กระดาดแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดาดทำ ลอน	กระดาดแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)
CA125	CA125	CA125	C	4	2	2.17±0.09
					3	2.14±0.15
					4	2.23±0.09
KA185	CA125	KA185	B	6	2	4.02±0.22
					3	3.83±0.26
					4	3.64±0.31
				8	2	3.80±0.22
					3	3.73±0.34
					4	3.61±0.21
					10	2
				3		3.52±0.27
				4		3.53±0.28
				KA230	CA125	KA230
3	4.88±0.31					
4	5.00±0.15					
8	2	4.71±0.31				
	3	4.80±0.25				
	4	4.86±0.21				
	10	2	4.66±0.23			
3		4.44±0.31				
4		4.88±0.13				
KA125	CA125	CA125	C			
				3	2.75±0.12	
				4	2.54±0.10	

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กระดวยแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดวยทำ ลอน	กระดวยแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)					
KA125	CA125	CA125	C	8	2	2.67±0.16					
					3	2.78±0.14					
					4	2.86±0.20					
				10	2	2.54±0.15					
					3	2.78±0.15					
					4	2.83±0.11					
					KA125	CA125	KA125	C	6	2	2.90±0.11
										3	3.02±0.12
										4	2.85±0.08
									8	2	2.88±0.10
3	2.98±0.11										
4	2.95±0.06										
10	2	2.94±0.12									
	3	2.99±0.11									
	4	2.98±0.13									
	KA185	CA125	KA185	C						6	2
3					3.28±0.12						
4					3.41±0.17						
8					2	3.44±0.15					
					3	3.48±0.15					
					4	3.62±0.13					
					10	2	3.37±0.13				
						3	3.38±0.12				
						4	3.28±0.08				

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กระดาดแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดาดทำ ลอน	กระดาดแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)
KA150	CA125	CA125	E	5	1.5	3.00±0.12
					2	2.90±0.18
					3	2.63±0.23
					3.5	2.03±0.05
					4	1.86±0.05
				6	1.5	2.98±0.24
					2	3.05±0.12
					3	2.76±0.16
					3.5	2.13±0.06
					4	1.89±0.04
				7	1.5	2.15±0.09
					2	2.95±0.25
					3	2.52±0.15
					3.5	2.29±0.16
					4	1.94±0.05
				10	1.5	3.75±0.25
					2	3.65±0.25
					3	3.18±0.25
					3.5	2.51±0.05
					4	2.29±0.07
KI125	CA125	CA105	B	6	2	2.13±0.07
					3	2.08±0.03
					4	1.99±0.16
				8	2	2.25±0.10
					3	2.17±0.11
					4	2.08±0.17

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กระดวยแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดวยทำ ลอน	กระดวยแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)				
KI125	CA125	CA105	B	10	2	2.07±0.12				
					3	2.14±0.09				
					4	2.14±0.14				
KI125	CA125	KI125	B	6	2	2.98±0.14				
					3	2.92±0.04				
					4	2.47±0.03				
				8	2	3.11±0.14				
					3	2.89±0.22				
					4	2.33±0.07				
					10	2	3.24±0.08			
				3		2.99±0.13				
				4		2.47±0.08				
				KI125	CA125	CA105	C	6	2	2.49±0.19
3	2.58±0.14									
4	2.50±0.13									
8	2	2.43±0.09								
	3	2.62±0.11								
	4	2.65±0.06								
	10	2	2.29±0.11							
3		2.44±0.16								
KI125		CA125	CA125					C	6	2
	3									2.72±0.08
	4			2.67±0.11						
	8			2	2.76±0.13					
				3	2.78±0.09					
4	2.69±0.09									

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กระดวยแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดวยทำ ลอน	กระดวยแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)
KI125	CA125	CA125	C	10	2	2.70±0.10
					3	2.74±0.12
					4	2.68±0.05
KI150	CA125	KI150	C	6	2	3.1±0.08
					3	3.28±0.17
					4	3.08±0.16
				8	2	3.07±0.07
					3	3.19±0.12
					4	3.19±0.10
					10	2
				3		3.13±0.11
				4		3.20±0.14
				KI185	CA125	KI185
3.5	3.93±0.16					
4	3.89±0.18					
8	2	3.90±0.11				
	3.5	3.88±0.11				
	4	4.07±0.14				
10	2	3.69±0.14				
	3.5	3.73±0.11				
	4	3.86±0.09				
KS170	CA125	KI150	B	6	2	3.01±0.08
					3	2.97±0.17
					4	2.96±0.17

ตารางที่ 6 (ต่อ)

กระดวยแผ่น เรียบด้านหน้า	กระดวยทำ ลอน	กระดวยแผ่น เรียบด้านหลัง	ชนิด ลอน	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)					
KS170	CA125	KI150	B	8	2	2.97±0.09					
					3	3.10±0.10					
					4	3.03±0.10					
				10	2	2.87±0.15					
					3	3.08±0.15					
					4	2.96±0.11					
					KS170	CA125	KI150	C	6	2	2.96±0.25
										3	3.12±0.12
										4	3.21±0.08
									8	2	3.19±0.12
3	3.28±0.12										
4	3.26±0.13										
10	2	3.26±0.10									
	3	3.40±0.06									
	4	3.33±0.12									

### 1.2 ความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดวยลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

ผลการทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดวยลูกฟูก (ECT) จากกระดวยลูกฟูกประเภท 5 ชั้นแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น

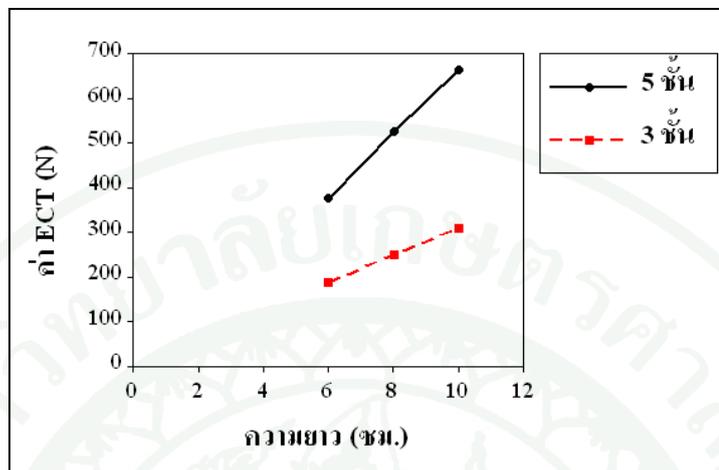
แผ่นเรียบ หน้า	ลอนที่ 2	แผ่นเรียบ กลาง	ลอนที่ 2	แผ่นเรียบ หลัง	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)
KA125	CA125	CA105	CA125	KA125	10	2	6.32±0.17
						3	6.43±0.19
						4	6.07±0.25
KA150	CA125	CA105	CA125	CA125	6	2	5.14±0.19
						3	5.17±0.16
						4	5.40±0.20
					8	2	5.67±0.19
						3	5.76±0.16
						4	5.74±0.16
						10	2
					3		5.82±0.17
					4		5.59±0.11
					KA230	CA125	CA105
3	6.29±0.25						
4	6.44±0.21						
8	2	6.79±0.13					
	3	6.77±0.18					
	4	7.00±0.20					
	10	2	7.31±0.10				
3		7.33±0.23					
4		7.37±0.09					

ตารางที่ 7 (ต่อ)

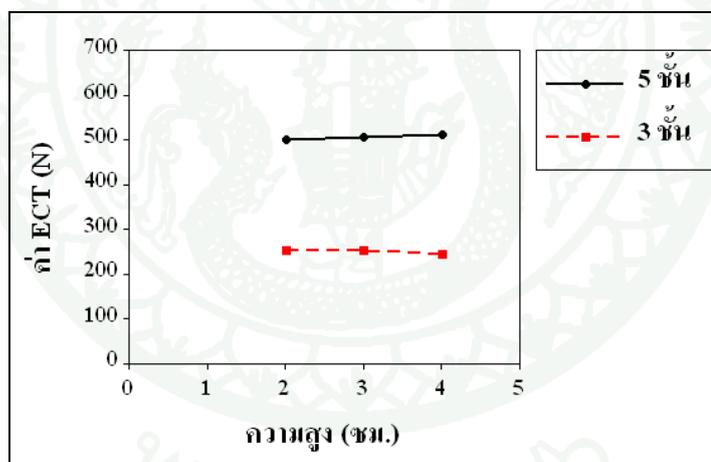
แผ่นเรียบ หน้า	ลอนที่ 2	แผ่นเรียบ กลาง	ลอนที่ 2	แผ่นเรียบ หลัง	ความยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	ค่า ECT (kN/m)					
KI125	CA105	CA105	CA105	KI125	6	2	7.24±0.27					
						3	7.23±0.14					
						4	6.89±0.24					
					8	2	7.26±0.20					
						3	7.29±0.12					
						4	7.21±0.17					
					10	2	7.20±0.10					
						3	7.08±0.18					
						4	6.62±0.13					
					KI125	CA125	CA105	CA125	CA105	6	2	6.00±0.17
											3	6.33±0.30
											4	6.37±0.29
8	2	6.30±0.19										
	3	6.35±0.41										
	4	6.79±0.19										
10	2	6.21±0.09										
	3	6.47±0.16										
	4	6.47±0.19										

การเปรียบเทียบค่า ECT ระหว่างแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น และ 5 ชั้น (ภาพที่ 9) ซึ่งให้เห็นว่าที่ระดับความยาวและความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูกใด ๆ นั้นแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น มีค่า ECT สูงกว่าแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น หรืออีกนัยหนึ่งมีความแข็งแรงกว่านั่นเอง ดังนั้นผู้วิจัย จึงสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่า ECT 3 ประเภท คือ (1) แบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นในแบบจำลองเดียวกัน (2) แบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น และ (3) แบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น จะทำให้มีค่า ECT สูงขึ้นใน

ระดับที่มากกว่าการเพิ่มความยาวในกระดวยลูกฟูก 3 ชั้น หรือกระดวยลูกฟูก 5 ชั้นแผ่นยาวจะมีความแข็งแรงมากกว่ามาก



ก. เปรียบเทียบค่า ECT ที่ความยาวต่าง ๆ ของกระดวยลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น



ข. เปรียบเทียบค่า ECT ที่ความสูงต่าง ๆ ของกระดวยลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบค่า ECT ที่ความยาวและความสูงต่าง ๆ ระหว่างกระดวยลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น

## 2. การสร้างแบบจำลอง

2.1 แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งทั้งแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

### 2.1.1 แบบจำลองของ Whitsitt (1990)

ผลการนำปัจจัยออกแบบจำนวน 15 ปัจจัย (ไม่รวมความสูง) ไปคำนวณค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษ (RCT) แล้วนำมาใส่ในแบบจำลองของ Whitsitt (1990) ตามสมการที่ 2 เพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) ทั้ง 3 ชั้นและ 5 ชั้น ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบดังตารางที่ 8

**ตารางที่ 8** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Whitsitt ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ชุดข้อมูล	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
ชุดฝึก	68.29	111.08	19.29
ชุดทดสอบ	36.64	56.81	13.17

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง Whitsitt ในรูป MAE, RMSE และ MAPE ของชุดทดสอบต่ำกว่าชุดฝึก

### 2.1.2 แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999)

เมื่อนำปัจจัยออกแบบจำนวน 15 ปัจจัย (ไม่รวมความสูง) ไปคำนวณหาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวน แล้วนำมาสร้างแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) พบว่าได้ค่าคงที่  $k$  เท่ากับ 0.88 และ  $c$  เท่ากับ 8.24 ทำให้ได้แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกสำหรับกระดาษลูกฟูกทั้ง 3 ชั้นและ 5 ชั้น ดังสมการที่ 18

$$ECT = 0.88(L_1 + tM_1 + L_2 + tM_2 + L_3) + 8.24 \quad (18)$$

- โดยที่  $L_1$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบ  
ด้านหน้า
- $t$  คือ Take up factor ของลอนลูกฟูก
- $M_1$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอนที่ 1
- $L_2$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบกลาง
- $M_2$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอนที่ 2
- $L_3$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบ  
ด้านหลัง

เมื่อนำสมการที่ 18 ไปทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษ  
ลูกฟูกได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบดังตารางที่ 9

**ตารางที่ 9** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย  
Markstrom (1999) ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ชุดข้อมูล	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
ชุดฝึก	65.78	107.42	19.10
ชุดทดสอบ	42.45	63.06	15.13

พบเช่นเดียวกับแบบจำลองของ Whitsitt (1990) ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ  
แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) มีค่า MAE, RMSE และ  
MAPE ของชุดทดสอบต่ำกว่าชุดฝึก

### 2.1.3 แบบจำลองการถดถอย

งานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองการถดถอย 2 ประเภทคือ แบบจำลองการถดถอย  
พหุคูณและโพลิโนเมียล ให้ผลการวิจัยดังนี้

แบบจำลองการถดถอยพหุคูณที่สร้างขึ้นจากวิธีการคัดเลือกตัวแปรต้นเข้าไปในสมการถดถอย 4 วิธีคือ Enter, Stepwise, Backward และ Forward แสดงในสมการที่ 19-21 และผลการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) ให้ความคลาดเคลื่อนดังแสดงในตารางที่ 10

สมการการถดถอยพหุคูณซึ่งใช้วิธี Enter เป็นดังนี้

$$ECT = -899.452 + 7.279B_1 - 1.071G_1 + 4.481G_2 - 1.856B_3 + 2.398G_3 + 20.081B_5 + 0.986G_5 + 37.578L - 1.894H + 0.367F_{1,m} + 11.636F_{1,h} + 58.179F_{2,h} \quad (19)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบกลาง (แผ่นเรียบด้านหลังของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น)
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง
	$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1,m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 1
	$F_{1,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1
	$F_{2,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter มีปัจจัยออกแบบถูกคัดเลือกเข้าในแบบจำลองจำนวน 12 ปัจจัย หรือกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก ในขณะที่ชนิดกระดาษทำลอนที่ 1 ปัจจัยชนิดและน้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2 และจำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนที่ 2 ไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกนักจึงไม่อยู่ในแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ไม่อยู่ในแบบจำลองจะเกี่ยวข้องกับลอนลูกฟูก

สมการการถดถอยพหุคูณซึ่งใช้วิธี Stepwise และ Forward นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเหมือนกันจึงได้สมการดังนี้

$$ECT = -246.775 + 1.321G_3 + 37.953L + 321.823B_4 \quad (20)$$

โดยที่  $G_3$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง  
 $L$  คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
 $B_4$  คือ ชนิดกระดาษทำลอนที่ 2

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise และแบบ Forward ซึ่งเป็นแบบจำลองเดียวกันนี้ประกอบด้วยตัวแปรเพียง 3 ตัวคือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก และชนิดกระดาษทำลอนที่ 2 อย่างไรก็ตามชนิดของกระดาษทำลอนนั้นไม่ปรากฏในแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter

สมการการถดถอยพหุคูณซึ่งใช้วิธี Backward เป็นดังนี้

$$ECT = -576.297 + 6.476B_1 - 1.275G_1 + 1.857G_2 + 2.544G_3 + 1.303G_5 + 37.761L + 0.403F_{1,m} + 11.807F_{1,h} + 55.862F_{2,h} \quad (21)$$

โดยที่  $B_1$  คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า  
 $G_1$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า  
 $G_2$  คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 1  
 $G_3$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง  
 $G_5$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $L$  คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
 $F_{1,m}$  คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 1  
 $F_{1,h}$  คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1  
 $F_{2,h}$  คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Backward มีปัจจัยออกแบบอยู่ในสมการจำนวน 9 ปัจจัย ซึ่งทุกปัจจัยปรากฏในแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter (สมการที่ 19)

ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติและการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในการทำนายค่า ECT (ตารางที่ 10) พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณทั้งหมดมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของทุกแบบจำลองนั้นมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ ทำให้แบบจำลองทั้งหมดมีความน่าเชื่อถือต่ำ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ MAE และ MAPE ต่ำที่สุด คือแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise /Forward

**ตารางที่ 10** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

วิธีการคัดเลือกตัวแปร	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
Enter	26.09	38.31	11.95	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ
Stepwise/Forward	25.72	38.14	11.03	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ
Backward	26.73	38.12	12.19	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ

ผลการสร้างแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) โดยใช้วิธีการเลือกตัวแปรเข้าในสมการการถดถอย 4 วิธีเช่นเดียวกับแบบจำลองการถดถอยพหุคูณ ได้แบบจำลองดังแสดงในสมการที่ 22-25

สมการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Enter เป็นดังนี้

$$ECT = 306.748 - 5.6B_1^2 + 0.352B_1G_1 - 0.071B_1G_2 - 4.512B_1B_3 + 0.348B_1G_4 - 0.206B_1L - 0.342B_1H + 1.972B_1F_1h + 0.013G_1^2 - 11.34G_1B_2 - 0.043G_1L + 0.743G_1H + 1.226G_1F_1h$$

$$\begin{aligned}
&+0.961B_2G_2+6.077B_2G_3+9.907B_2H+0.435B_2F_1m-0.09G_2L-4.33B_3^2+0.771B_3L \\
&-1.882B_3H+0.193B_3F_1m+4.886B_3F_1h+0.181G_3L-0.527G_3H-1.381G_3F_1h-0.442G_4B_5 \\
&+0.155G_4L+0.354G_4H-0.62B_5L+15.275B_5H+0.006G_5^2+0.22G_5L-0.633G_5H+0.205L^2 \\
&-0.998LH+0.101LF_1m+1.991LF_1h-5.238H^2-0.188HF_1m+7.883HF_1h-0.212F_1mF_1h \\
&-7.342F_2h^2
\end{aligned} \tag{22}$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$B_2$	คือ ชนิดกระดาษทำลอนที่ 1
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 1
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบกลาง (แผ่นเรียบด้านหลังของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น)
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง
	$B_4$	คือ ชนิดกระดาษทำลอนที่ 2
	$G_4$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2
	$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$L$	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$H$	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 1
	$F_{1h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1
	$F_{2m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 2
	$F_{2h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Enter ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยออกแบบนั้นมี ความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลีโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกแบบ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกแบบต่าง ๆ

สมการการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Stepwise เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ECT} = & 204.266 + 0.374G_3L + 0.382G_3L + 1.162B_1G_4 - 80.7B_4F_{1,h} - 0.13HF_{1,m} + 0.087LF_{1,m} \\ & + 5.605HF_{1,h} - 0.786B_1G_5 + 4.134B_5H + 0.061B_3F_{1,m} - 3.195B_2G_3 - 0.234G_1L + 0.01G_1G_3 \end{aligned} \quad (23)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง
	$G_4$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2
	$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1,m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 1
	$F_{1,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Stepwise ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยออกแบบนี้ มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น เช่นกัน โดยอยู่ในรูปโพลีโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกแบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกแบบต่าง ๆ

สมการการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ECT} = & 316.123 - 5.166B_1^2 + 0.319B_1G_1 - 6.859B_1B_3 + 0.313B_1G_4 + 0.013G_1^2 - 11.824G_1B_2 \\ & + 0.732G_1H + 1.266G_1F_{1,h} + 6.525B_2G_3 + 0.643B_2F_{1,m} - 2.15B_3H + 0.142B_3F_{1,m} + 5.081B_3F_{1,h} \\ & + 0.162G_3L - 0.499G_3H - 1.429G_3F_{1,h} - 0.499G_4B_5 + 0.165G_4L + 0.346G_4H + 15.23B_5H \\ & + 0.007G_5^2 + 0.187G_5L - 0.617G_5H - 0.91LH + 0.068LF_{1,m} - 5.131H^2 - 0.17HF_{1,m} \\ & + 8.981HF_{1,h} - 5.665F_{1,h}^2 \end{aligned} \quad (24)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า

$B_2$	คือ ชนิดกระดาษทำลอนที่ 1
$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบกลาง (แผ่นเรียบด้านหลังของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น)
$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง
$B_4$	คือ ชนิดกระดาษทำลอนที่ 2
$G_4$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2
$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
$F_{1m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 1
$F_{1h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1
$F_{2h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยออกแบวนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลีโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกแบวนและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกแบวนต่าง ๆ

สมการการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Forward เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 ECT = & -91.35 + 25.474B_4L + 0.101G_3L - 1.076B_1L + 0.135G_5L + 0.492B_1G_4 - 44.263B_4F_{1h} \\
 & + 0.115G_2L + 0.075B_1G_3 - 0.21HF_{1m} + 0.034LF_{1m} + 0.239G_2H + 0.003G_3F_{1m} - 0.433G_1F_{2h} \\
 & + 0.009G_4G_5
 \end{aligned} \tag{25}$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 1
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง
	$B_4$	คือ ชนิดกระดาษทำลอนที่ 2
	$G_4$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2

$G_5$	คือ นำหนักกระดาศแผ่นเรียบด้านหลัง
L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาศลูกฟูก
H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาศลูกฟูก
$F_{1m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูกที่ 1
$F_{1h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1
$F_{2h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Forward ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยออกแบบนั้น มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาศลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลีโนเมียลอันดับที่สองปัจจัยออกแบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกแบบต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบจากแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลทั้ง 4 แบบจำลองให้ผลดังตารางที่ 11 พบว่าแบบจำลองทั้ง 4 แบบให้ค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกันและเป็นไปตามข้อสมมติทางสถิติทุกประการ แต่แบบจำลองที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE และ RMSE น้อยที่สุดคือแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Forward และ Backward ตามลำดับดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองทั้ง 2 ประเภทนี้ไว้ใช้งานต่อไป

**ตารางที่ 11** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาศลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

วิธีการคัดเลือกตัวแปร	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
Enter	15.18	20.30	5.23	ผ่าน
Stepwise	15.80	19.54	6.37	ผ่าน
Backward	14.58	17.62	5.14	ผ่าน
Forward	13.66	17.86	5.71	ผ่าน

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลีโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของข้อมูลชุดทดสอบที่ถูกต้องมากที่สุดในแต่ละกลุ่ม (ตารางที่ 12) พบว่าแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลนั้นทั้งแบบ Forward และ Backward มีความถูกต้องในการทำนายสูงกว่าแบบจำลองการถดถอยแบบพหุคูณมาก ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยการออกแบบต่าง ๆ นั้น

มีความสัมพันธ์กับค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบเชิงซ้อน ส่งผลให้แบบจำลองการถดถอยแบบพหุคูณไม่สามารถจำลองความสัมพันธ์เหล่านั้นได้ดี ดังนั้นจึงคัดเลือกแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลเป็นตัวแทนของแบบจำลองการถดถอย

**ตารางที่ 12** การเปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลในการทำนายค่า ECT

แบบจำลองการถดถอย	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
พหุคูณแบบ Stepwise/Forward	25.72	38.14	11.03	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ
โพลีโนเมียลแบบ Forward	13.66	17.86	5.71	ผ่าน
โพลีโนเมียลแบบ Backward	14.58	17.62	5.14	ผ่าน

#### 2.1.4 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ

ผลการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ (BPN) ที่โครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ต่างๆในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค1 ส่วนแบบจำลอง BPN ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า ECT ในรูป MAE, RMSE และ MAPE ของข้อมูลชุดทดสอบต่ำที่สุดแสดงในตารางที่ 13

**ตารางที่ 13** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ที่ดีที่สุดในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

จำนวนนิรอน ในชั้นซ้อน	กฎการ เรียนรู้	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
12	EDBD*	233,000	1	11.79	15.94	4.23

หมายเหตุ \*Extended Delta Bar Delta rule

### 2.1.5 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

ผลการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี (RBFN) ที่  
โครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ต่างๆในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของ  
แผ่นกระดาษลูกฟูก แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค2 ส่วนแบบจำลอง RBFN ที่ให้ค่าความ  
คลาดเคลื่อนในรูป MAE, RMSE และ MAPE ของข้อมูลชุดทดสอบที่ต่ำที่สุดแสดงในตารางที่ 14

**ตารางที่ 14** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ที่ดีที่สุดในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

จำนวนนิรอน ในชั้นซ้อน	กฎการ เรียนรู้	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
9	Delta	9,000	2	33.95	54.45	12.45

2.2 แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
ประเภท 3 ชั้น

### 2.2.1 แบบจำลองของ Whitsitt (1990)

ผลการนำปัจจัยออกแบบจำนวน 9 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น  
(ไม่รวมความสูง) ไปคำนวณค่าความต้านทานแรงกดดวงแหวนของกระดาษ (RCT) แล้วนำมาใส่ใน

แบบจำลองของ Whitsitt (1990) เพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) 3 ชั้นตามสมการที่ 1 ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Whitsitt ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

ชุดข้อมูล	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
ชุดฝึก	32.27	50.63	15.39
ชุดทดสอบ	32.92	49.44	14.19

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูป RMSE และ MAPE น้อยกว่าชุดฝึก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกในรูป MAE มากกว่าชุดทดสอบเล็กน้อย

### 2.2.2 แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999)

เมื่อนำปัจจัยออกแบบจำนวน 9 ปัจจัย (ไม่รวมความสูง) ไปคำนวณหาความต้านทานแรงกดวงแหวน (RCT) แล้วนำมาสร้างแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) พบว่าได้ค่าคงที่  $k$  เท่ากับ 0.66 และ  $c$  เท่ากับ 3.33 ทำให้ได้แบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT สำหรับกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นดังสมการที่ 26

$$ECT = 0.66(L_1 + tM + L_2) + 3.33 \quad (26)$$

- โดยที่  $L_1$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
- $t$  คือ Take up factor ของลอนลูกฟูก
- $M$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอน
- $L_2$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง

เมื่อนำสมการที่ 26 ไปทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษ ลูกฟูกได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบดังตารางที่ 16

**ตารางที่ 16** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น

ชุดข้อมูล	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
ชุดฝึก	31.49	41.64	14.97
ชุดทดสอบ	27.72	39.80	16.59

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE และ RMSE ของข้อมูลชุดทดสอบต่ำกว่าชุดฝึก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAPE ของชุดฝึกต่ำกว่าชุดทดสอบ

### 2.2.3 แบบจำลองการถดถอย

ผลการสร้างแบบจำลองการถดถอยพหุคูณที่มีการคัดเลือกตัวแปรต้นเข้าสมการถดถอย 4 วิธีคือ Enter, Stepwise, Backward และ Forward แสดงในสมการที่ 27-29 และผลการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) ให้ความคลาดเคลื่อนดังแสดงในตารางที่ 17

สมการการถดถอยพหุคูณซึ่งใช้วิธี Enter เป็นดังนี้

$$ECT = -238.724 - 0.23B_1 - 0.17G_1 + 2.524B_3 + 1.57G_3 + 31.169L - 9.001H + 0.179F_{1,m} + 9.376F_{1,h} \quad (27)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก

$F_{1,m}$  คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูก  
 $F_{1,h}$  คือ ความสูงของลอนลูกฟูก

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter มีปัจจัยออกแบบถูกคัดเลือกเข้าไปในแบบจำลองจำนวน 8 ปัจจัย จาก 10 ปัจจัยออกแบบที่เกี่ยวข้องมีเพียงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระดาศทำลอน ได้แก่ ชนิดของกระดาศทำลอน และน้ำหนักของกระดาศทำลอน ที่ไม่อยู่ในแบบจำลอง

สมการการถดถอยพหุคูณใช้วิธี Stepwise และ Forward นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเหมือนกันและมีสมการดังนี้

$$ECT = -182.789 + 31.101L + 1.423G_3 - 8.867H \quad (28)$$

โดยที่  $G_3$  คือ น้ำหนักกระดาศแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $L$  คือ ความยาวของแผ่นกระดาศลูกฟูก  
 $H$  คือ ความสูงของแผ่นกระดาศลูกฟูก

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise และแบบ Forward ซึ่งเป็นแบบจำลองเดียวกันนี้ประกอบด้วยปัจจัยออกแบบเพียง 3 ปัจจัยจาก 10 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ น้ำหนักกระดาศแผ่นเรียบกลาง ความยาวของแผ่นกระดาศลูกฟูก และความสูงของแผ่นกระดาศลูกฟูก

สมการการถดถอยพหุคูณแบบ Backward เป็นดังนี้

$$ECT = -239.352 + 2.187B_3 + 1.422G_3 + 31.1L - 8.977H + 0.159F_{1,m} + 9.393F_{1,h} \quad (29)$$

โดยที่  $B_3$  คือ ชนิดกระดาศแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $G_3$  คือ น้ำหนักกระดาศแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $L$  คือ ความยาวของแผ่นกระดาศลูกฟูก  
 $H$  คือ ความสูงของแผ่นกระดาศลูกฟูก  
 $F_{1,m}$  คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูก  
 $F_{1,h}$  คือ ความสูงของลอนลูกฟูก

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Backward ประกอบด้วยปัจจัยออกแบบที่เกี่ยวข้องกับกระดาษแผ่นรีขมด้านหลัง ความยาว ความสูง และลอนลูกฟูกจำนวน 6 ปัจจัยจาก 10 ปัจจัยออกแบบที่เกี่ยวข้อง

เมื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณที่ได้สร้างขึ้น (ตารางที่ 17) พบว่าแบบจำลองการถดถอยทั้ง 3 รูปแบบมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียง และเป็นไปตามข้อสมมติทางสถิติทุกประการ จึงเลือกแบบจำลองการถดถอยแบบ Enter ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE และ MAPE ต่ำที่สุดไปใช้ต่อไป

ตารางที่ 17 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

วิธีการคัดเลือกตัวแปร	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
Enter	19.17	25.37	9.62	ผ่าน
Stepwise/Forward	19.97	25.01	10.19	ผ่าน
Backward	19.42	25.49	9.79	ผ่าน

การสร้างแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลจากเพื่อทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นจากปัจจัยออกแบบต่าง ๆ จำนวน 10 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ด้วยวิธีการเลือกตัวแปรเข้าสมการ 4 วิธีเช่นเดิมคือ Enter, Stepwise, Backward และ Forward ได้แบบจำลองดังสมการที่ 30-33

สมการการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Enter เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 ECT = & 253.999 - 4.654B_1^2 - 5.629B_1B_3 + 0.426B_1G_3 - 1.283B_1L + 0.881B_1H - 0.054B_1F_1m \\
 & - 1.572B_1F_1h - 0.049G_1G_2 - 0.046G_1L + 0.652G_1H + 1.242G_1F_1h - 0.835B_2H + 0.025G_2G_3 \\
 & - 0.059G_2L - 1.665B_3^2 + 2.056B_3L - 1.876B_3H + 0.118B_3F_1m + 1.524B_3F_1h + 0.009G_3^2 \\
 & + 0.111G_3L - 0.511G_3H - 1.502G_3F_1h + 0.181L^2 - 1.501LH + 0.116LF_1m + 4.016LF_1h \\
 & - 3.566H^2 - 0.191HF_1m + 11.274HF_1h + 0.001F_1m^2 - 3.208F_1h^2
 \end{aligned} \tag{30}$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอน
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1,m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูก
	$F_{1,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูก

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Enter ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยออกเบบนั้นมี ความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ ในรูปโพลีโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกเบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกเบบ นอกจากนี้พบว่าไม่มีเพียงปัจจัยชนิดของกระดาษทำลอนเท่านั้นที่ไม่อยู่ในแบบจำลอง

สมการการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Stepwise เป็นดังนี้

$$ECT = 296.822 + 0.13G_3L + 0.166G_2L + 0.006G_3^2 + 0.059LF_{1,m} - 0.13HF_{1,m} + 9.646HF_{1,h} + 0.02G_3F_{1,m} - 4.142B_2G_3 - 0.017G_2F_{1,m} + 1.16B_3L - 0.059G_1L - 0.698L^2 - 2.567H^2 \quad (31)$$

โดยที่	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$B_2$	คือ ชนิดกระดาษทำลอน
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอน
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1,m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูก
	$F_{1,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูก

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Stepwise ซึ่งชี้ให้เห็นว่าปัจจัยออกแบบนั้น มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลีโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกแบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกแบบ และพบว่าไม่มีเพียงปัจจัยชนิดของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้าเท่านั้นที่ไม่อยู่ในแบบจำลอง

สมการการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 ECT = & 224.351 - 5.432B_1^2 - 5.277B_1B_3 + 0.383B_1G_3 - 1.442B_1L - 0.051G_1G_2 + 0.664G_1H \\
 & + 1.175G_1F_{1,h} + 0.028G_2G_3 + 2.207B_3L - 1.369B_3H + 0.066B_3F_{1,m} + 0.009G_3^2 + 0.065G_3L \\
 & - 0.533G_3H - 1.416G_3F_{1,h} - 1.511LH + 0.1LF_{1,m} + 3.26LF_{1,h} - 3.681H^2 - 0.186HF_{1,m} \\
 & + 11.885HF_{1,h} + 0.001F_{1,m}^2 - 3.152F_{1,h}^2 \quad (32)
 \end{aligned}$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอน
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$L$	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$H$	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1,m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูก
	$F_{1,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูก

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ก็ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยออกแบบ นั้นมีความสัมพันธ์กับค่า ECT แบบไม่เชิงเส้น และยังเป็นแบบจำลองมีปัจจัยออกแบบที่ส่งผลต่อการทำนายค่า ECT เหมือนกับแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Enter คือมีเฉพาะปัจจัยชนิดกระดาษทำลอนที่ไม่อยู่ในแบบจำลอง

สมการการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Forward เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} ECT = & 280.044 + 0.138G_3L + 0.786G_1H + 0.191G_2L + 0.008G_3^2 - 1.618B_3H + 0.059LF_{1,m} \\ & - 0.201HF_{1,m} + 12.447HF_{1,h} + 0.043G_3F_{1,m} - 5.994G_3 - 0.006G_2F_{1,m} + 1.126B_3L - 0.662L^2 \\ & - 0.066G_1L - 3.995H^2 - 0.648G_3H - 0.025G_1F_{1,m} + 0.336G_1B_3 - 8.17B_3^2 - 1.299LH \end{aligned} \quad (33)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอน
	$B_3$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_3$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$L$	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$H$	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_{1,m}$	คือ จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตรของลอนลูกฟูก
	$F_{1,h}$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูก

แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Forward ก็เช่นกันที่ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยออกแบบนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้นและยังเป็นแบบจำลองมีปัจจัยออกแบบที่ส่งผลต่อการทำนายค่า ECT เหมือนกับแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Enter คือมีเฉพาะปัจจัยชนิดกระดาษทำลอนที่ไม่อยู่ในแบบจำลอง

ผลเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบระหว่างแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลทั้ง 4 แบบที่สร้างขึ้น (ตารางที่ 18) พบว่ามีการแจกแจงของค่าความคลาดเคลื่อนไม่ปกติจึงทำให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือต่ำ อย่างไรก็ตามแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Stepwise เป็นแบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 รูปแบบน้อยที่สุด

**ตารางที่ 18** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

วิธีการคัดเลือกตัวแปร	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
Enter	18.50	27.21	10.00	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ
Stepwise	14.02	21.11	8.85	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ
Backward	21.28	29.09	11.26	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ
Forward	15.86	24.01	10.08	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของข้อมูลชุดทดสอบที่ถูกตั้งมากที่สุดในแต่ละกลุ่ม (ตารางที่ 19) พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter และแบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบ Stepwise มีความถูกต้องในการทำนายสูง แต่แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Stepwise ไม่ผ่านการทดสอบความคลาดเคลื่อนแจกแจงปกติทำให้ขาดความน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงคัดเลือกแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter เป็นตัวแทนของแบบจำลองการถดถอย

**ตารางที่ 19** เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น

แบบจำลองการถดถอย	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
พหุคูณแบบ Enter	19.17	25.37	9.62	ผ่าน
โพลิโนเมียลแบบ Stepwise	14.02	21.11	8.85	ความคลาดเคลื่อนแจกแจงไม่ปกติ

#### 2.2.4 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ

ผลการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ (BPN) ที่โครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ต่างๆ ในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค3 และแบบจำลอง BPN ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูปแบบ MAE, RMSE และ MAPE ต่ำที่สุด แสดงในตารางที่ 20

**ตารางที่ 20** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

จำนวนนิวรอน ในชั้นซ่อน	กฎการ เรียนรู้	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
10	Delta	10,000	1	14.16	21.85	7.81

#### 2.2.5 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

ผลการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี (RBFN) ที่โครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ต่างๆ ในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค4 และแบบจำลอง RBFN ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูปแบบ MAE, RMSE และ MAPE ต่ำที่สุดแสดงในตารางที่ 21

**ตารางที่ 21** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

จำนวนนิวรอน ในชั้นซ่อน	กฎการ เรียนรู้	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
9	Delta	14,000	2	30.64	40.69	16.85

## 2.3 แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งเฉพาะแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

### 2.3.1 แบบจำลองของ Whitsitt (1990)

ผลการนำปัจจัยออกแบบจำนวน 15 ปัจจัย (ยกเว้นความสูง) ไปคำนวณค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษ (RCT) แล้วนำมาสร้างแบบจำลองของ Whitsitt (1990) ตามสมการที่ 2 เพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (ECT) ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบดังตารางที่ 22

**ตารางที่ 22** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองของ Whitsitt ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

ชุดข้อมูล	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
ชุดฝึก	161.15	191.16	30.87
ชุดทดสอบ	187.08	225.63	31.68

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนแบบจำลองของ Whitsitt ของชุดทดสอบในรูปแบบ MAE, RMSE และ MAPE มีค่าสูงกว่าค่าความคลาดเคลื่อนในชุดฝึก

### 2.3.2 แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999)

เมื่อนำปัจจัยออกแบบ 15 ปัจจัย (ยกเว้นความสูง) ไปคำนวณหาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวน (RCT) แล้วนำมาใส่ในแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) พบว่าได้ค่าคงที่  $k$  เท่ากับ 0.57 และ  $c$  เท่ากับ 333 ทำให้ได้แบบจำลองสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) สำหรับกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น ดังสมการที่ 34

$$ECT = 0.57(L_1 + tM_1 + L_2 + tM_2 + L_3) + 333 \quad (34)$$

- โดยที่  $L_1$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบ  
ด้านหน้า
- $t$  คือ Take up factor ของลอนลูกฟูก
- $M_1$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอนที่ 1
- $L_2$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบกลาง
- $M_2$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษทำลอนที่ 2
- $L_3$  คือ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแผ่นเรียบ  
ด้านหลัง

เมื่อนำสมการที่ 35 ไปทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบดังตารางที่ 23

**ตารางที่ 23** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstrom (1999) ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น

ชุดข้อมูล	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
ชุดฝึก	98.34	118.16	22.56
ชุดทดสอบ	99.11	130.00	21.37

พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ MAE และ RMSE ของชุดทดสอบสูงกว่าชุดฝึกในทางกลับกันค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ MAPE ของชุดฝึกสูงกว่าชุดทดสอบเล็กน้อย

### 2.3.3 แบบจำลองการถดถอย

ผลการสร้างแบบจำลองการถดถอยพหุคูณสำหรับทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ECT) สำหรับกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้นจากปัจจัยออกแบบจำนวน 16 ปัจจัยด้วยวิธีนำตัวแปรเข้าในสมการถดถอย 4 วิธีเป็นดังสมการที่ 35-37

สมการการถดถอยพหุคูณซึ่งใช้วิธี Enter เป็นดังนี้

$$ECT = -1514.427 + 65.127B_1 + 9.152G_4 + 38.123B_5 + 0.686G_5 + 70.685L + 0.325H \quad (35)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_4$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2
	$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	H	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก

แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter มีปัจจัยออกแบบถูกคัดเลือกเข้าในแบบจำลองจำนวน 6 ปัจจัย ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัยชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า กระดาษทำลอนที่ 2 กระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง ความยาว และความสูง

สมการถดถอยพหุคูณใช้วิธี Stepwise และ Forward นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเหมือนกันและมีสมการดังนี้

$$ECT = -905.738 + 70.71L + 61.358B_1 - 1.521G_1 + 4.957G_2 + 2.208G_5 \quad (36)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 1
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	L	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก

แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise/Forward ประกอบด้วยปัจจัยออกแบบจำนวน 5 ปัจจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 1 น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง และความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก

สมการการถดถอยพหุคูณซึ่งใช้วิธี Backward เป็นดังนี้

$$ECT = -1512.101 + 65.159B_1 + 9.139G_4 + 38.016B_5 + 0.687G_5 + 70.71L \quad (37)$$

โดยที่  $B_1$  คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า  
 $G_4$  คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2  
 $B_5$  คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $G_5$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $L$  คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก

พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Backward ประกอบด้วยปัจจัยออกแบบที่คล้ายกับแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter ยกเว้นไม่มีปัจจัยความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในการทำนายค่า (ECT) ของแผ่นกระดาษลูกฟูก (ตารางที่ 24) พบว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณทั้งหมดมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน และเป็นไปตามข้อสมมติทางสถิติทุกประการ โดยที่แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise /Forward มีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูป MAE และ RMSE ต่ำที่สุด

**ตารางที่ 24** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยพหุคูณในการทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

วิธีการคัดเลือกตัวแปร	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
Enter	10.96	14.51	2.28	ผ่าน
Stepwise/Forward	10.88	14.40	2.27	ผ่าน
Backward	10.88	14.41	2.27	ผ่าน

ผลการสร้างแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (ECT) ของแผ่นกระดาษลูกฟูกจากปัจจัยออกแบบจำนวน 16 ปัจจัย โดยใช้วิธีการ

เลือกตัวแปรเข้าในสมการการถดถอย 4 วิธีเช่นเดียวกับแบบจำลองการถดถอยพหุคูณ ได้แบบจำลองดังแสดงในสมการที่ 38-40

สมการการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Enter เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} ECT = & -1696.514 + 0.497B_1G_1 + 1.904B_1L - 1.281B_1H - 0.094G_1L + 1.070G_1H + 0.463G_4B_5 \\ & + 0.68G_4L + 3.248G_4F_2h + 2.636B_5L + 15.89B_5H + 0.261G_5L - 0.945G_5H - 0.578G_5F_2h \\ & - 2.388L^2 - 1.931LH - 2.543H^2 - 7.646HF_2h \end{aligned} \quad (38)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_4$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2
	$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$L$	คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$H$	คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก
	$F_2h$	คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Enter ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยออกเบบนั้นมี ความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลิโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกเบบ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกเบบต่าง ๆ

สมการการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Stepwise และ Forward เป็นดังนี้

$$ECT = -247.881 - 45.896LF_2h + 1.576B_1G_1 + 1.741G_2L + 13.271B_5L - 1.185B_1G_5 \quad (39)$$

โดยที่	$B_1$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_1$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า
	$G_2$	คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 1
	$B_5$	คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง
	$G_5$	คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง

- L คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
 H คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
 $F_{2,h}$  คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Stepwise/Forward ซึ่งให้เห็นเช่นเดียวกันว่าปัจจัยออกเบบนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลิโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกเบบ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกเบบต่าง ๆ

สมการการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} ECT = & -1676.918 + 0.429B_1G_1 + 2.303B_1L + 0.75G_1H + 0.487G_4B_5 + 0.641G_4L + 3.19G_4F_{2,h} \\ & + 2.845B_5L + 12.712B_5H + 0.19G_5L - 0.654G_5H - 0.576G_5F_{2,h} - 2.428L^2 - 2.234LH \\ & - 4.962H^2 \end{aligned} \quad (40)$$

- โดยที่  $B_1$  คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า  
 $G_1$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า  
 $G_4$  คือ น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2  
 $B_5$  คือ ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง  
 $G_5$  คือ น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง  
 L คือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
 H คือ ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก  
 $F_{2,h}$  คือ ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 2

แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward ซึ่งให้เห็นเช่นกันอีกว่าปัจจัยออกเบบนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบไม่เชิงเส้น โดยอยู่ในรูปโพลิโนเมียลอันดับที่สองของปัจจัยออกเบบและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยออกเบบต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนในข้อมูลชุดทดสอบระหว่างแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลทั้ง 4 แบบที่สร้างขึ้นให้ผลดังตารางที่ 25 พบว่าแบบจำลองการถดถอยโพลิโน

เมื่อยกทั้งแบบ Enter และ Backward นั้นมีความคลาดเคลื่อนต่ำใกล้เคียงกัน และเป็นไปตามข้อสมมติทางสถิติทุกประการ

**ตารางที่ 25** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

วิธีการคัดเลือกตัวแปร	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
Enter	8.74	10.19	1.59	ผ่าน
Stepwise/Forward	12.64	16.65	2.71	ผ่าน
Backward	8.66	9.91	1.62	ผ่าน

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลีโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของข้อมูลชุดทดสอบที่ถูกต้องมากที่สุดในแต่ละกลุ่ม (ตารางที่ 26) พบว่าแบบจำลองการถดถอยแบบโพลีโนเมียลแบบ Backward มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า หรือสามารถจำลองความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน ได้ดีกว่านั่นเอง

**ตารางที่ 26** เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองการถดถอยพหุคูณและแบบจำลองการถดถอยแบบโพลีโนเมียลในการทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น

แบบจำลองการถดถอย	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)	ผลการทดสอบข้อสมมติทางสถิติ
พหุคูณแบบ Stepwise/Forward	10.88	14.40	2.27	ผ่าน
โพลีโนเมียลแบบ Backward	8.66	9.91	1.62	ผ่าน

#### 2.3.4 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ

ผลการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ (BPN) ที่โครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ต่างๆในการทำนายค่าความ

ด้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค5 และแบบจำลอง BPN ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูป MAE, RMSE และ MAPE ต่ำที่สุด แสดงในตารางที่ 27

**ตารางที่ 27** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

จำนวนนิรอน ในชั้นซ้อน	กฎการ เรียนรู้	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
2	Delta	23,000	1	8.36	11.67	1.35

### 2.3.5 แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี

ผลการสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี (RBFN) ที่โครงสร้างและพารามิเตอร์การเรียนรู้ต่างๆ ในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก แสดงในตารางภาคผนวกที่ ค6 และแบบจำลอง RBFN ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูป MAE, RMSE และ MAPE ต่ำที่สุดแสดงในตารางที่ 28

**ตารางที่ 28** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

จำนวนนิรอน ในชั้นซ้อน	กฎการ เรียนรู้	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
7	Delta	3,000	3	16.03	31.13	2.48

### 3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

#### 3.1 แบบจำลองสำหรับทำนายทั้งแผนกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

การเปรียบเทียบความถูกต้องในการใช้งานทั่วไปจากข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (ECT) ของแผนกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น ได้ผลดังตารางที่ 29

**ตารางที่ 29** ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในการทำนายค่า ECT สำหรับกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

แบบจำลอง	MAE (N)		RMSE (N)		MAPE (%)	
	ชุด	ชุด	ชุด	ชุด	ชุด	ชุด
	ฝึก	ทดสอบ	ฝึก	ทดสอบ	ฝึก	ทดสอบ
Whitsitt	68.29	36.64	111.08	56.81	19.29	13.17
Markstorm	65.78	42.45	107.42	63.06	19.10	15.13
การถดถอยโพลิโนเมียล	13.57	13.66	17.69	17.86	5.81	5.71
แบบForward						
การถดถอยโพลิโนเมียล	8.16	14.58	11.77	17.62	3.53	5.14
แบบBackward						
16-12-1 BPN*	10.21	11.79	14.57	15.94	3.95	4.23
16-9-1 RBFN*	48.58	33.95	65.72	54.45	18.19	12.45

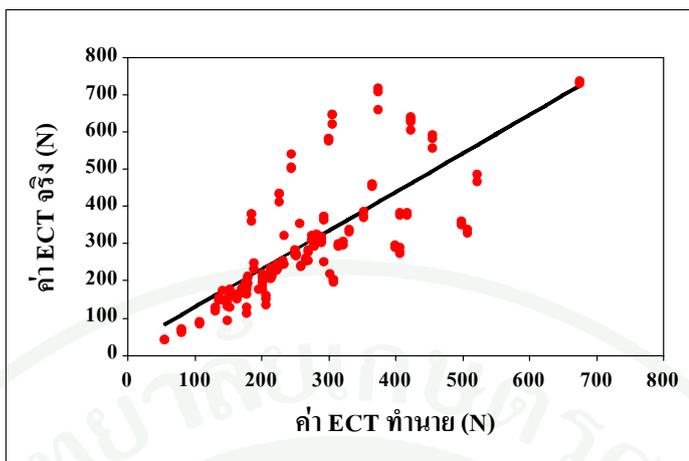
หมายเหตุ \* แสดงจำนวนตัวแปรนำเข้า จำนวนหน่วยซ่อน และจำนวนตัวแปรผลลัพธ์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแง่ความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการใช้งานทั่วไป พบว่า แบบจำลอง BPN มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบ หรือมีความถูกต้องในการทำนายสูง นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนในข้อมูลชุดทดสอบยังสูงกว่าในชุดฝึกไม่มากนัก แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการใช้งานทั่วไป หรือสามารถทำนายข้อมูลชุดใหม่ ๆ ที่ไม่ได้ใช้สร้างแบบจำลองได้ดีกว่า ถัดมาคือ แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward แบบจำลองการถดถอยแบบโพลิโนเมียล Forward และ

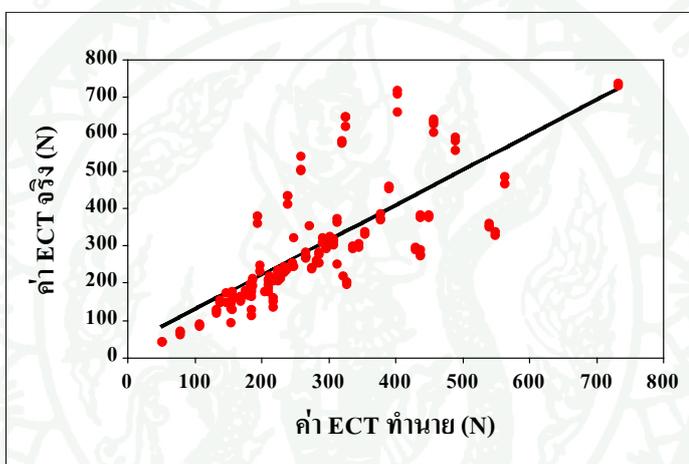
แบบจำลอง RBFN ส่วนแบบจำลองของ Whitsitt (1990) และแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) นั้นมีความถูกต้องในการทำนายค่าค่อนข้างต่ำมาก การที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแบบจำลอง BPN เป็นแบบจำลองที่มีคุณสมบัติ Universal Approximater คือ สามารถจำลองความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนมากได้ถึงระดับความถูกต้องใด ๆ ที่ต้องการได้ (Hornik and White, 1989; Funahashi, 1989) และความสัมพันธ์ระหว่างค่า ECT กับปัจจัยออกแบบต่าง ๆ นั้นมีความซับซ้อนสูง ส่งผลให้แบบจำลองดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในการทำนายค่าความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูก เช่น แบบจำลองของ Whitsitt (1990) และแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) นั้นไม่สามารถจำลองความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดี

นอกจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE, RMSE และ MAPE แล้วยังสามารถพิจารณาความถูกต้องในการทำนายค่า ECT ของแบบจำลองได้จากแผนภาพเปรียบเทียบระหว่างค่า ECT จริงและค่า ECT ทำนายจากแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 10-11

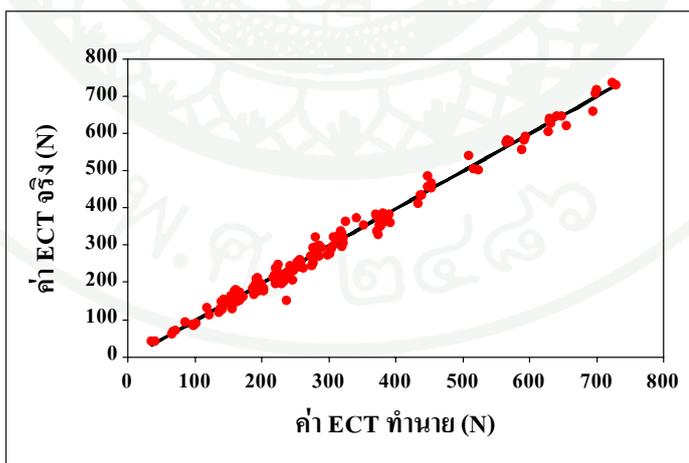
ภาพที่ 10-11 ชี้ให้เห็นว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของ Whitsitt (1990) แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) แบบจำลองการถดถอยพหุคูณ และแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือแบบจำลองทั้ง 4 ประเภทนี้จะมีความสามารถในการทำนายความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกในช่วงต่ำกว่า 400 N ได้ดีพอใช้ แต่เมื่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกสูงกว่า 400 N ไปแล้วจะทำนายผิดพลาดสูงขึ้นมาแตกต่างจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลและแบบจำลอง BPN ที่สามารถทำนายได้ใกล้เคียงกับค่าจริงทั้งสองช่วง



ก. แบบจำลองของ Whitsitt ( $R^2 = 55.7$ )

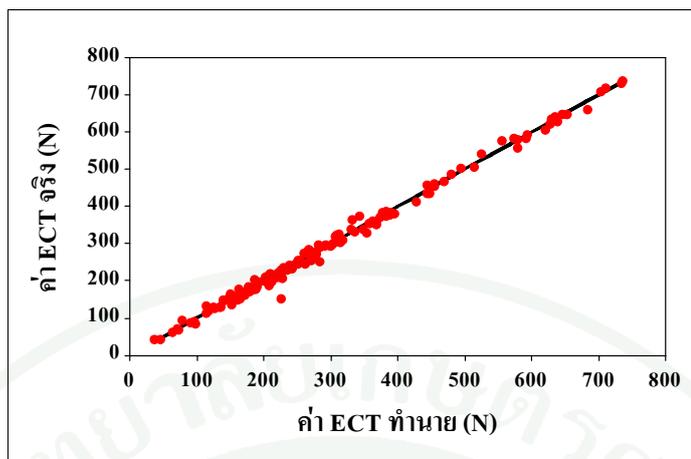


ข. แบบจำลองของ Markstorm ( $R^2 = 55.7$ )

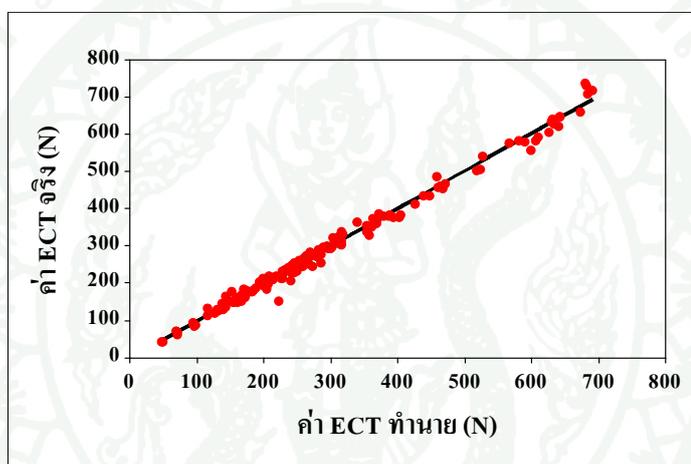


ค. แบบจำลองการถดถอยพหุนามแบบ Forward ( $R^2 = 98.8$ )

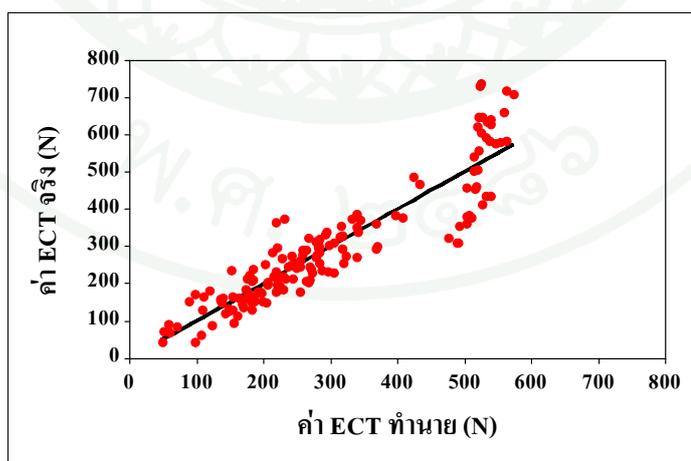
ภาพที่ 10 เปรียบเทียบระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดฝึก



ง. แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ( $R^2 = 99.5$ )

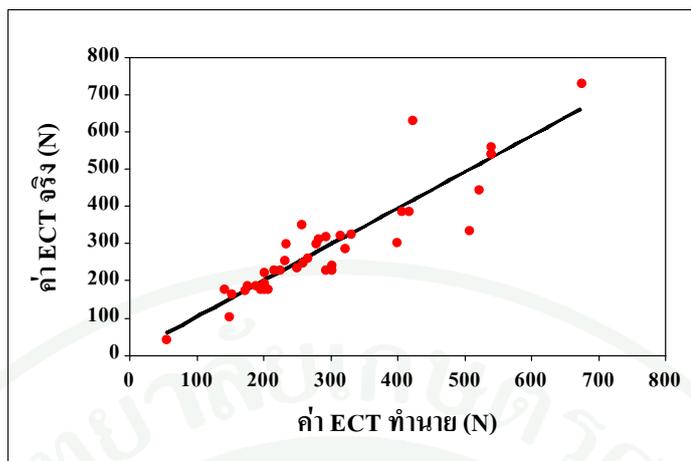


จ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ( $R^2 = 99.2$ )

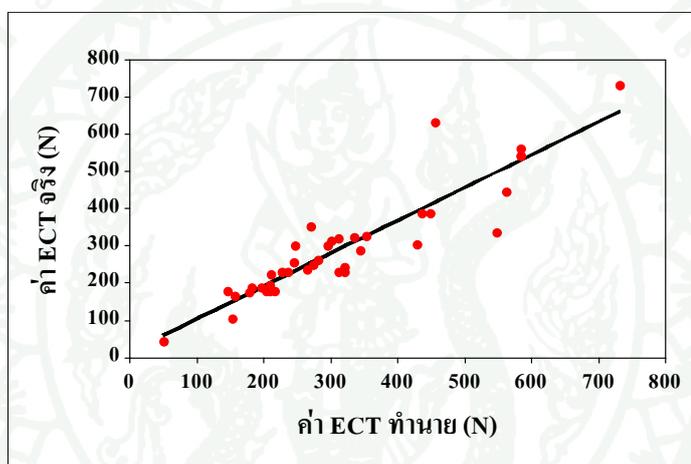


ฉ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ( $R^2 = 82.9$ )

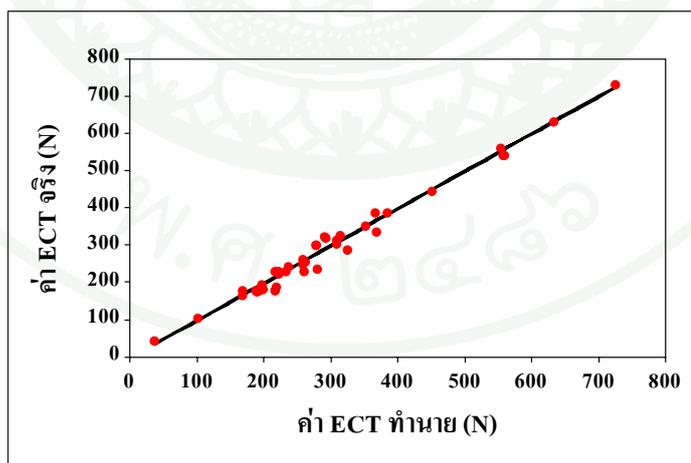
ภาพที่ 10 (ต่อ)



ก. แบบจำลองของ Whitsitt ( $R^2 = 84.2$ )

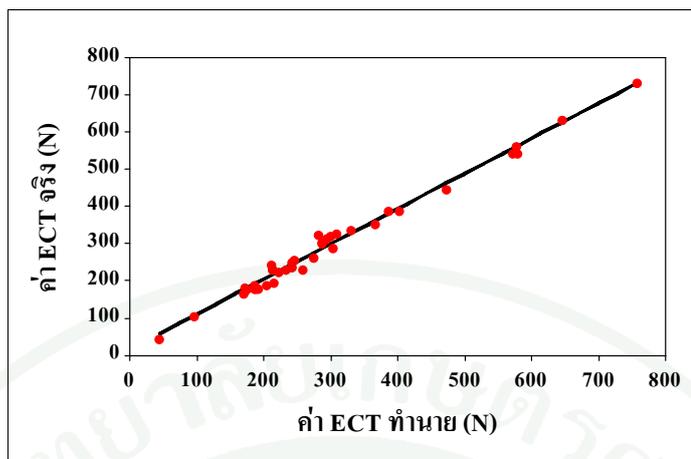


ข. แบบจำลองของ Markstorm ( $R^2 = 84.2$ )

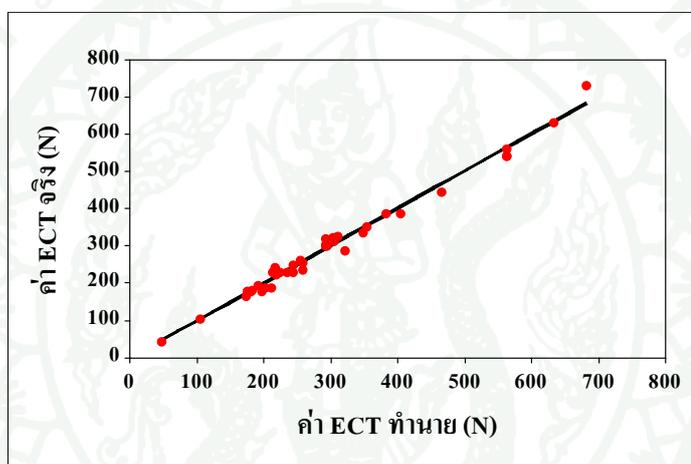


ค. แบบจำลองการถดถอยพหุนามแบบ Forward ( $R^2 = 98.5$ )

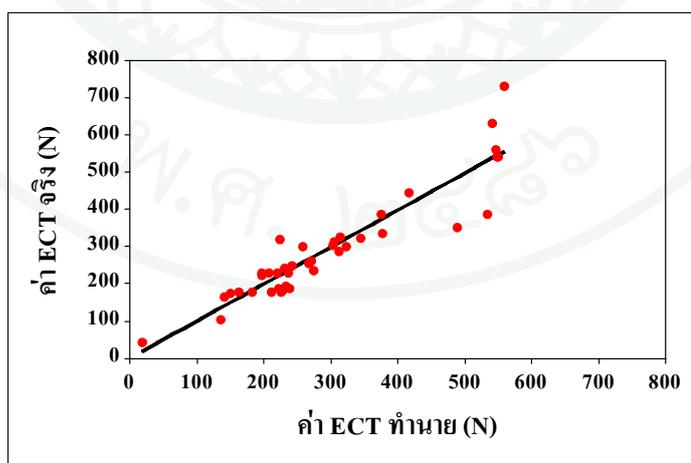
ภาพที่ 11 เปรียบเทียบระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดทดสอบ



ง. แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ( $R^2 = 98.8$ )



จ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ( $R^2 = 98.8$ )



ฉ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ( $R^2 = 86.3$ )

ภาพที่ 11 (ต่อ)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้นในด้านความถูกต้องในการทำนายความสามารถในการใช้งานทั่วไปแล้วสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง BPN และแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward มีความถูกต้องในการทำนายและความสามารถในการใช้งานทั่วไปสูง ซึ่งเป็นแบบจำลองทางเลือกสำหรับการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น โดยแบบจำลอง BPN ที่มีความถูกต้องในการทำนายและความสามารถการใช้งานทั่วไปสูงกว่าเป็นตัวเลือกอันดับแรก

### 3.2 แบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

การเปรียบเทียบความถูกต้องในการใช้งานทั่วไปจากค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบ การทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (ECT) ของแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้น ได้ผลดังตารางที่ 30

ตารางที่ 30 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

แบบจำลอง	MAE (N)		RMSE (N)		MAPE (%)	
	ชุดฝึก	ชุดทดสอบ	ชุดฝึก	ชุดทดสอบ	ชุดฝึก	ชุดทดสอบ
	Whitsitt	32.92	32.27	49.44	50.63	14.19
Markstorm	31.49	27.19	41.64	39.80	14.97	16.59
การถดถอยพหุนามแบบ Enter	16.08	19.17	21.27	25.37	8.00	9.61
10-10-1 BPN*	9.60	14.16	12.84	21.85	4.90	7.81
10-9-1 RBFN*	36.13	30.64	45.07	40.69	16.63	16.85

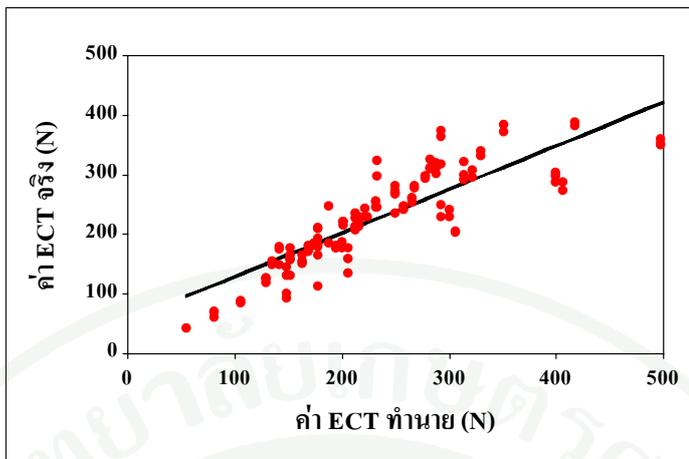
หมายเหตุ \* แสดงจำนวนตัวแปรนำเข้า จำนวนหน่วยซ่อน และจำนวนตัวแปรผลลัพธ์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแง่ความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการใช้งานทั่วไป พบว่า แบบจำลอง BPN มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในข้อมูลชุดฝึก และชุด

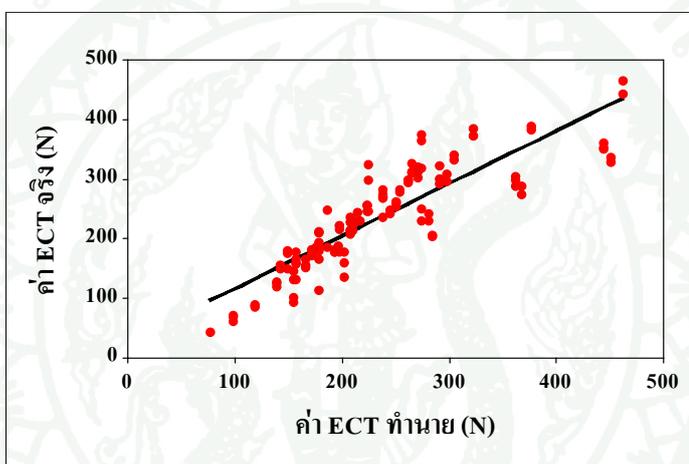
ทดสอบ แสดงให้เห็นว่ามีความถูกต้องในการทำนายและความสามารถในการใช้งานทั่วไปได้ดี ถัดมาคือ แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter ในขณะที่แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) แบบจำลองของ Whitsitt (1990) และแบบจำลอง RBFN มีความถูกต้องในการทำนายค่าต่ำกว่ามาก

นอกจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE, RMSE และ MAPE แล้วยังสามารถพิจารณาความถูกต้องในการทำนายค่า ECT ของแบบจำลองได้จากแผนภาพเปรียบเทียบระหว่างค่า ECT จริงและค่า ECT ทำนายจากแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 12-13

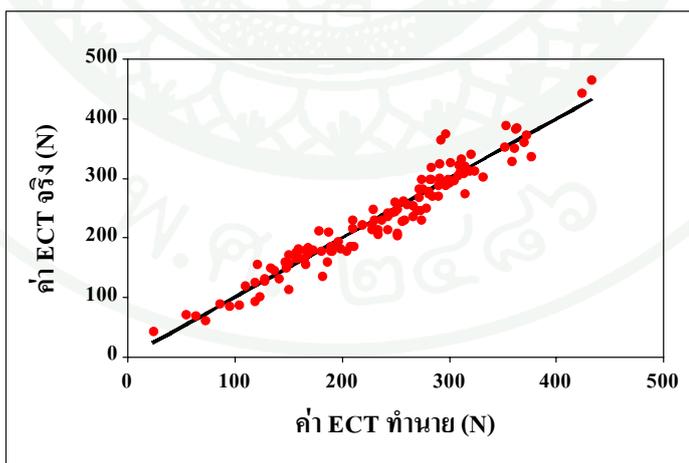
ภาพที่ 12-13 ยืนยันว่าแบบจำลองของ Whitsitt (1990) และแบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) จะทำนายผิดพลาดสูงกว่าแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter และแบบจำลอง BPN โดยเฉพาะในข้อมูลชุดทดสอบ แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถการใช้งานทั่วไปต่ำ อย่างไรก็ตามแบบจำลอง BPN เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น



ก. แบบจำลองของ Whitsitt ( $R^2 = 76.7$ )

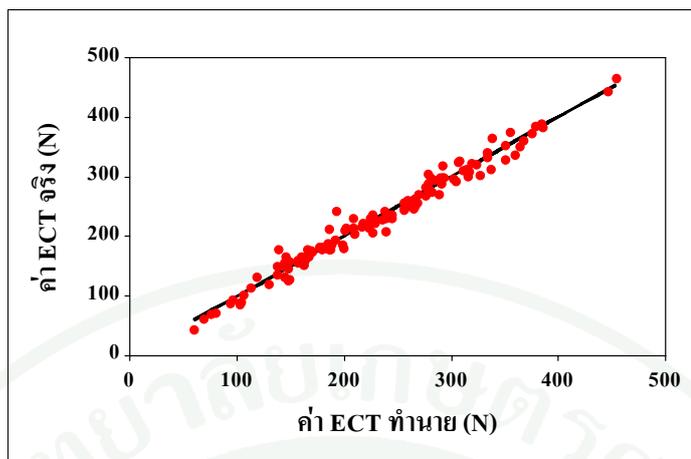


ข. แบบจำลองของ Markstorm ( $R^2 = 76.7$ )

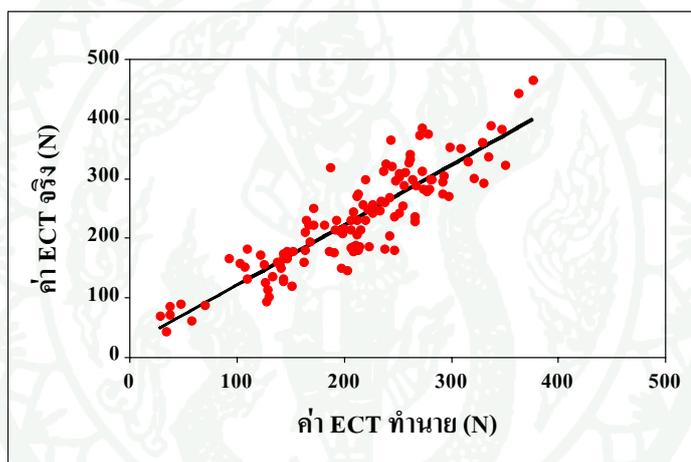


ค. แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter ( $R^2 = 93.14$ )

ภาพที่ 12 เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดฝึกสำหรับกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

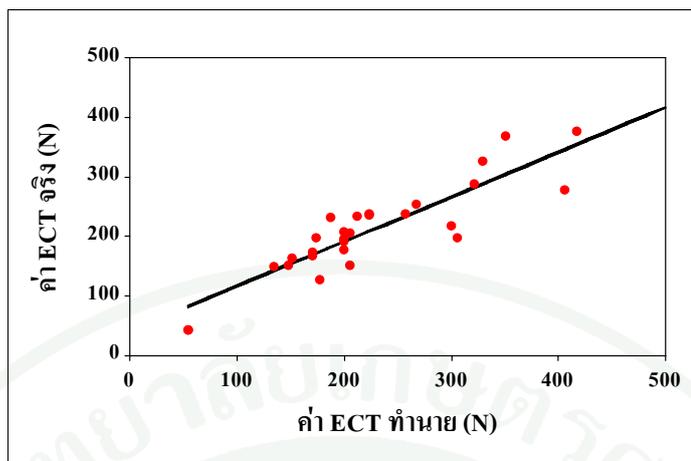


ง. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ( $R^2 = 97.6$ )

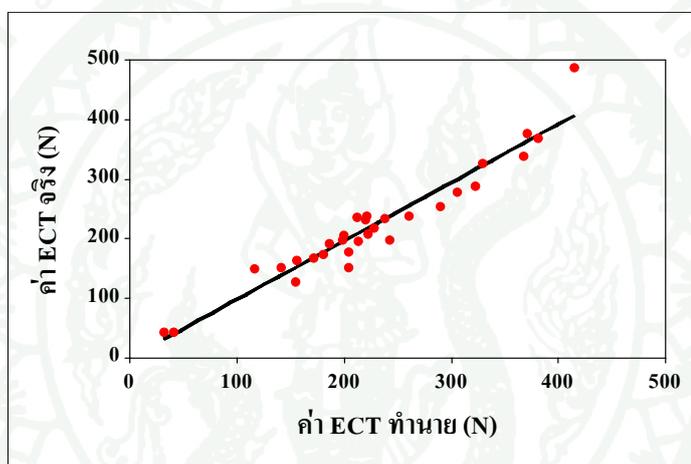


จ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ( $R^2 = 78.2$ )

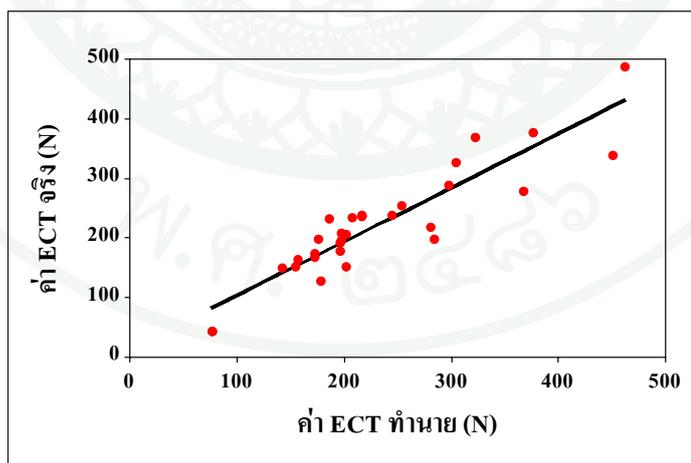
ภาพที่ 12 (ต่อ)



ก. แบบจำลองของ Whitsitt ( $R^2 = 83.2$ )

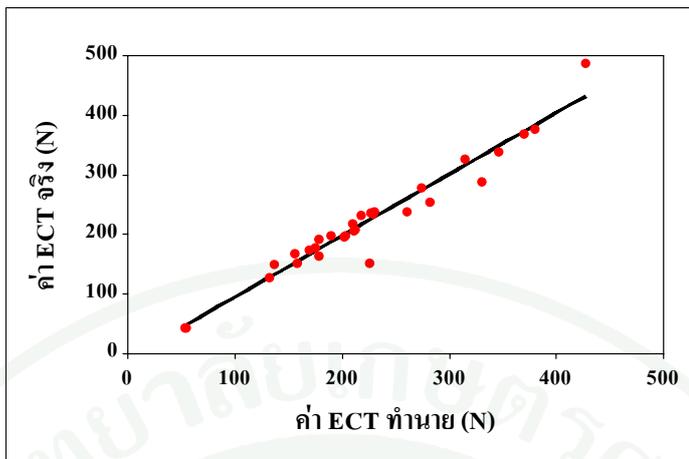


ข. แบบจำลองของ Markstorm ( $R^2 = 83.2$ )

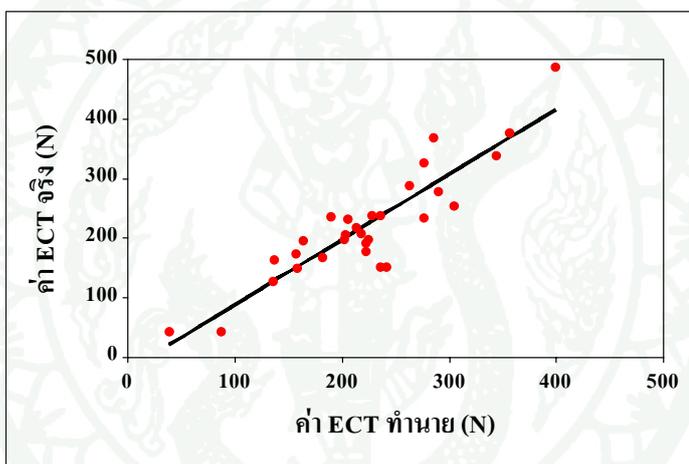


ค. แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Enter ( $R^2 = 92.7$ )

ภาพที่ 13 เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดทดสอบสำหรับกระดาษ  
ลูกฟูกประเภท 3 ชั้น



ง. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ( $R^2 = 94.5$ )



จ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ( $R^2 = 81.0$ )

### ภาพที่ 13 (ต่อ)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นในด้านความถูกต้องในการทำนาย ความสามารถในการใช้งานทั่วไป แล้วสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง BPN เป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องในการทำนายและความสามารถในการใช้งานทั่วไปสูงจึงให้เป็นตัวเลือกอันดับแรก

### 3.3 แบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

การเปรียบเทียบความถูกต้องในการใช้งานทั่วไปจากค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดฝึกและชุดทดสอบในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง (ECT) ของแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น ได้ผลดังตารางที่ 31

ตารางที่ 31 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับทำนายค่า ECT ของกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

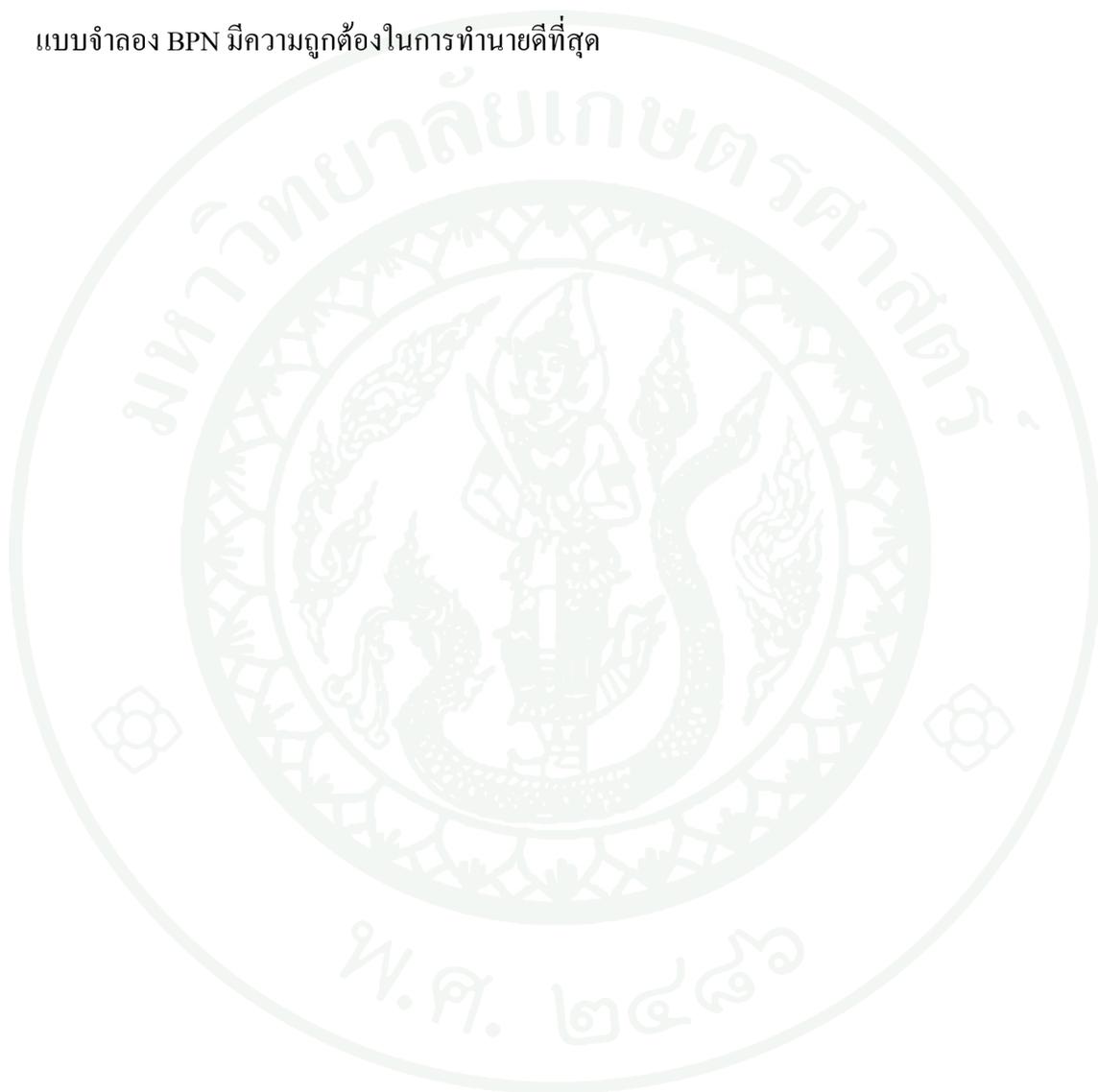
แบบจำลอง	MAE (N)		RMSE (N)		MAPE (%)	
	ชุดฝึก	ชุดทดสอบ	ชุดฝึก	ชุดทดสอบ	ชุดฝึก	ชุดทดสอบ
Whitsitt	161.15	187.08	191.16	225.63	30.87	31.68
Markstorm	98.34	99.11	118.16	130.00	22.56	21.37
การถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise/Forward	15.53	10.88	20.15	14.40	3.01	2.27
การถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward	7.12	8.66	9.14	9.91	1.43	1.62
16-2-1 BPN*	7.26	8.36	9.28	11.67	1.48	1.35
16-7-1 RBFN*	35.79	16.03	47.87	31.13	7.23	2.48

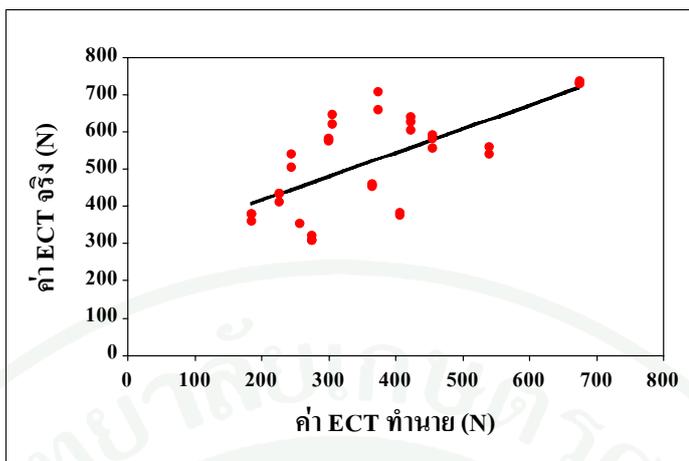
หมายเหตุ \* แสดงจำนวนตัวแปรนำเข้า จำนวนหน่วยซ่อน และจำนวนตัวแปรผลลัพธ์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแง่ความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการใช้งานทั่วไป พบว่าแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward และแบบจำลองแบบจำลอง BPN มีความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า ECT น้อยที่สุดในข้อมูลชุดฝึก และชุดทดสอบ หรือมีความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการใช้งานทั่วไปดีที่สุด ถัดมาคือ แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise/Forward แบบจำลอง RBFN ในขณะที่แบบจำลองที่ปรับจากแบบจำลองของ Whitsitt โดย Markstorm (1999) และ แบบจำลองของ Whitsitt (1990) มีความถูกต้องในการทำนายค่าต่ำที่สุด

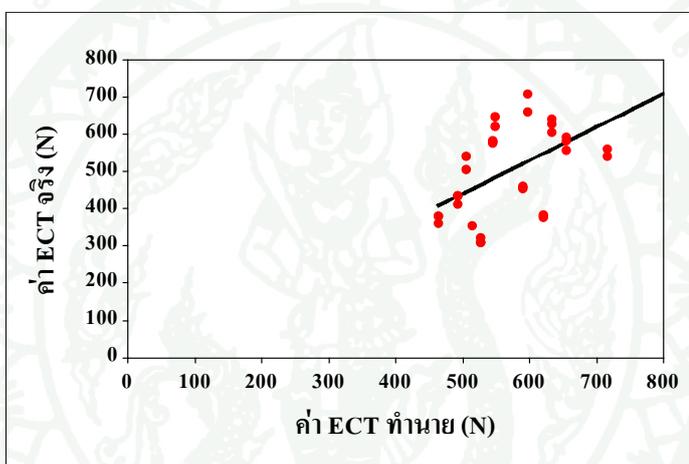
นอกจากการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE, RMSE และ MAPE แล้วยังสามารถพิจารณาความถูกต้องในการทำนายค่า ECT ของแบบจำลองได้จากแผนภาพเปรียบเทียบระหว่างค่า ECT จริงและค่า ECT ทำนายจากแบบจำลองดังแสดงในภาพที่ 14-15

ภาพที่ 14-15 ยืนยันว่าแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward และแบบจำลอง BPN มีความถูกต้องในการทำนายดีที่สุด

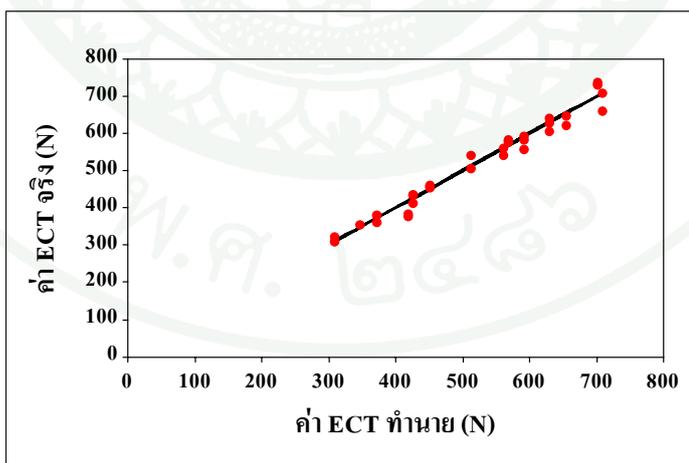




ก. แบบจำลองของ Whitsitt ( $R^2 = 44.5$ )

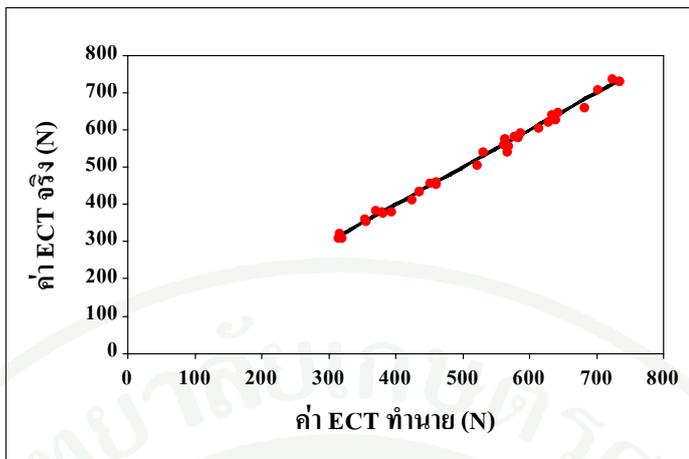


ข. แบบจำลองของ Markstorm ( $R^2 = 44.5$ )

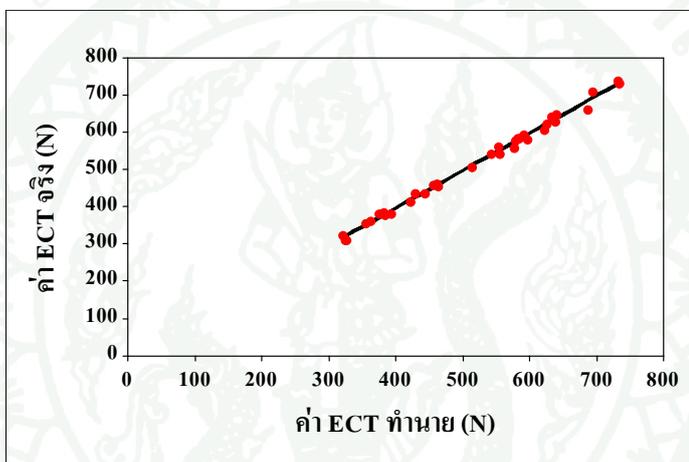


ค. แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise/Forward ( $R^2 = 97.5$ )

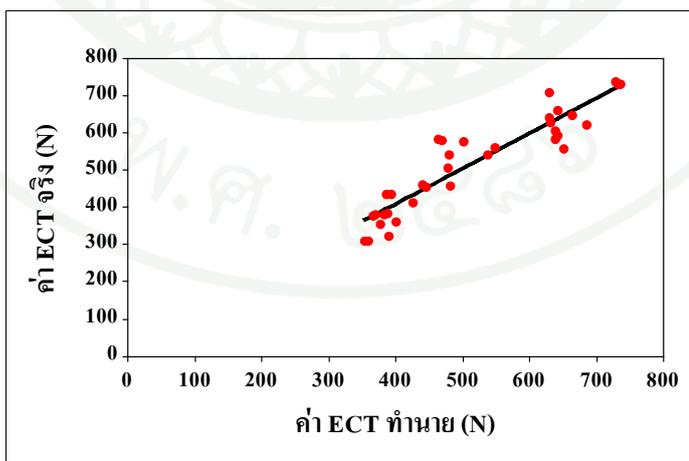
ภาพที่ 14 เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดฝึกสำหรับแผ่นกระดาษ  
ลูกฟูก 5 ชั้น



ง. แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ( $R^2 = 99.5$ )

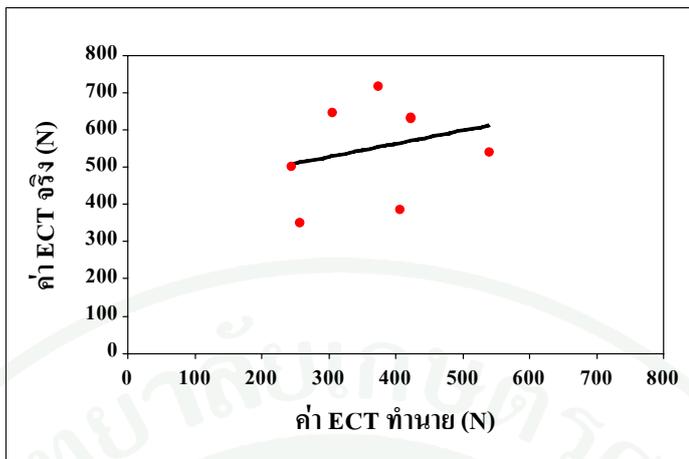


จ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ( $R^2 = 99.5$ )

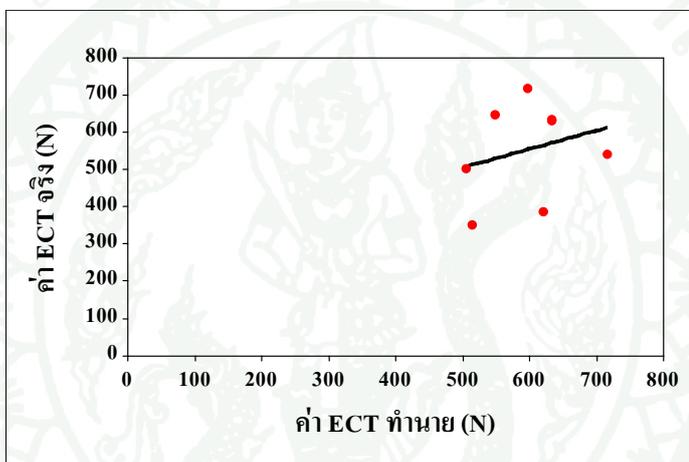


ฉ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ( $R^2 = 86.3$ )

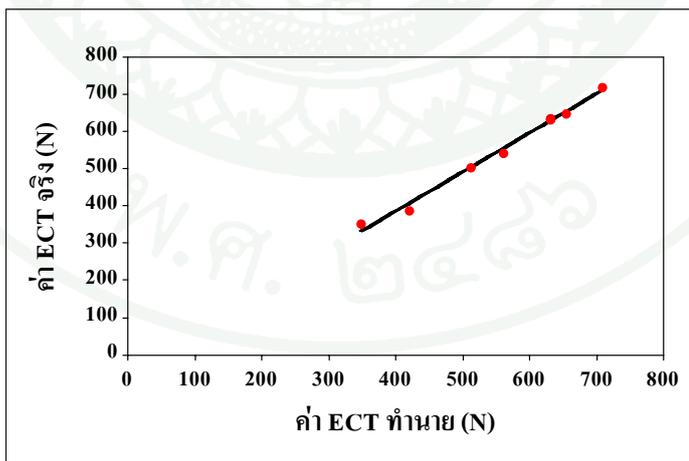
ภาพที่ 14 (ต่อ)



ก. แบบจำลองของ Whitsitt ( $R^2 = 7.2$ )

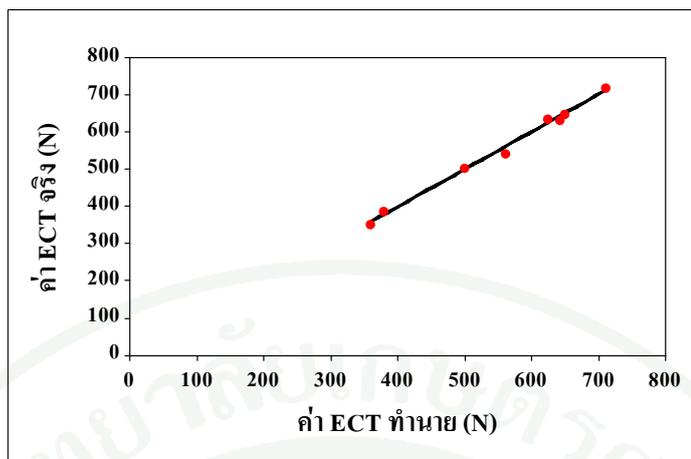


ข. แบบจำลองของ Markstorm ( $R^2 = 7.2$ )

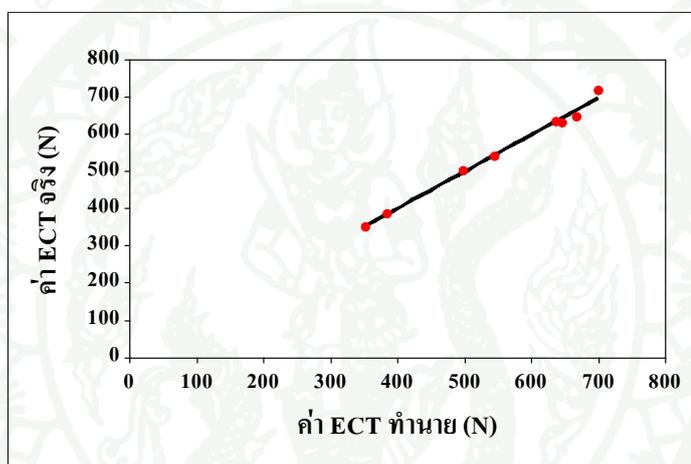


ค. แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบ Stepwise/Forward ( $R^2 = 99.0$ )

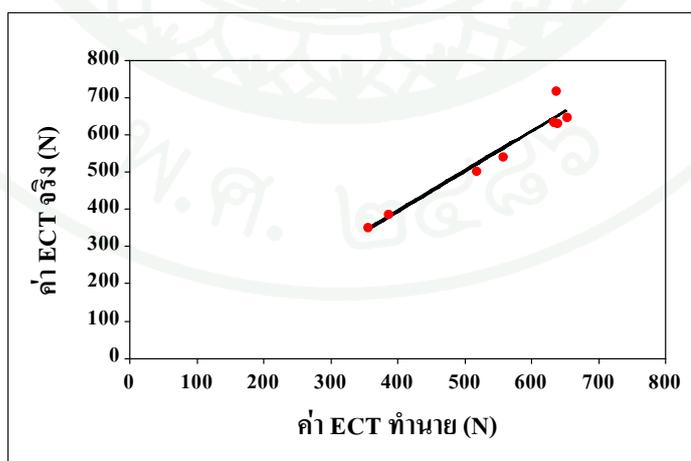
ภาพที่ 15 เปรียบเทียบค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลองในข้อมูลชุดทดสอบสำหรับ แผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น



ง. แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ( $R^2 = 99.4$ )



จ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ( $R^2 = 99.1$ )



ฉ. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบฐานรัศมี ( $R^2 = 94.3$ )

ภาพที่ 15 (ต่อ)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 5 ชั้นในด้านความถูกต้องในการทำนาย และความสามารถในการใช้งานทั่วไปแล้วสามารถสรุปได้ว่า การถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward เป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องในการทำนายและความสามารถในการใช้งานทั่วไปจึงให้เป็นตัวเลือกอันดับแรก

#### 4. ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูง

ผลบ่งชี้ปัจจัยออกแบบที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงหรือมีความสำคัญต่อการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาดลูกฟูกจำแนกตามประเภทของแบบจำลองที่สร้างชั้น 3 แบบคือ แบบจำลองสำหรับทำนายทั้งแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น แบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้น และแบบจำลองสำหรับทำนายเฉพาะแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 5 ชั้น เป็นดังนี้

##### 4.1 ปัจจัยออกแบบที่มีความสำคัญต่อแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงที่สุด 3 อันดับของแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงสำหรับทำนายทั้งแผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้นแสดงในตารางที่ 32 เนื่องจากแบบจำลอง BPN มีความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการใช้งานทั่วไปดีที่สุดจึงเลือกให้แบบจำลอง BPN เป็นหลักในการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่าปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงที่สุด 3 อันดับแรกคือน้ำหนักของกระดาดแผ่นเรียบด้านหลัง ( $G_3$ ) ความยาวของแผ่นกระดาดลูกฟูก (L) และน้ำหนักของกระดาดทำลอนที่ 2 ( $G_4$ ) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระดาดลูกฟูก 5 ชั้น

ตารางที่ 32 ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงที่สุด 3 อันดับต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาดลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

แบบจำลอง	ลำดับความสำคัญปัจจัยออกแบบ		
	1	2	3
การถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward	$G_1B_2$	$G_3F_1h$	$B_2G_3$
16-12-1 BPN*	$G_5$	L	$G_4$

หมายเหตุ \* แสดงจำนวนตัวแปรนำเข้า จำนวนหน่วยช้อน และจำนวนตัวแปรผลลัพธ์

$G_1$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า,  $B_2$ = ชนิดกระดาษทำลอนที่ 1,  $G_3$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบกลาง,  $G_4$ = น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2,  $G_5$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง,  $L$ = ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก,  $F_{1,h}$ = ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1

#### 4.2 ปัจจัยออกแบบที่มีความสำคัญต่อแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลที่มากที่สุดจากแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงสำหรับทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นแสดงในตารางที่ 33 เนื่องจากแบบจำลอง BPN มีความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการใช้งานทั่วไปที่ดีที่สุดจึงเลือกให้แบบจำลอง BPN เป็นหลักในการวิเคราะห์ พบว่าปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงสุด 3 อันดับแรกคือ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก ( $L$ ) น้ำหนักของกระดาษทำลอนที่ 1 ( $G_2$ ) และน้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง ( $G_3$ )

ตารางที่ 33 ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงสุด 3 อันดับต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

แบบจำลอง	ลำดับความสำคัญปัจจัยออกแบบ		
	1	2	3
การถดถอยพหุคูณแบบ Enter	L	$G_3$	$F_{1,m}$
10-10-1 BPN*	L	$G_2$	$G_3$

หมายเหตุ \* แสดงจำนวนตัวแปรนำเข้า จำนวนหน่วยช้อน และจำนวนตัวแปรผลลัพธ์

$L$ = ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก,  $G_2$ = น้ำหนักกระดาษทำลอน,  $G_3$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง,  $F_{1,m}$ = จำนวนลอนลูกฟูกต่อเมตร

#### 4.3 ปัจจัยออกแบบที่มีความสำคัญต่อแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลที่มากที่สุดจากแบบจำลองที่มีความถูกต้องสูงสำหรับทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น แสดงในตารางที่ 34 เนื่องจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward มีความถูกต้องในการทำนายค่า ECT และความสามารถในการ

ใช้งานทั่วไปที่ดีที่สุดจึงเลือกให้แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward เป็นหลักในการ  
 วิจารณ์ พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดคือ ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยออกแบบ ซึ่งมีปัจจัย  
 ออกแบบดังต่อไปนี้ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก (L) น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2 ( $G_4$ ) ความ  
 สูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก (H) น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_1$ ) น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบ  
 ด้านหลัง ( $G_5$ )

ตารางที่ 34 ปัจจัยออกแบบที่มีอิทธิพลสูงสุด 3 อันดับต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูก  
 ประเภท 5 ชั้น

แบบจำลอง	ลำดับความสำคัญปัจจัยออกแบบ		
	1	2	3
การถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward	$G_4L$	$G_1H$	$G_5H$
16-2-1 BPN*	L	$F_{1h}$	$B_1$

หมายเหตุ \* แสดงจำนวนตัวแปรนำเข้า จำนวนหน่วยช้อน และจำนวนตัวแปรผลลัพธ์

L= ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก,  $G_1$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า,  $B_1$ =  
 ชนิดกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า,  $G_5$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง, H= ความสูง  
 ของแผ่นกระดาษลูกฟูก,  $F_{1h}$ = ความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1

## 5. การเปรียบเทียบแบบจำลองในการทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษ ลูกฟูก

ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่ดีที่สุดในการทำนายค่า ECT ของ  
 แผ่นกระดาษลูกฟูกที่สร้างขึ้นจากข้อมูลทั้ง 3 รูปแบบ (ตารางที่ 35) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ  
 แบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองมีความใกล้เคียงกันและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในการใช้งานในระดับ  
 อุตสาหกรรม (เจนยูทช, 2551; Biancolini and Brutti, 2003) จึงเลือกแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลทั้ง  
 3 ชั้นและ 5 ชั้นไปใช้งานต่อ เนื่องจากมีความสามารถในการทำนายข้อมูลทั้ง 3 ชั้นและ 5 ชั้นได้ใน  
 แบบจำลองเดียวกัน

ตารางที่ 35 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า ECT

รูปแบบข้อมูล	แบบจำลอง	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
3 และ 5 ชั้น	BPN	11.79	15.94	4.23
3 ชั้น	BPN	14.16	21.85	7.81
5 ชั้น	การถดถอยโพลีโนเมียล	8.66	9.91	1.62

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยออกแบบในแบบจำลองที่สร้างขึ้นทั้ง 3 รูปแบบข้อมูล (ตารางที่ 36) ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกมากที่สุดคือ ปัจจัยความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก (L) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อแยกข้อมูลแผ่นกระดาษทั้ง 2 ประเภทออกจากกัน โดยการเพิ่มความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูกทำให้ค่า ECT เพิ่มขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญคือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระดาษแผ่นหลังไม่ว่าจะเป็นในแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น ( $G_3$ ) หรือกระดาษลูกฟูกแบบ 5 ชั้น ( $G_5$ ) หากกระดาษแผ่นเรียบ (Liner Paper) มีความแข็งแรงมากขึ้นจะส่งผลให้ค่า ECT เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 36 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง

รูปแบบข้อมูล	แบบจำลอง	ลำดับความสำคัญปัจจัยออกแบบ		
		1	2	3
3 และ 5 ชั้น	BPN	$G_5$	L	$G_4$
3 ชั้น	BPN	L	$G_2$	$G_3$
5 ชั้น	การถดถอยโพลีโนเมียล	$G_4L$	$G_1H$	$G_5H$

$G_1$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า,  $G_2$ = น้ำหนักกระดาษทำลอน,  $G_4$ = น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2,  $G_5$ = น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง, L= ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก, H= ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก

ปัจจัยออกแบบที่มีความสำคัญต่อค่า ECT มีแนวโน้มคล้ายทั้ง 3 แบบจำลอง คือ ปัจจัยความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบ และน้ำหนักของกระดาษทำลอน โดยที่การเพิ่มความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะส่งผลให้ค่า ECT เพิ่มขึ้น การเพิ่มน้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบหรือกระดาษทำลอนส่งผลให้ค่า ECT เพิ่มขึ้นเช่นกัน

## 6. การเลือกใช้งานแบบจำลองด้วยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า ECT สำหรับแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นนั้นมีตัวเลือกที่ใกล้เคียงกัน 2 ตัวเลือกได้แก่ แบบจำลอง 16-12-1 BPN และแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward ซึ่งมีความถูกต้องในการทำนายค่า ความสามารถในการใช้งานทั่วไปสูง จึงใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ในการตัดสินใจเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งให้ผลการวิจัยดังนี้

### 6.1 การให้น้ำหนักแก่ปัจจัยตัดสินใจ

จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านด้วยวิธีเปรียบเทียบปัจจัยตัดสินใจแบบเป็นคู่ ๆ ได้ลำดับความสำคัญจากกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นดังตารางที่ 37

ตารางที่ 37 ค่าน้ำหนักของปัจจัยตัดสินใจจากผู้เชี่ยวชาญแต่ละราย

ผู้เชี่ยวชาญ	น้ำหนักของปัจจัยตัดสินใจ				CR
	ความถูกต้อง	ระยะเวลา	ค่าใช้จ่าย	ปรับปัจจุบัน	
1. วิชาการ	0.675	0.169	0.059	0.097	0.09
2. วิชาการ	0.602	0.266	0.092	0.040	0.08
3. อุตสาหกรรม	0.563	0.025	0.290	0.123	0.02
4. วิชาการ/วิจัย	0.683	0.189	0.068	0.060	0.00
5. อุตสาหกรรม	0.620	0.032	0.064	0.284	0.05
ผู้เชี่ยวชาญทุกท่าน	0.625	0.133	0.120	0.122	0.00

ค่าน้ำหนักที่เกิดขึ้นมีค่า CR ไม่เกิน 0.10 แสดงว่าค่าน้ำหนักที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกันในหลักเหตุผลที่ยอมรับได้ ลำดับของความสำคัญจากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านอธิบายได้ดังนี้ ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 1 เป็นตัวแทนสายวิชาการความสำคัญกับความถูกต้องในการทำนายนมากที่สุด ตามมาด้วยระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน และค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 2 เป็นตัวแทนสายวิชาการอีกเช่นกันให้ความสำคัญกับความถูกต้องในการทำนายนมากที่สุด ตามมาด้วยระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน และความสามารถในการปรับแบบจำลองให้

เป็นปัจจุบัน ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 3 เป็นตัวแทนจากอุตสาหกรรม ให้ความสำคัญกับความถูกต้องในการทำนายมากที่สุด ตามมาด้วยค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน ความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน และระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 4 เป็นตัวแทนของสาขาวิชาการ โดยเฉพาะทางการวิจัยให้ความสำคัญกับความถูกต้องในการทำนายมากที่สุด ตามมาด้วยระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน และความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน ผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 5 เป็นตัวแทนจากอุตสาหกรรมให้ความสำคัญกับความถูกต้องในการทำนายมากที่สุดตามมาด้วย ความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน และระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน

จากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่านให้ความเห็นตรงกันว่าความถูกต้องในการทำนายมีความสำคัญมากที่สุด ส่วนอีก 3 ปัจจัยตัดสินใจจะมีแนวความคิดจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือด้านวิชาการและด้านผู้ประกอบการ โดยด้านวิชาการจะให้ความสำคัญกับระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งานมาเป็นลำดับที่ 2 ส่วนด้านผู้ประกอบการจะให้ความสำคัญกับระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งานน้อยที่สุด แล้วเมื่อทำการคำนวณหาค่าน้ำหนักของความสำคัญของปัจจัยตัดสินใจตามวิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นแล้วจะได้ลำดับความสำคัญซึ่งจะกลายมาเป็นค่าน้ำหนักของปัจจัยตัดสินใจที่จะใช้ตัดสินใจเลือกใช้งานแบบจำลองดังนี้ ปัจจัยตัดสินใจความถูกต้องในการทำนายมีความสำคัญเป็นลำดับแรก ตามมาด้วยระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน การปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน และค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน โดยที่การปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน และค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน มีความสำคัญใกล้เคียงกัน

## 6.2 การประเมินคะแนนของแบบจำลองทางเลือกในด้านปัจจัยตัดสินใจแต่ละตัว

ค่าน้ำหนักที่ผู้เชี่ยวชาญประเมินแบบจำลองจากปัจจัยตัดสินใจในด้านต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 38

ตารางที่ 38 คำนวณน้ำหนักของแต่ละแบบจำลองต่อปัจจัยตัดสินใจ

ปัจจัยตัดสินใจ	น้ำหนักของแต่ละแบบจำลอง	
	การถดถอยโพลีโนเมียล	BPN
ความถูกต้อง	0.447	0.553
ระยะเวลา	0.750	0.250
ค่าใช้จ่าย	0.612	0.388
ปรับปัจจุบัน	0.197	0.833

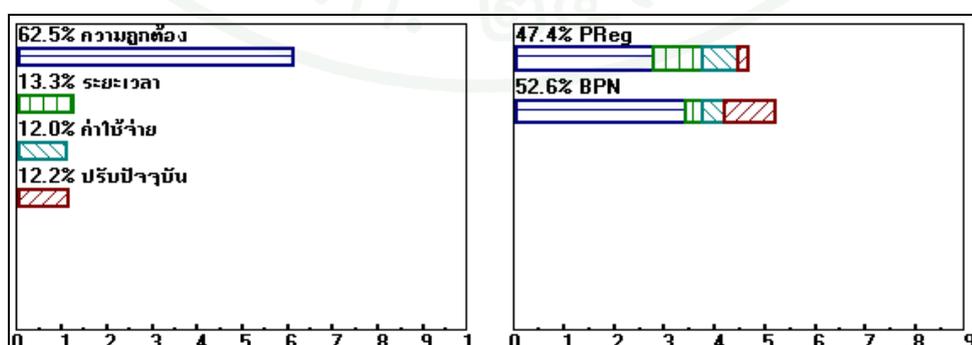
### 6.3 การเลือกใช้งานแบบจำลอง

ผลการวิเคราะห์คะแนนรวมพบว่าแบบจำลอง BPN เป็นตัวเลือกอันดับแรกด้วยค่าคะแนนเฉลี่ยจากปัจจัยตัดสินใจร้อยละ 52.6 และแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward เป็นตัวเลือกอันดับถัดมาด้วยค่าคะแนนเฉลี่ยจากปัจจัยตัดสินใจร้อยละ 47.4

### 6.4 การวิเคราะห์ผลการตัดสินใจ

#### 6.4.1 การวิเคราะห์ด้านน้ำหนักที่ใช้ตัดสินใจของแบบจำลอง

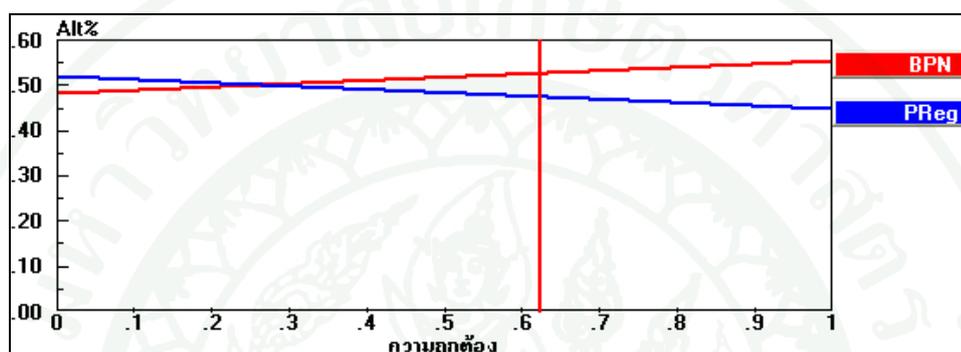
แผนภาพที่ 16 แสดงค่าน้ำหนักของปัจจัยตัดสินใจที่กระจายไปยังแบบจำลองพบว่าปัจจัยตัดสินใจความถูกต้องในการทำงานคือปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แบบจำลอง BPN ถูกเลือกเป็นตัวเลือกอันดับแรก



ภาพที่ 16 แสดงน้ำหนักที่ใช้ในการตัดสินใจแบบจำลอง

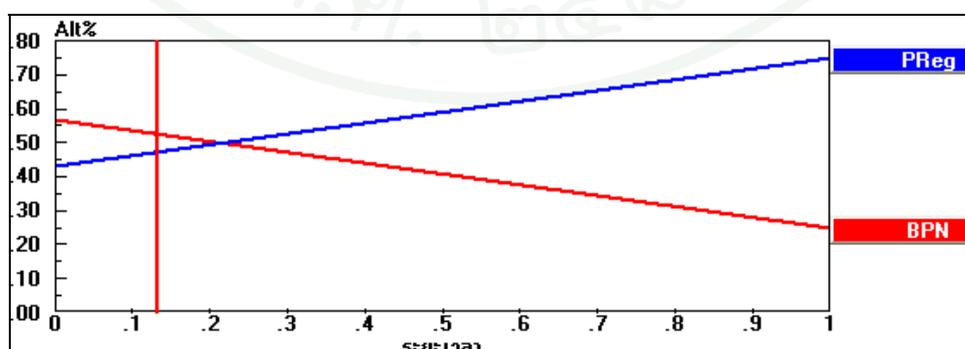
#### 6.4.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยตัดสินใจในการประเมินแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยตัดสินใจความถูกต้องในการทำนายแสดงในภาพที่ 17 พบว่าการที่แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward จะกลายเป็นตัวเลือกอันดับแรกจะต้องมีค่าน้ำหนักอยู่ประมาณ 0.3 ซึ่งหมายถึงต้องลดความสำคัญของความถูกต้องในการทำนายลงครึ่งหนึ่งการตัดสินใจจึงจะมีการเปลี่ยนแปลง



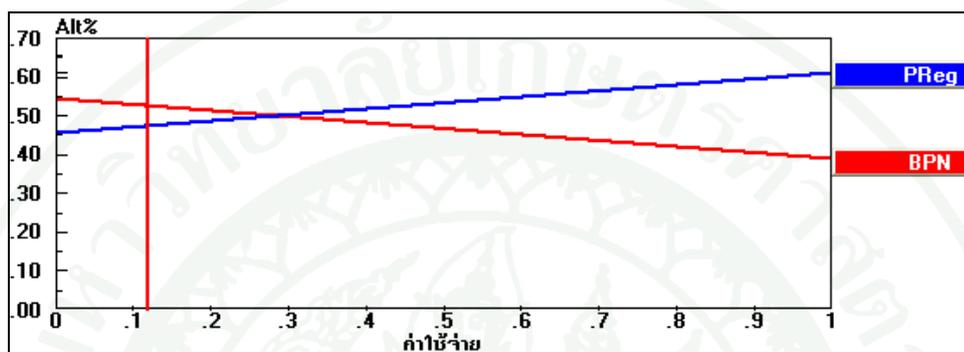
ภาพที่ 17 ความอ่อนไหวของความถูกต้องในการทำนาย

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยตัดสินใจระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งานแสดงในภาพที่ 18 เนื่องจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward เป็นแบบจำลองที่ใช้ระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งานน้อยกว่าแบบจำลอง BPN ทำให้หากเพิ่มความสำคัญแก่ปัจจัยตัดสินใจนี้จะทำให้แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward มีค่าเฉลี่ยทางเลือกเพิ่มขึ้น โดยต้องเพิ่มความสำคัญขึ้นประมาณ 1 เท่าตัวการตัดสินใจจึงจะมีการเปลี่ยนแปลง



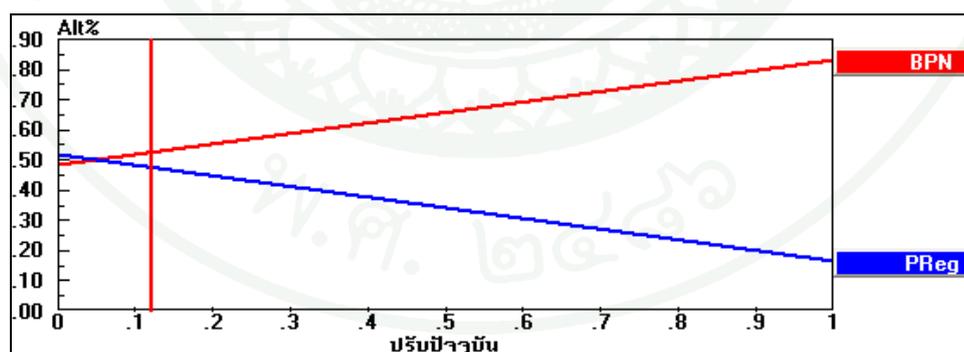
ภาพที่ 18 ความอ่อนไหวของระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยตัดสินใจค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน แสดงในภาพที่ 19 เนื่องจากแบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward เป็นแบบจำลองที่มีค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งานน้อยกว่าแบบจำลอง BPN ทำให้หากเพิ่มค่าความสำคัญแก่ปัจจัยตัดสินใจนี้จะทำให้แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward มีค่าเฉลี่ยทางเลือกเพิ่มขึ้น โดยต้องเพิ่มค่าความสำคัญขึ้นประมาณ 1.5 เท่าตัวการตัดสินใจจึงจะมีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 19 ความอ่อนไหวของค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของปัจจัยตัดสินใจความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบันแสดงในภาพที่ 20 พบว่าต้องลดค่าความสำคัญของปัจจัยนี้ลงครึ่งหนึ่งจึงจะทำให้แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward กลายเป็นตัวเลือกอันดับแรกแทน



ภาพที่ 20 ความอ่อนไหวของความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบัน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

จากการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ปัจจัย ออกแบบต่าง ๆ และการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของ แผ่นกระดาษลูกฟูก สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ผลการวิจัยยืนยันทฤษฎีว่ากระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้นมีค่าความต้านทานแรงกดใน แนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกสูงกว่ากระดาษลูกฟูก 3 ชั้น หรือมีความแข็งแรงกว่า โดยเฉพาะเมื่อ เพิ่มความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูกจะเห็นความแตกต่างเด่นชัดขึ้น

2. แบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นในแบบจำลองเดียว ได้แก่ แบบจำลองตัวเลือกอันดับแรกคือ แบบจำลอง 16-12-1 BPN โดยมีค่า ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูป MAE เป็น 11.79 นิวตันและ MAPE เป็น 4.23 % แบบจำลองนี้ระบุว่าปัจจัยออกแบบที่สำคัญได้แก่ น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง ( $G_3$ ) ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก (L) และน้ำหนักของกระดาษทำลอนที่ 2 ( $G_4$ ) ซึ่งเกี่ยวข้องกับ กระดาษลูกฟูก 5 ชั้นแบบจำลองอันดับสองคือ แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward มีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุดทดสอบในรูป MAE เป็น 14.58 นิวตันและ MAPE เป็น 5.14 % และระบุว่าปัจจัยออกแบบที่สำคัญได้แก่ น้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_1$ ) น้ำหนักของ กระดาษแผ่นเรียบกลาง (กระดาษแผ่นเรียบด้านหลังในแผ่นกระดาษลูกฟูกแบบ 3 ชั้น) ( $G_3$ ) ชนิด ของกระดาษทำลอนที่ 2 ( $B_4$ ) และความสูงของลอนลูกฟูกที่ 1 ( $F_{1,h}$ )

3. แบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้น ได้แก่ แบบจำลอง 10-10-1 BPN โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป MAE เป็น 14.16 นิวตันและ MAPE เป็น 7.81 % แบบจำลองนี้ระบุว่าปัจจัยออกแบบที่สำคัญได้แก่ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก (L) น้ำหนักของกระดาษทำลอน ( $G_2$ ) และน้ำหนักของกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง ( $G_3$ )

4. แบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 5 ชั้น ได้แก่ แบบจำลองการถดถอยโพลิโนเมียลแบบ Backward โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลชุด

ทดสอบในรูปแบบ MAE เป็น 8.66 นิวตันและ MAPE เป็น 1.62 % แบบจำลองนี้ระบุว่าปัจจัยออกแบบที่สำคัญได้แก่ ความยาวของแผ่นกระดาษลูกฟูก (L) น้ำหนักกระดาษทำลอนที่ 2 ( $G_4$ ) ความสูงของแผ่นกระดาษลูกฟูก (H) น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหน้า ( $G_1$ ) น้ำหนักกระดาษแผ่นเรียบด้านหลัง ( $G_2$ )

5. แบบจำลองที่คัดเลือกเพื่อใช้ในการทำนายค่า ECT ในอุตสาหกรรมคือ แบบจำลองที่ทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูก 3 ชั้นและ 5 ชั้นในแบบจำลองเดียวกันเนื่องจากมีความสามารถในการทำนายข้อมูลทั้ง 3 ชั้นและ 5 ชั้นได้ในแบบจำลองเดียวกัน และความคลาดเคลื่อนที่ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

6. การใช้ AHP ในการตัดสินใจเลือกระหว่างแบบจำลอง BPN หรือแบบจำลองโพลีโนเมียลแบบ Backward ที่สามารถทำนายค่า ECT ของแผ่นกระดาษลูกฟูกได้ทั้ง 3 ชั้นและ 5 ชั้น โดยใช้เกณฑ์การตัดสินใจ 4 ประการคือ ความถูกต้องในการทำนาย ระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งาน และความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบันพบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดในการนำไปใช้คือแบบจำลอง BPN โดยมีปัจจัยตัดสินใจที่สำคัญที่สุดคือความถูกต้องในการทำนาย

7. ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการตัดสินใจให้ความสำคัญแก่ปัจจัยตัดสินใจ ระยะเวลาในการพัฒนาและทดลองใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและใช้งานเพิ่มขึ้น และลดความสำคัญแก่ปัจจัยตัดสินใจ ความถูกต้องในการทำนาย ความสามารถในการปรับแบบจำลองให้เป็นปัจจุบันจะทำให้แบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลแบบ Backward มีโอกาสกลายเป็นตัวเลือกอันดับแรกแทน

### ข้อเสนอแนะ

1. แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียมแบบส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับที่สร้างขึ้นสามารถนำไปทำนายค่าแผ่นกระดาษลูกฟูกที่เตรียมจะทำการกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อประมาณค่าความแข็งแรงเบื้องต้นของกล่องกระดาษลูกฟูกได้

2. ปัจจัยนำเข้าแบบเชิงกลุ่มสามารถเปลี่ยนเป็นเชิงปริมาณเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งาน จะทำให้สามารถทำนายค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกของชนิดกระดาษที่ไม่ได้ใช้สร้างแบบจำลองได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กลุ่มบริษัทสยามบรรจุภัณฑ์. 2553. คู่มือผู้ซื้อผู้ใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษ. แหล่งที่มา:

[http://www.siamkraft.com/index.php?option=com\\_content&task=blogcategory&id=37&Itemid=61](http://www.siamkraft.com/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=37&Itemid=61), 8 สิงหาคม 2554.

กัลยา วานิชย์บัญชา. 2546. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

เจนอุท ศรียุ. 2551. การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนขนาดกล่องกระดาษลูกฟูกต่อความต้านทานแรงกดในแนวตั้งโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิจิตร รัตนถาวรกิติ. 2548. เอกสารประกอบการฝึกอบรมการทดสอบบรรจุภัณฑ์กระดาษ. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2528. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกล่องกระดาษลูกฟูก. มอก. 550-2528.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2555. สถิติอุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: [www.oie.go.th/industry\\_stat/210210.html](http://www.oie.go.th/industry_stat/210210.html), 30 มีนาคม 2555.

อัญญา มุสิกะเจริญ. 2546. รายงานการฝึกงาน ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 23.

อัญชลี กมลรัตนกุล, ไพศาล อนันต์นุกุล, อมรรัตน์ สวัสดิ์หัต และมยุรี ภาคกล้าเจียก. 2545. คู่มือการใช้กระดาษเพื่อการหีบห่อ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

- Albright, S. C., W. Winston and C. Zappe. 2005. **Data Analysis and Decision Making with Microsoft Excel**. 3<sup>rd</sup> ed. South Western Educational Publishing, USA.
- American Society for Testing Materials. 2005. **Standard practice for Selection of Corrugated Fiberboard Materials and Box Construction Based on Performance Requirements**. ASTM D5639/D5639M.
- Batelka, J. J. 1994. The effect of boxplant operations on corrugated board edge crush test. **TAPPI Journal** 77 (4): 193-198
- Biancolini, M. E. and C. Brutti. 2003. Numerical and Experimental Investigation of the Strength of Corrugated Board Packages. **Packaging Technology and Science** 16: 47–60.
- Canada, J.R. and W. G. Sullivan. 1989. **Economic and Multiattribute Evaluation of Advanced Manufacturing Systems**. Prentice Hall. Inc., USA
- Canada, J.R., W. G. Sullivan and J. A. White. 1996. **Capital Investment Analysis for Engineering and Management**. 2<sup>nd</sup> ed. Prentice Hall. Inc., USA.
- Dimitrov, K. 2010. **Relationship between the ECT-strength of Corrugated Board and the Compression Strength of Liner and Fluting Medium Papers**. MEng Thesis, University of Pretoria, Pretoria.
- Fausett, L. 1994. **Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications**. Prentice Hall. Inc., USA.
- Funahashi, K. 1989. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. **Neural Networks** 2: 183-192.

- Hahn, E.K., L.A. Carlsson and B.S. Westerlind. 1982. Edge-compression Fixture for Buckling Studies of Corrugated Board Panels. **Experimental Mechanics** 32 (3): 252-258.
- Hornik, K., M. Stinchcombe and H. White. 1989. Multilayer feedforward networks are universal approximators. **Neural Networks** 2: 359-366.
- International Business Machines Corporation. 2012. **IBM SPSS software for predictive analytics**. Available Source: <http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss>, February 1, 2012.
- Jang, D.S., J.H. Park, K.K. Seo and D. Wallace. 2002. Approximate Estimation of the Product Life Cycle Cost Using Artificial Neural Networks in Conceptual Design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 19: 461-471.
- Kroeschell, W. O. 1992. The edge crush test. **TAPPI Journal** 75 (1): 79-82.
- Kutner, M.H., C.J. Nachtsheim and J. Neter. 2008. **Applied Linear Statistical Models**. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-HILL Co. Inc., Singapore.
- Kyung, T.K. and K.K. Hwan. 2010. Comparing Handling and Space Costs for Various Types of Stacking Methods. **Computers & Industrial Engineering** 58: 501 – 508.
- Maltenfort, G. G. 1996. **Corrugated Shipping Containers: An Engineering Approach**. Jelmar Pub Co, New York.
- Markstrom, H. 1999. **Testing Methods and Instruments for Corrugated Boards**. 8th Edition, Lorentzen&Wettre, Ostervla.
- Mckee, R.C., J.W. Gander and J.R. Wachuta. 1961. Edgewise Compression Strength of Corrugated Board. **Project Report**. 11 July. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.

Mckee, R.C., J.W. Gander and J.R. Wachuta. 1962. Flexural stiffness of corrugated board.

**Project Report**. 4 March. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.

Mckee, R.C., J.W. Gander and J.R. Wachuta. 1963. Compression strength formula for corrugated boxes. **Paperboard Packaging** 48 (8): 149–159.

Mishra, R. J. Malik, I. Singh and J.P. Davim. 2010. Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates. **Materials & Design** 31 (6): 2790-2795.

NeuralWare. 1996. **Neural Computing: A Technology Handbook for Professional II/PLUS and NeuralWorks Explorer**. Technical Publication Group, USA.

NeuralWare. 2009. **NeuralWorks Predict**. Available Source:  
<http://www.neuralware.com/products.jsp>, February 1, 2012.

Orloff, D. I., P. M. Phelan and J. Challas. 1999. Impulse Drying of Board Grades: Converting Trials. **IPST Technical Paper Series** 799. Institute of Paper Science and Technology, Atlanta.

Panyarjun, O. and G. Burgess. 2001. Prediction of Bending Strength of Long Corrugated Boxes. **Packaging Technology and Science** 15: 49-53.

Popil, R. 2009. **What's important in liner and medium physical properties**. Available Source:  
[http://www.ipst.gatech.edu/faculty/popil\\_roman/newsletters.html](http://www.ipst.gatech.edu/faculty/popil_roman/newsletters.html), August 8, 2011.

Razi, M. A. and K. Athappilly. 2005. A comparative predictive analysis of neural networks (NNs), nonlinear regression and classification and regression tree (CART) models. **Expert Systems with Applications** 29: 65-74

- Saridemir, M. 2008. Prediction of compressive strength of concretes containing metakaolin and silica fume by artificial neural networks. **Advances in Engineering Software** 40 (5): 350-355.
- Saaty, T.L. 1996. **Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process**. Expert Choice Inc., Pittsburgh
- Schaepe, M and R.E. Popil. 2006. A Link Between Light-Weights and ECT Strength. **Corrugating International**: 3-5.
- Schrampf, K.E. and W. J. Whitsitt. 1988. Faster, Alternative ECT Test Procedure. **IPC Technical Paper Series** 289. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.
- Schwalbe, K. 2009. **Information Technology Project Management**. 6<sup>th</sup> ed. Course Technology, Boston
- Shahsavand, A. and A. Ahmadpour. 2005. Application of optimal RBF neural networks for optimization and characterization of porous materials. **Computers & Chemical Engineering** 29 (10): 2134-2143.
- Sheskin D.J. 2000. **Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures**. 2<sup>nd</sup> ed. Chapman & Hall, Florida.
- Talbi, N., A. Batti, R. Ayad and Y.Q. Guo, 2009. An analytical homogenization model for finite element modelling of corrugated cardboard. **Composite Structures** 88 (2): 280-289.
- The Institute of Paper Chemistry. 1965. Effect of Specimen Dimension on Edgewise Compression Tests of Linerboard. **Project Report**. 30 November. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2009. The edge crush test (ECT): its relationship to box compression and its derivation from containerboard edge stiffness.

**TAPPI Technical information papers 0304-9.** TAPPI, USA

Urbanik, T.J. 1990. Correcting for instrumentation with corrugated fiberboard edgewise crush test theory. **TAPPI Journal** 73 (10): 263-268.

Urbanik, T.J. 1997. Strength Criterion for Corrugated Fiberboard under long-term stress. **TAPPI Journal** 81 (3): 33-37.

Urbanik, T.J. 2008. Effect of Corrugated Flute Shape on Fibreboard Edgewise Crush Strength and Bending Stiffness. **The Corrugator** 3:47-63

Urbanik, T.J. and B. Frank. 2006. Box Compression Analysis of world-wide data spanning 46 years. **Wood and Fiber Science** 38 (3): 399-416.

Urbanik, T. J., A. H. Catlin, D. R. Friedman and R.C. Lund. 1994. Edgewise crush test streamlined by shorter time after waxing. **TAPPI Journal** 77: 83-86.

Westerlind, B. S. and L. A. Carlsson. 1992. Compressive response of corrugated board. **TAPPI Journal** 75(7): 147-154

Whitsitt, W.J. 1985. Compressive Strength Relationships and Factors. **IPC Technical Paper Series** 163. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.

Whitsitt, W.J. 1988. Papermaking Factors Affection Box Properties. In **TAPPI Corrugated Containers Conference**. 24-27 October 1988, Orlando.

Whitsitt, W.J.. 1990. Corrugated Board and Box Performance. **Paper Properties and Their Measurement** 20, Institute of Paper Science and Technology, Atlanta.

Whitsitt, W.J. and R. C. Mckee .1966. Effect of Box Dimensions and Edgewise Compression Strength on Box Stacking Life. **Project Report**. 21 September. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.

Whitsitt, W.J. and R. C. Mckee .1969. Relationship between high-low flute formation and the properties of the corrugating medium. **Project Report**. 24 December. The Institute of Paper Chemistry, Appleton.

Wilson, C.J. and B. Frank. 2009. An evaluation of ECT sample height for small flute board grades and Box Manufacturer's Certification compliance. **TAPPI Journal** 8 (6): 24-28.

Zhang, A. and L. Zhang. 2004. RBF neural networks for the prediction of building interference effects. **Computers & Structures** 82 (27): 2333-2339.





## การทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูก

มาตรฐานการทดสอบ ISO 3037: 1994

### เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง
3. Guide blocks

### วิธีการทดสอบ

1. นำแผ่นกระดาษลูกฟูกเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ  $27 \pm 1$  องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ  $65 \pm 2$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วางตัวอย่างบนแท่นทดสอบโดยใช้ Guide blocks ช่วยประคองตัวอย่าง
3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดในแนวตั้งโดยใช้อัตราเร็ว 12.5 มิลลิเมตร ( $\pm 2.5$  มิลลิเมตร) ต่อนาที เมื่อแท่นกดสัมผัสขอบด้านบนของแผ่นกระดาษลูกฟูกให้นำ Guide blocks ออก กดตัวอย่างจนขึ้นทดสอบเสียรูป
4. บันทึกค่าแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้แผ่นกระดาษลูกฟูกรับน้ำหนักต่อไปไม่ได้
5. ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ แล้วรายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดในแนวตั้งของแผ่นกระดาษลูกฟูกในหน่วยกิโลนิวตันต่อเมตร



ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความต้านแรงกดวงแหวนของแผ่นกระดาษ

ชนิดกระดาษ	ความต้านทานแรงกดวงแหวน (kgf)
CA105	8.70
CA125	14.30
KA125	16.30
KA150	24.40
KA185	38.77
KA230	41.00
KI125	12.70
KI150	17.30
KI185	23.50
KS170	25.50

ที่มา: กลุ่มบริษัทสยามบรรจุภัณฑ์ (2553)

ตารางผนวกที่ ข2 คะแนนการประเมินแบบจำลองทางเล็อก

ปัจจัยตัดสินใจ	คะแนนการประเมินแบบจำลอง	
	การถดถอยโพลีโนเมียล	BPN
ความถูกต้อง	0.447	0.553
ระยะเวลา	0.750	0.250
ค่าใช้จ่าย	0.612	0.388
ปรับปัจจุบัน	0.167	0.833

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาและทดสอบแบบจำลอง

แบบจำลอง	ค่าใช้จ่าย (USD)	
	ซอลิซิติตีโปรแกรม	ฝึกอบรม
การถดถอยโพลีโนเมียล	1,110	1,280
BPN	2,495	1,295

ที่มา: NeuralWare (2009); International Business Machines Corporation (2012)



ตารางผนวกที่ ค1 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
1	Delta	1	1	20,000	28.51	36.78	10.99
2			2	25,000	41.11	45.98	16.61
3			3	24,000	61.06	69.7	24.66
4		2	1	10,000	28.26	38.51	10.57
5			2	2,000	48.76	71.93	15.70
6			3	17,000	49.63	65.61	17.33
7		3	1	6,000	28.17	37.61	10.65
8			2	2,000	63.34	72.45	26.04
9			3	21,000	56.14	66.77	20.22
10		4	1	17,000	76.23	99.59	29.40
11			2	2,000	47.12	62.21	17.05
12			3	4,000	61.47	74.44	24.90
13		5	1	20,000	46.83	63.34	16.44
14			2	13,000	72.86	89.41	25.86
15			3	1,000	77.06	94.16	27.42
16		6	1	23,000	49.77	70.17	16.72
17			2	9,000	47.52	64.24	16.79
18			3	30,000	48.98	61.71	18.03
19		7	1	5,000	45.38	55.14	17.76
20			2	1,000	54.31	70.04	22.58
21			3	2,000	48.81	59.88	21.17
22		8	1	2,000	68.65	86.68	26.96
23			2	8,000	106.00	125.75	41.91
24			3	2,000	44.81	56.51	17.67

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
25	Delta	9	1	11,000	35.21	47.83	12.51
26			2	8,000	47.32	62.11	18.36
27			3	12,000	63.08	80.68	26.83
28		10	1	21,000	57.37	71.35	24.25
29			2	38,000	51.23	67.16	18.72
30			3	4,000	118.66	125.8	50.12
31		11	1	5,000	45.64	56.50	17.56
32			2	5,000	49.48	60.76	17.51
33			3	4,000	56.45	82.18	20.05
34		12	1	22,000	41.53	58.64	14.24
35			2	1,000	41.25	55.19	18.13
36			3	2,000	32.75	40.08	13.06
37		13	1	15,000	62.78	76.48	24.75
38			2	3,000	46.87	61.52	17.43
39			3	13,000	43.90	58.02	15.61
40		14	1	16,000	39.86	54.95	13.90
41			2	32,000	44.57	53.94	19.06
42			3	2,000	56.75	68.31	22.85
43		15	1	2,000	91.97	116.69	33.57
44			2	11,000	63.50	71.53	25.83
45			3	8,000	42.41	57.18	15.29
46		16	1	20,000	43.81	51.66	19.18
47			2	11,000	90.46	97.40	36.73
48			3	5,000	57.29	74.05	22.40

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
49	EDBD	1	1	32,000	25.72	35.79	9.03
50			2	129,000	17.73	22.60	7.18
51			3	159,000	17.80	23.79	8.29
52		2	1	209,000	16.37	21.74	7.32
53			2	207,000	18.15	24.08	8.42
54			3	14,000	27.95	36.93	10.03
55		3	1	210,000	15.67	20.81	6.28
56			2	10,000	24.26	34.44	9.07
57			3	94,000	16.74	21.56	6.34
58		4	1	210,000	15.11	19.45	5.85
59			2	12,000	26.09	35.88	9.07
60			3	10,000	28.24	37.34	10.18
61		5	1	10,000	27.35	35.97	9.80
62			2	181,000	15.36	19.76	5.85
63			3	84,000	16.48	21.80	6.87
64		6	1	286,000	15.12	18.75	5.55
65			2	34,000	26.54	35.55	9.56
66			3	212,000	15.95	22.22	6.96
67		7	1	211,000	15.75	19.66	5.99
68			2	102,000	16.66	22.50	6.96
69			3	206,000	14.35	18.20	5.19
70		8	1	89,000	15.84	21.71	6.31
71			2	163,000	14.46	18.67	5.46
72			3	202,000	13.79	17.69	5.30

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
73	EDBD	9	1	10,000	27.17	35.84	9.97
74			2	147,000	14.91	19.44	5.87
75			3	161,000	13.17	18.30	5.07
76		10	1	435,000	13.92	18.41	5.10
77			2	121,000	14.78	18.79	5.51
78			3	218,000	14.22	18.59	5.32
79		11	1	147,000	15.08	18.68	5.82
80			2	10,000	26.90	36.12	9.75
81			3	258,000	13.86	18.05	5.04
82		12	1	241,000	13.78	17.68	5.35
83			2	226,000	13.91	17.71	5.08
84			3	86,000	15.37	20.53	6.19
85		13	1	162,000	13.48	18.05	4.82
86			2	165,000	14.49	18.25	5.41
87			3	10,000	25.92	35.06	9.22
88		14	1	233,000	12.38	16.56	4.34
89			2	176,000	15.27	18.92	5.59
90			3	178,000	15.25	18.83	5.89
91		15	1	133,000	13.45	18.12	4.98
92			2	129,000	13.43	18.29	5.02
93			3	298,000	14.16	17.95	5.05
94		16	1	152,000	13.28	17.57	4.77
95			2	11,000	26.88	35.90	9.81
96			3	12,000	26.88	35.63	9.65

ตารางผนวกที่ ค2 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
1	Delta	4	1	9,000	71.23	85.97	32.08
2			2	8,000	62.38	80.29	30.09
3			3	6,000	63.21	79.62	28.97
4		5	1	8,000	56.19	73.42	27.80
5			2	10,000	55.14	73.13	27.61
6			3	5,000	61.61	79.31	31.08
7		6	1	31,000	55.00	71.62	25.61
8			2	17,000	55.34	71.26	26.68
9			3	31,000	110.00	125.68	55.14
10		7	1	16,000	60.77	77.36	2.82
11			2	13,000	52.41	67.98	21.45
12			3	9,000	56.20	74.46	28.02
13		8	1	7,000	59.83	76.22	26.70
14			2	25,000	54.59	71.20	24.73
15			3	7,000	58.03	74.98	29.10
16		9	1	9,000	41.35	60.05	15.84
17			2	9,000	33.95	54.45	12.45
18			3	19,000	58.80	73.86	26.29
19		10	1	26,000	38.94	55.38	14.36
20			2	8,000	56.30	73.15	28.33
21			3	7,000	49.31	65.67	23.25
22		11	1	8,000	54.55	70.66	24.81
23			2	9,000	56.14	73.89	26.71
24			3	23,000	40.20	59.62	14.73

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
25	Delta	12	1	7,000	52.86	71.58	26.16
26			2	25,000	47.11	64.93	19.24
27			3	9,000	39.87	56.40	14.91
28		13	1	10,000	36.35	54.57	13.11
29			2	26,000	58.26	73.27	27.60
30			3	24,000	42.77	62.03	16.36
31		14	1	10,000	43.39	60.75	15.39
32			2	10,000	47.37	66.56	22.49
33			3	12,000	40.16	59.10	14.25
34		15	1	25,000	42.86	60.80	16.31
35			2	6,000	42.12	61.70	16.08
36			3	11,000	43.60	60.48	16.65
37		16	1	11,000	38.45	57.20	13.77
38			2	12,000	35.88	45.81	14.23
39			3	12,000	44.06	61.29	16.77
40	EDBD	4	1	210,000	73.77	88.04	31.22
41			2	481,000	64.14	81.07	30.50
42			3	454,000	64.71	79.48	28.75
43		5	1	390,000	73.56	93.98	27.78
44			2	204,000	57.33	75.87	30.15
45			3	388,000	64.75	80.97	31.65
46		6	1	305,000	55.93	72.13	26.01
47			2	469,000	56.08	72.23	26.09
48			3	324,000	55.38	70.82	24.50

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
49	EDBD	7	1	241,000	52.86	71.58	26.16
50			2	440,000	47.11	64.93	19.24
51			3	315,000	39.87	56.40	14.91
52		8	1	383,000	36.35	54.57	13.11
53			2	367,000	58.26	73.27	27.60
54			3	377,000	42.77	62.03	16.36
55		9	1	342,000	43.39	60.75	15.39
56			2	189,000	47.37	66.56	22.49
57			3	508,000	40.16	59.10	14.25
58		10	1	399,000	42.86	60.80	16.31
59			2	448,000	42.12	61.70	16.08
60			3	340,000	43.60	60.48	16.65
61		11	1	353,000	38.45	57.20	13.77
62			2	311,000	35.88	45.81	14.23
63			3	362,000	44.06	61.29	16.77
64		12	1	405,000	73.77	88.04	31.22
65			2	373,000	64.14	81.07	30.50
66			3	304,000	64.71	79.48	28.75
67		13	1	318,000	73.56	93.98	27.78
68			2	318,000	57.33	75.87	30.15
69			3	180,000	64.75	80.97	31.65
70		14	1	412,000	55.93	72.13	26.01
71			2	832,000	56.08	72.23	26.09
72			3	225,000	55.38	70.82	24.50

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
73	EDBD	15	1	261,000	52.86	71.58	26.16
74			2	862,000	47.11	64.93	19.24
75			3	528,000	39.87	56.40	14.91
76		16	1	262,000	36.35	54.57	13.11
77			2	647,000	58.26	73.27	27.60
78			3	353,000	42.77	62.03	16.36

ตารางผนวกที่ ค3 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 3 ชั้น

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
1	Delta	1	1	13,000	18.73	25.54	11.13
2			2	19,000	19.24	25.30	11.16
3			3	4,000	18.97	25.34	11.60
4		2	1	36,000	15.84	21.31	8.95
5			2	7,000	19.20	23.93	11.61
6			3	7,000	19.44	25.64	10.38
7		3	1	52,000	15.33	22.36	8.80
8			2	5,000	19.27	25.24	11.40
9			3	2,000	17.58	21.60	9.33
10		4	1	8,000	17.27	21.05	9.78
11			2	6,000	18.99	24.82	9.77
12			3	19,000	17.32	25.34	10.02
13		5	1	20,000	15.84	22.99	8.89
14			2	24,000	19.95	26.25	9.72
15			3	20,000	16.18	23.79	9.53
16		6	1	19,000	17.63	24.50	10.87
17			2	21,000	15.20	21.56	8.93
18			3	30,000	14.51	22.99	9.91
19		7	1	13,000	15.63	22.97	8.12
20			2	5,000	16.35	22.50	9.17
21			3	19,000	19.10	25.29	11.34
22		8	1	4,000	16.71	24.39	8.16
23			2	22,000	14.21	22.18	7.88
24			3	4,000	16.59	25.32	10.32

## ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
25	Delta	9	1	8,000	18.21	25.77	9.90
26			2	19,000	18.97	25.93	10.31
27			3	12,000	15.57	21.18	8.97
28		10	1	10,000	14.16	21.85	7.81
29			2	8,000	16.24	23.83	9.25
30			3	8,000	14.91	22.76	7.28
31	EKBD	1	1	28,000	17.24	25.57	10.92
32			2	51,000	20.34	26.39	11.70
33			3	89,000	20.42	26.44	11.78
34		2	1	38,000	20.60	26.30	11.82
35			2	50,000	19.04	25.73	11.02
36			3	36,000	20.11	26.28	11.56
37		3	1	26,000	20.03	27.05	11.69
38			2	19,000	19.96	25.90	11.64
39			3	15,000	23.67	29.41	13.59
40		4	1	64,000	18.69	26.12	11.36
41			2	48,000	19.55	25.57	12.33
42			3	65,000	17.78	26.50	11.16
43		5	1	84,000	18.90	25.63	11.25
44			2	32,000	19.81	26.43	11.44
45			3	39,000	19.31	26.09	11.43
46		6	1	50,000	19.39	26.11	11.21
47			2	24,000	21.12	27.81	12.02
48			3	30,000	18.86	26.50	11.18

## ตารางผนวกที่ ค3 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
49	EDBD	7	1	44,000	20.27	26.47	11.71
50			2	36,000	18.07	25.59	10.76
51			3	38,000	19.68	26.65	11.30
52		8	1	41,000	19.42	26.35	11.17
53			2	29,000	17.16	25.23	10.41
54			3	52,000	16.59	25.32	10.32
55		9	1	27,000	20.39	27.57	11.71
56			2	32,000	18.94	26.35	11.18
57			3	41,000	19.25	26.40	11.44
58		10	1	41,000	19.31	26.68	11.52
59			2	33,000	19.90	26.31	11.51
60			3	26,000	20.34	27.59	11.62

ตารางผนวกที่ ค4 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 3 ชั้น

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
1	Delta	4	1	17,000	49.55	62.46	36.80
2			2	7,000	51.96	67.63	41.25
3			3	8,000	49.84	62.80	39.36
4		5	1	8,000	54.51	60.95	35.52
5			2	16,000	54.25	62.90	35.91
6			3	18,000	48.74	63.44	36.19
7		6	1	32,000	52.60	63.71	36.89
8			2	13,000	53.16	66.44	39.15
9			3	7,000	54.12	62.53	37.01
10		7	1	7,000	47.13	53.76	28.25
11			2	0	101.48	117.55	83.26
12			3	6,000	53.07	65.95	33.09
13		8	1	13,000	52.71	63.89	32.57
14			2	21,000	62.75	72.14	43.30
15			3	12,000	50.88	63.98	36.80
16		9	1	17,000	29.69	41.63	15.73
17			2	14,000	30.64	40.69	16.85
18			3	14,000	29.72	38.94	15.88
19		10	1	26,000	53.81	63.87	35.76
20			2	23,000	47.00	61.40	31.53
21			3	20,000	51.44	61.18	35.77
22	EDBD	4	1	18,000	48.91	65.12	40.41
23			2	16,000	52.29	69.50	40.38
24			3	42,000	50.37	64.44	39.36

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
25	EDBD	5	1	10,000	54.97	61.44	38.21
26			2	26,000	54.29	63.89	39.00
27			3	24,000	49.75	65.75	41.27
28		6	1	42,000	55.55	65.35	41.55
29			2	23,000	50.21	66.87	41.53
30			3	17,000	55.23	63.56	40.34
31		7	1	37,000	52.03	59.53	36.10
32			2	8,000	55.55	63.32	39.92
33			3	27,000	55.10	64.20	40.60
34		8	1	23,000	55.74	64.41	37.05
35			2	16,000	52.74	60.44	35.42
36			3	14,000	55.24	65.50	43.10
37		9	1	21,000	33.54	44.38	16.85
38			2	39,000	32.86	41.5	18.64
39			3	17,000	29.55	39.17	15.44
40		10	1	16,000	53.69	63.72	41.35
41			2	36,000	51.75	64.68	39.53
42			3	11,000	53.84	62.40	39.80

ตารางผนวกที่ ค5 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง BPN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 5 ชั้น

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
1	Delta	1	1	4,000	12.42	14.61	2.20
2			2	88,000	8.81	11.53	1.61
3			3	7,000	8.49	11.72	1.45
4		2	1	23,000	8.36	11.67	1.35
5			2	4,000	10.41	12.71	1.75
6			3	6,000	12.33	14.17	2.12
7		3	1	4,000	9.19	10.07	1.67
8			2	9,000	21.44	23.65	3.94
9			3	18,000	9.86	11.17	1.68
10		4	1	5,000	7.25	9.36	1.46
11			2	4,000	9.42	12.61	1.54
12			3	6,000	10.72	12.15	1.91
13		5	1	12,000	19.45	24.63	3.79
14			2	22,000	15.62	19.32	2.99
15			3	6,000	11.66	15.12	2.28
16		6	1	23,000	10.10	11.05	1.91
17			2	12,000	9.41	12.37	1.63
18			3	14,000	11.50	14.09	2.24
19		7	1	67,000	8.12	9.47	1.43
20			2	11,000	10.14	12.53	1.73
21			3	6,000	11.72	14.32	2.14
22		8	1	24,000	8.45	9.27	1.62
23			2	23,000	7.14	8.86	1.37
24			3	5,000	10.21	11.83	2.03

## ตารางผนวกที่ ค5 (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
25	EDBD	1	1	52,000	12.09	13.67	2.35
26			2	25,000	13.50	16.68	2.58
27			3	29,000	14.83	18.97	2.74
28		2	1	100,000	15.28	17.27	2.81
29			2	11,000	13.26	16.63	2.43
30			3	9,000	11.33	13.74	2.15
31		3	1	13,000	13.51	14.51	2.59
32			2	11,000	13.18	14.86	2.47
33			3	21,000	9.38	11.26	1.82
34		4	1	12,000	12.81	14.42	2.44
35			2	19,000	8.90	11.07	1.78
36			3	21,000	10.52	12.91	2.07
37		5	1	12,000	13.19	14.86	2.52
38			2	25,000	9.79	11.45	1.97
39			3	13,000	10.91	13.26	1.96
40		6	1	11,000	12.25	14.11	2.33
41			2	34,000	11.23	15.46	2.12
42			3	12,000	10.33	13.36	2.03
43		7	1	11,000	13.16	14.92	2.48
44			2	12,000	11.30	13.21	2.10
45			3	8,000	17.08	18.31	3.21
46		8	1	12,000	12.00	14.73	2.18
47			2	31,000	8.28	11.21	1.50
48			3	11,000	10.14	13.34	1.99

ตารางผนวกที่ ๓6 ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง RBFN ในการทำนายค่า ECT สำหรับ  
แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 5 ชั้น

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับ น้ำหนักเริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
1	Delta	4	1	10,000	46.41	54.36	8.20
2			2	0	106.11	123.10	21.53
3			3	0	149.61	168.75	25.54
4		5	1	13,000	49.37	61.46	9.66
5			2	20,000	49.37	61.46	9.66
6			3	14,000	51.74	62.85	10.19
7		6	1	4,000	22.82	30.06	3.97
8			2	0	111.89	127.03	21.64
9			3	11,000	32.93	37.26	6.31
10		7	1	25,000	34.12	46.34	5.94
11			2	19,000	77.52	92.15	14.30
12			3	3,000	16.03	31.13	2.48
13		8	1	12,000	28.83	41.23	6.15
14			2	19,000	42.56	57.81	8.46
15			3	7,000	50.111	68.58	10.92
16	EDBD	4	1	9,000	54.43	61.79	10.99
17			2	8,000	40.61	57.45	8.05
18			3	6,000	51.65	70.25	10.11
19		5	1	8,000	50.55	65.97	9.98
20			2	10,000	35.04	38.46	6.64
21			3	5,000	51.27	65.60	9.94
22		6	1	31,000	22.80	32.41	4.04
23			2	17,000	37.56	53.04	7.59
24			3	31,000	29.58	38.94	5.58

ตารางผนวกที่ ๓๖ (ต่อ)

ลำดับ ที่	กฎการ เรียนรู้	จำนวน นิเวรอนในชั้น ซ่อน	การปรับน้ำหนัก เริ่มต้น (ครั้งที่)	รอบการ เรียนรู้ (รอบ)	MAE (N)	RMSE (N)	MAPE (%)
25	EDBD	7	1	23,000	35.94	54.18	6.14
26			2	17,000	32.99	38.55	5.69
27			3	46,000	22.78	35.37	4.09
28		8	1	21,000	32.14	49.13	6.95
29			2	27,000	40.78	61.20	8.47
30			3	5,000	49.21	65.60	10.26

ตารางผนวกที่ ๗ อิทธิพลของปัจจัยนอกแบบจากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	$B_1$	0.049
	$G_1$	-0.206
	$G_2$	0.131
	$B_3$	-0.014
	$G_3$	0.491
	$B_5$	0.130
	$G_5$	0.360
	L	0.473
	H	-0.010
	$F_{1,m}$	0.111
	$F_{1,h}$	0.057
	$F_{2,h}$	0.556
	Stepwise/Forward	$B_4$
L		0.478
$G_3$		0.270
Backward	$B_1$	0.044
	$G_1$	-0.245
	$G_2$	0.054
	$G_3$	0.520
	$G_5$	0.475
	L	0.475
	$F_{1,m}$	0.122
	$F_{1,h}$	0.058
	$F_{2,h}$	0.534

ตารางผนวกที่ ค8 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลต่อการ  
ทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษถูกฟูประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	$B_1B_1$	-0.213
	$B_1G_1$	0.340
	$B_1G_2$	-0.058
	$B_1B_3$	-0.139
	$B_1G_4$	0.346
	$B_1L$	-0.014
	$B_1H$	-0.009
	$B_1F_1h$	0.050
	$G_1G_1$	0.828
	$G_1B_2$	-2.180
	$G_1L$	-0.107
	$G_1H$	0.743
	$G_1F_1h$	1.092
	$B_2G_2$	0.028
	$B_2G_3$	1.243
	$B_2H$	0.052
	$B_2F_1m$	0.132
	$G_2L$	-0.142
	$B_3B_3$	-0.161
	$B_3L$	0.051
	$B_3H$	-0.048
	$B_3F_1m$	0.193
	$B_3F_1h$	0.130
	$G_3L$	0.436
	$G_3H$	-0.522
	$G_3F_1h$	-1.332
	$G_4B_5$	-0.314

## ตารางผนวกที่ ค8 (ต่อ)

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน	
Enter	G <sub>4</sub> L	0.415	
	G <sub>4</sub> H	0.350	
	B <sub>3</sub> L	-0.033	
	B <sub>3</sub> H	0.306	
	G <sub>5</sub> G <sub>5</sub>	0.343	
	G <sub>5</sub> L	0.674	
	G <sub>5</sub> H	-0.704	
	LL	0.038	
	LH	-0.056	
	LF <sub>1</sub> m	0.276	
	LF <sub>1</sub> h	0.103	
	HH	-0.164	
	HF <sub>1</sub> m	-0.218	
	HF <sub>1</sub> h	0.171	
	F <sub>1</sub> mF <sub>1</sub> h	-0.065	
	F <sub>2</sub> hF <sub>2</sub> h	-0.253	
	Stepwise	G <sub>3</sub> L	0.902
		G <sub>3</sub> L	1.169
B <sub>1</sub> G <sub>4</sub>		1.157	
B <sub>4</sub> F <sub>1</sub> h		-0.526	
HF <sub>1</sub> m		-0.150	
LF <sub>1</sub> m		0.237	
HF <sub>1</sub> h		0.121	
B <sub>1</sub> G <sub>5</sub>		-0.827	
B <sub>3</sub> H		0.083	
B <sub>3</sub> F <sub>1</sub> m		0.061	
B <sub>2</sub> G <sub>3</sub>		-0.654	
G <sub>1</sub> L		-0.583	

## ตารางผนวกที่ ค8 (ต่อ)

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Stepwise	$G_1G_3$	0.618
Backward	$B_1B_1$	-0.196
	$B_1G_1$	0.308
	$B_1B_3$	-0.211
	$B_1G_4$	0.312
	$G_1G_1$	0.813
	$G_1B_2$	-2.273
	$G_1H$	0.732
	$G_1F_1h$	1.128
	$B_2G_3$	1.335
	$B_2F_1m$	0.194
	$B_3H$	-0.055
	$B_3F_1m$	0.142
	$B_3F_1h$	0.136
	$G_3L$	0.392
	$G_3H$	-0.494
	$G_3F_1h$	-1.378
	$G_4B_5$	-0.354
	$G_4L$	0.442
	$G_4H$	0.343
	$B_5H$	0.306
	$G_5G_5$	0.417
	$G_5L$	0.572
	$G_5H$	-0.687
LH	-0.051	
$LF_1m$	0.185	
HH	-0.161	
$HF_1m$	-0.197	

## ตารางผนวกที่ ค8 (ต่อ)

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Backward	HF <sub>1</sub> h	0.194
	F <sub>2</sub> hF <sub>2</sub> h	-0.196
Forward	B <sub>4</sub> L	0.567
	G <sub>3</sub> L	0.245
	B <sub>1</sub> L	-0.071
	G <sub>5</sub> L	0.412
	B <sub>1</sub> G <sub>4</sub>	0.490
	B <sub>4</sub> F <sub>1</sub> h	-0.288
	G <sub>2</sub> L	0.180
	B <sub>1</sub> G <sub>3</sub>	0.072
	HF <sub>1</sub> m	-0.243
	LF <sub>1</sub> m	0.094
	G <sub>2</sub> H	0.158
	G <sub>3</sub> F <sub>1</sub> m	0.128
	G <sub>1</sub> F <sub>2</sub> h	-0.611
G <sub>4</sub> G <sub>5</sub>	0.406	

ตารางผนวกที่ ๙ อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง BPN ต่อการทำนายค่า ECT  
 แผ่นกระดาษถูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ปัจจัย	อิทธิพล
B <sub>1</sub>	9.660
G <sub>1</sub>	-15.554
B <sub>2</sub>	-28.723
G <sub>2</sub>	10.113
B <sub>3</sub>	6.185
G <sub>3</sub>	35.678
B <sub>4</sub>	13.522
G <sub>4</sub>	61.726
B <sub>5</sub>	13.929
G <sub>5</sub>	91.815
L	70.458
H	-3.229
F <sub>1m</sub>	-8.328
F <sub>1h</sub>	-7.118
F <sub>2m</sub>	4.039
F <sub>2h</sub>	-17.856

ตารางผนวกที่ ค10 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง RBFN ต่อการทำนายค่า ECT  
 แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้นและ 5 ชั้น

ปัจจัย	อิทธิพล
B <sub>1</sub>	2.733
G <sub>1</sub>	4.527
B <sub>2</sub>	0.000
G <sub>2</sub>	-0.856
B <sub>3</sub>	0.198
G <sub>3</sub>	3.706
B <sub>4</sub>	4.460
G <sub>4</sub>	8.647
B <sub>5</sub>	3.811
G <sub>5</sub>	4.628
L	16.767
H	-0.850
F <sub>1m</sub>	-3.988
F <sub>1h</sub>	1.542
F <sub>2m</sub>	4.460
F <sub>2h</sub>	4.460

ตารางผนวกที่ ค11 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	$B_1$	-0.003
	$G_1$	-0.061
	$B_3$	0.038
	$G_3$	0.608
	L	0.742
	H	-0.089
	$F_{1m}$	0.115
Stepwise/Forward	$F_{1h}$	0.095
	L	0.740
	$G_3$	0.551
	H	-0.088
Backward	$B_3$	0.033
	$G_3$	0.551
	L	0.740
	H	-0.089
	$F_{1m}$	0.102
	$F_{1h}$	0.096

ตารางผนวกที่ ค12 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลต่อการ  
ทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	$B_1B_1$	-0.329
	$B_1B_3$	-0.366
	$B_1G_3$	0.800
	$B_1L$	-0.161
	$B_1H$	0.042
	$B_1F_1m$	-0.104
	$B_1F_1h$	-0.082
	$G_1G_2$	-2.210
	$G_1L$	-0.213
	$G_1H$	1.218
	$G_1F_1h$	2.139
	$B_2H$	-0.008
	$G_2G_3$	1.205
	$G_2L$	-0.176
	$B_3B_3$	-0.129
	$B_3L$	0.280
	$B_3H$	-0.100
	$B_3F_1m$	0.242
	$B_3F_1h$	0.081
	$G_3G_3$	1.160
	$G_3L$	0.520
	$G_3H$	-0.952
	$G_3F_1h$	-2.701
	LL	0.064
	LH	-0.160
	$LF_1m$	0.688
	$LF_1h$	0.424

## ตารางผนวกที่ ค12 (ต่อ)

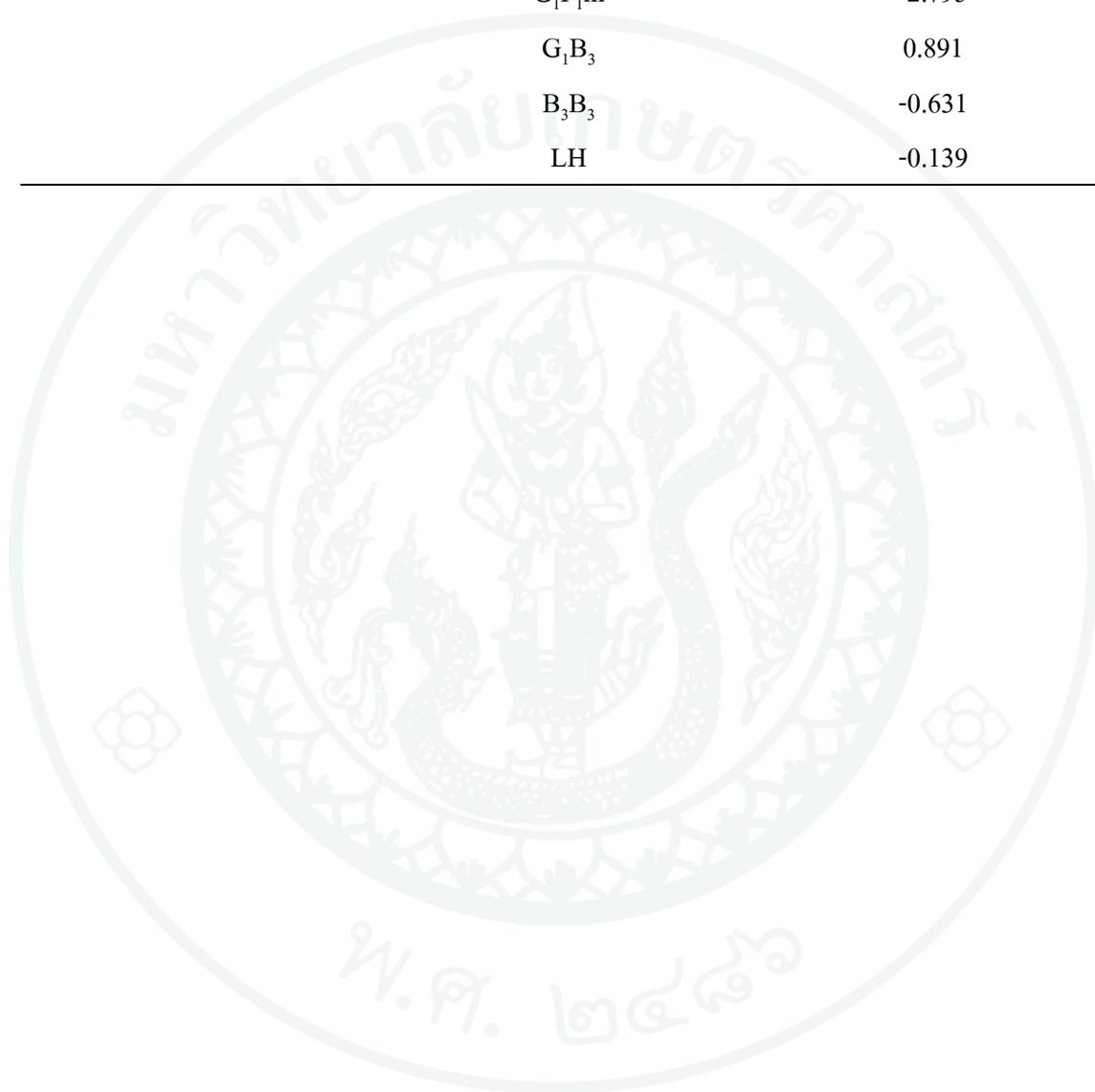
วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	HH	-0.211
	HF <sub>1m</sub>	-0.483
	HF <sub>1h</sub>	0.482
	F <sub>1m</sub> F <sub>1m</sub>	0.242
	F <sub>1h</sub> F <sub>1h</sub>	-0.167
Stepwise	G <sub>3</sub> L	0.612
	G <sub>2</sub> L	0.492
	G <sub>3</sub> G <sub>3</sub>	0.735
	LF <sub>1m</sub>	0.348
	HF <sub>1m</sub>	-0.329
	HF <sub>1h</sub>	0.413
	G3F <sub>1m</sub>	1.864
	B <sub>2</sub> G <sub>3</sub>	-1.604
	G <sub>2</sub> F <sub>1m</sub>	-1.349
	B <sub>3</sub> L	0.158
	G <sub>1</sub> L	-0.277
	LL	-0.245
HH	-0.152	
Backward	B <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	-0.384
	B <sub>1</sub> B <sub>3</sub>	-0.343
	B <sub>1</sub> G <sub>3</sub>	0.721
	B <sub>1</sub> L	-0.181
	G <sub>1</sub> G <sub>2</sub>	-2.304
	G <sub>1</sub> H	1.241
	G <sub>1</sub> F <sub>1h</sub>	2.025
	G <sub>2</sub> G <sub>3</sub>	1.333
	B <sub>3</sub> L	0.300
	B <sub>3</sub> H	-0.073

## ตารางผนวกที่ ค12 (ต่อ)

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Backward	$B_3F_1m$	0.136
	$G_3G_3$	1.169
	$G_3L$	0.303
	$G_3H$	-0.993
	$G_3F_1h$	-2.546
	LH	-0.161
	$LF_1m$	0.592
	$LF_1h$	0.344
	HH	-0.218
	$HF_1m$	-0.471
	$HF_1h$	0.509
	$F_1mF_1m$	0.267
	$F_1hF_1h$	-0.164
	Forward	$G_3L$
$G_1H$		1.470
$G_2L$		0.567
$G_3G_3$		1.056
$B_3H$		-0.086
$LF_1m$		0.352
$HF_1m$		-0.510
$HF_1h$		0.533
$G_3F_1m$		3.944
$G_3$		-2.321
$G_2F_1m$		-0.479
$B_3L$		0.153
LL		-0.232
$G_1L$		-0.309
HH		-0.236

## ตารางผนวกที่ ค12 (ต่อ)

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Forward	$G_3H$	-1.208
	$G_1F_1m$	-2.795
	$G_1B_3$	0.891
	$B_3B_3$	-0.631
	LH	-0.139



ตารางผนวกที่ ค13 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง BPN ต่อการทำนายค่า ECT  
 แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

ปัจจัย	อิทธิพล
$B_1$	7.287
$G_1$	23.509
$B_2$	-15.202
$G_2$	-61.809
$B_3$	7.465
$G_3$	47.566
L	85.534
H	-6.830
$F_{1m}$	32.513
$F_{1h}$	15.043

ตารางผนวกที่ ค14 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง RBFN ต่อการทำนาย ECT  
 แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 3 ชั้น

ปัจจัย	อิทธิพล
$B_1$	-1.950
$G_1$	5.934
$B_2$	0
$G_2$	0
$B_3$	2.694
$G_3$	8.390
L	24.341
H	-4.977
$F_{1m}$	-6.073
$F_{1h}$	-0.509

ตารางผนวกที่ 15 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยพหุคูณต่อการทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	$B_1$	0.503
	$G_4$	0.572
	$B_5$	0.337
	$G_5$	0.241
	L	0.932
	H	0.002
	Stepwise	L
$B_1$		0.474
$G_1$		-0.477
$G_2$		0.310
$G_5$		0.776
L		0.933
Backward		$B_1$
	$G_4$	0.571
	$B_5$	0.336
	$G_5$	0.242
	L	0.933

ตารางผนวกที่ 16 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลองการถดถอยโพลีโนเมียลต่อการ  
ทำนายค่า ECT แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Enter	$B_1G_1$	0.388
	$B_1L$	0.129
	$B_1H$	-0.039
	$G_1L$	-0.319
	$G_1H$	1.450
	$G_4B_5$	0.406
	$G_4L$	1.169
	$G_4F_2h$	0.732
	$B_5L$	0.195
	$B_5H$	0.470
	$G_5L$	0.940
	$G_5H$	-1.311
	$G_5F_2h$	-0.733
	LL	-0.506
	LH	-0.129
	HH	-0.095
Stepwise	$HF_2h$	-0.173
	$LF_2h$	-2.186
	$B1G1$	1.231
	$G_2L$	2.994
	$B_5L$	0.983
	$B_1G_5$	-0.961
Backward	$B_1G_1$	0.335
	$B_1L$	0.155
	$G_1H$	1.015
	$G_4B_5$	0.428
	$G_4L$	1.103

## ตารางผนวกที่ ค16 (ต่อ)

วิธีการ	ปัจจัย	สัมประสิทธิ์มาตรฐาน
Backward	$G_4F_2h$	0.719
	$B_3L$	0.211
	$B_3H$	0.376
	$G_3L$	0.685
	$G_3H$	-0.907
	$G_5F_2h$	-0.731
	LL	-0.514
	LH	-0.150
	HH	-0.186

ตารางผนวกที่ ค17 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง BPN ต่อการทำนายค่า ECT  
 แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

ปัจจัย	อิทธิพล
B <sub>1</sub>	72.175
G <sub>1</sub>	16.934
B <sub>2</sub>	-26.698
G <sub>2</sub>	29.766
B <sub>3</sub>	-56.975
G <sub>3</sub>	-30.669
B <sub>4</sub>	-32.176
G <sub>4</sub>	62.995
B <sub>5</sub>	50.119
G <sub>5</sub>	57.977
L	95.232
H	0.115
F <sub>1m</sub>	-6.072
F <sub>1h</sub>	-73.619
F <sub>2m</sub>	-71.264
F <sub>2h</sub>	12.689

ตารางผนวกที่ ค18 อิทธิพลของปัจจัยออกแบบจากแบบจำลอง RBFN ต่อการทำนายค่า ECT  
 แผ่นกระดาษลูกฟูกประเภท 5 ชั้น

ปัจจัย	อิทธิพล
B <sub>1</sub>	0.302
G <sub>1</sub>	-0.837
B <sub>2</sub>	0
G <sub>2</sub>	2.242
B <sub>3</sub>	0
G <sub>3</sub>	0
B <sub>4</sub>	0
G <sub>4</sub>	2.242
B <sub>5</sub>	-5.524
G <sub>5</sub>	-2.021
L	42.363
H	0.872
F <sub>1m</sub>	0
F <sub>1h</sub>	0
F <sub>2m</sub>	0
F <sub>2h</sub>	0

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายบุรินทร์ สันติชีวะเสถียร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 19 ตุลาคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์ทั่วไป) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2551)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-