



วิทยานิพนธ์

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้งของ
ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPLICATION FOR
DRYING PROCESS PREDICTION OF SEMI-FINISHED HOLY
BASIL CASSAVA CRACKER

นางสาวกัทลี จันทร์เจนจบ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)

ปริญญา

พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร

พัฒนาผลิตภัณฑ์

สาขา

ภาควิชา

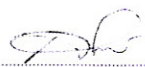
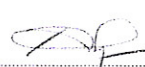
เรื่อง การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้งของข้าวเกรียบกุ้ง
สำเร็จรูปรสกะเพรา

Artificial Neural Network Application for Drying Process Prediction of Semi-Finished
Holy Basil Cassava Cracker

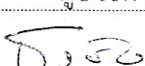
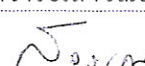
นามผู้วิจัย นางสาวกัทลี จันทรเงินจบ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

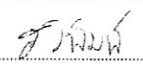
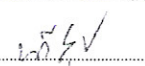
ประธานกรรมการ

( )
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล, Ph.D

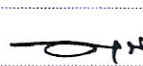
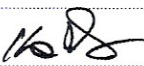
กรรมการ

( )
รองศาสตราจารย์ธงชัย สุวรรณลิขิต, Ph.D

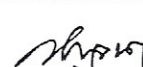
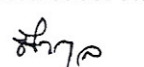
กรรมการ

( )
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รวีพิมพ์ นวิสุข, Ph.D

หัวหน้าภาควิชา

( )
รองศาสตราจารย์อนุวัตร แจ่มชัด, Ph.D

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( )
รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 4 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2561

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้งของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป
รสกะเพรา

Artificial Neural Network Application for Drying Process Prediction of Semi-Finished Holy Basil
Cassava Cracker

โดย

นางสาวกัทลี จันทร์เจนจบ

เสนอ

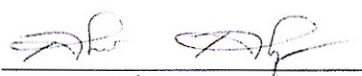
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2551

กัทลี จันทรเจนนอบ 2551: การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้ง
ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์
อุตสาหกรรมเกษตร) สาขาพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล, Ph.D. 129 หน้า

ข้าวเกรียบเป็นขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง พอง กรอบ มีรูพรุนเรียบ การควบคุมการผลิต
ข้าวเกรียบในกระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากการควบคุมสภาวะในการผลิตข้าวเกรียบที่เหมาะสม
จะมีผลต่อปัจจัยคุณภาพในด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ทั้งก่อนและหลังการทอด งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการ
พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรส
กะเพราจากกระบวนการอบแห้ง โดยเปรียบเทียบจำนวนหน่วยซ่อน 5 ระดับ คือ 1,5,10,15 และ20 นิวรอน
และจำนวนชั้นซ่อน 2 ระดับ คือ 1 และ2 ชั้น เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการทำนายค่า จากนั้นเปรียบเทียบ
แบบจำลอง ANN แบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ 3 แบบจำลอง ซึ่งได้แก่ แบบจำลองที่ทำนายปริมาณ
ความชื้น ค่า a_w และค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล และแบบจำลอง ANN แบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด
เกณฑ์ในการเลือกแบบจำลอง จะพิจารณาจาก Mean Squared Error (MSE) และค่าสหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าที่
ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง ผลของการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมของ
ANN แบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ ของคุณลักษณะปริมาณความชื้น ค่า a_w และค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทาง
กล พบว่าแต่ละแบบจำลองมีค่า MSEs เท่ากับ 8.42×10^{-4} , 5.43×10^{-3} และ 2.60×10^{-2} ตามลำดับ แบบจำลองที่
เหมาะสมของ ANN แบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด มีค่า MSE เท่ากับ 1.20×10^{-2} เมื่อเปรียบเทียบ ANN
ทั้งหมดแล้วพบว่า ANN แบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมดสามารถทำนายคุณลักษณะต่างๆของข้าวเกรียบ
สำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้งได้ดีกว่า และประหยัดเวลาในการคำนวณ โดยโครงสร้างประกอบด้วยชั้นซ่อน
2 ชั้นและแต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 15 นิวรอน เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ANN กับแบบจำลอง
ความถดถอย พบว่า ANN สามารถทำนายผลของคุณลักษณะของข้าวเกรียบสำเร็จรูปได้ดีกว่าแบบจำลองความ
ถดถอย นำ ANN ที่พัฒนาขึ้นมาใช้หาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ด้วยการสร้าง
แผนภาพ contour และทำการซ้อนทับแผนภาพเพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสม ที่ให้คุณลักษณะใกล้เคียง
กับผลิตภัณฑ์ต้นแบบและมีความชื้นไม่เกิน 12% พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ที่อุณหภูมิ 59.4-69.3 องศา
เซลเซียส เวลาในการอบแห้ง 55-79 นาที มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบภายใต้สภาวะดังกล่าวอยู่
ในช่วง 10.11-17.36% แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะนำมาสร้างตู้อบแห้ง
อัตโนมัติสำหรับข้าวเกรียบ โดยตู้อบแห้งอัตโนมัตินี้จะใช้ข้อมูลแบบ online ในการประเมินคุณลักษณะต่างๆ
ของข้าวเกรียบ เพื่อให้ตู้อบแห้งสามารถที่จะปิดเครื่องโดยอัตโนมัติ เมื่อได้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

กัทลี จันทรเจนนอบ
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

27 / พ.ค. / 51

Katalee Chanchenchop 2008: Artificial Neural Network Application for Drying Process Prediction of Semi-Finished Holy Basil Cassava Cracker. Master of Science (Agro-Industrial Product Development), Major Field: Agro-Industrial Product Development, Department of Product Development. Thesis Advisor: Assistant Professor Saowanee Lertworasirikul, Ph.D. 129 pages.

Cassava cracker is a popular snack in Thailand with a thin crispy swell sheet and regular air bubbles. Drying process of cassava crackers is important because controlling appropriate drying condition will affect on the quality of product before and after frying process. The aim of this research was to develop an Artificial Neural Network (ANN) model for the drying process prediction of semi-finished holy basil cassava crackers by varying 5 levels of hidden neurons (1, 5, 10, 15 and 20 neurons) and 2 levels of hidden layers (1 and 2 layers). Three ANN models, which could predict only one characteristic at a time (models that could predict moisture content, a_w and hardness: maximum force, distance, work) and one ANN model, which could predict all characteristics at the same time, were compared. The criteria for selecting the appropriate ANN model were lowest Mean Squared Error (MSE) and high r between target outputs and predicted outputs. The MSEs of appropriated ANN models, which could predict only one characteristic at a time, for moisture content, a_w and hardness were 8.42×10^{-4} , 5.43×10^{-3} and 2.60×10^{-2} , respectively. The MSE of the appropriated ANN model, which could predict all characteristics at the same time, was 1.20×10^{-2} . Comparison of these ANN models showed that the ANN model, which could predict all characteristics at the same time, could better predict the characteristics of semi-finished cassava cracker and used less computational time than other ANN models. The structure of the selected ANN model was composed of 15 hidden neurons and 2 hidden layers. Then, the selected ANN model was compared with the regression model. The result showed that the performance of the ANN model could predict product characteristics better than regression model. The developed ANN model was used to create contour plots for product characteristics and then these contour plots were overlapped to get an appropriate drying condition giving characteristics of the product close to those of prototype product and moisture content lower than 12%. The appropriate drying temperature and drying time were in the range of 59.4-69.3 Degree Celsius and 55-79 minutes, respectively. The relative humidity inside the hot air dryer under the appropriate condition was in the range of 10.11-17.36%. The developed ANN model can be applied to build an automatic hot air dryer for semi-finished cassava cracker. The automatic hot air dryer will use on-line data to evaluate the characteristics of product and will turn itself off when reaching the appropriate characteristics of product.

Katalee Chanchenchop.

Student's signature

Saowanee Lertworasirikul

Thesis Advisor's signature

27 / May / 2008

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล ประธาน
กรรมการที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ชงชัย สุวรรณสิขณัน กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก ผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ ดร. รวิพิมพ์ นวิสุข กรรมการที่ปรึกษาวิชาการ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ
และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และรองศาสตราจารย์ ดร. ปาริฉัตร
หงสประภาส ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติม เพื่อความสมบูรณ์แห่ง
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอนให้มีความรู้ในด้านต่างๆ
สำหรับประยุกต์ใช้ในการทำงานต่อไป รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรม
เกษตรทุกท่าน ที่ช่วยแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์
ขอขอบคุณ พี่ เพื่อนและน้องๆ ปริญญาโทภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ความ
ช่วยเหลือ และกำลังใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องชาย และบุคคลที่คอยให้กำลังใจ ที่ให้ความ
รัก ความห่วงใย กำลังใจ การปลอบ โยนและสนับสนุนด้านการเรียนมาโดยตลอด สำหรับเพื่อนๆ ที่
ดีที่คอยผลักดันให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจกันเสมอมา

กัทลี จันทร์เจนจบ

สิงหาคม 2550

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	66
สรุปและข้อเสนอแนะ	100
สรุป	100
ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	103
ภาคผนวก	111
ภาคผนวก ก ความแตกต่างของค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของ	
ข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูป	112
ภาคผนวก ข ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่าย	
ใยประสาทเทียม	115
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	129

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติของแป้งชนิดต่าง ๆ	6
2	การพองตัวและการคูดน้ำของเม็ดแป้งจากแป้งชนิดต่างๆ	14
3	สูตรข้าวเกรียบพื้นฐาน	19
4	ระยะเวลาในการทอดและอุณหภูมิในการทอด	23
5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม	29
6	คะแนนความชอบของข้าวเกรียบรสกะเพราที่มีปริมาณใบกะเพรา 8% 10% และ 12%	48
7	ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบรสกะเพราที่ได้รับการพัฒนา	49
8	ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ	50
9	สิ่งทดลองสำหรับการศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ	57
10	สิ่งทดลองสำหรับการศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายข้อมูลออกรวมทั้งหมด	60
11	ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออกจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง	77
12	ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่า a_w ของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออกจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง	79
13	ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออกจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง	81
14	ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมดจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง	83
15	ผลสรุปของโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุด	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ (MSE) ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด	86
17	แบบจำลองความถดถอยสำหรับทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้งและประสิทธิภาพของแบบจำลอง	88
18	ค่า MSE ของ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด และแบบจำลองความถดถอย	92
19	ค่า MSE และค่า r ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและสมการถดถอยของข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลอง	93
20	สมการแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบในรูปของฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง	95
21	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบแห้งที่ได้จากแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ชนิดความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบพหุนามกำลังสอง (Second-order polynomial regression)	96
22	ผลการเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่ 64 °C นาน 76 นาที	99
ตารางผนวกที่		
ก1	ความแตกต่างของค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ณ เวลา 0-180 นาที	113
ก2	ความแตกต่างของค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ณ อุณหภูมิของกระบวนการอบแห้ง 50-80 องศาเซลเซียส	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการทำนายแบบที่ใช้ความชันของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูล ออก	116
ข2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการทำนายแบบที่ใช้ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก	118
ข3 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการทำนายแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัส โดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกึ่ง สำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก	123
ข4 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ ที่ทำนายจากคุณลักษณะรวมทั้งหมด	125

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	เม็ดแป้งมันสำปะหลังจากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน x 1000
2	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้น
3	แผนภาพการผลิตข้าวเกรียบ
4	การจำลองโครงข่ายประสาทของมนุษย์
5	การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
6	Log-Sigmoid Transfer Function (Log-Sig)
7	Tan-Sigmoid Transfer Function (Tan-Sig)
8	Linear transfer function (Purelin)
9	ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยฟังก์ชันการเปลี่ยน
10	โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับได้
11	โครงสร้าง Neural Network ที่ได้จากการพัฒนา
12	รูปแบบแสดงการวางชั้นข้าวเกรียบบนถาดสำหรับอบแห้ง
13	โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 1 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจาก กระบวนการอบแห้ง
14	โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจาก กระบวนการอบแห้ง
15	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายทีละ 1 ข้อมูลออก ใน กรณีที่ใช้ความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก
16	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายข้อมูลออกทั้งหมด
17	ตัวอย่างข้าวเกรียบสำหรับการทดลอง
18	ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในตู้อบขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศา เซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	อุณหภูมิในตู้อบขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	68
20	ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	69
21	ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	71
22	ค่าแรงสูงสุด (Maximum force) ที่ทำให้ข้าวเกรียบแตกหักของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	72
23	ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	73
24	พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	74
25	ค่า L^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	75
26	ค่า a^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	75
27	ค่า b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)	76
28	โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับการทำนายแบบที่ใช้ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก	78
29	โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับการทำนายแบบที่ใช้ ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก	80
30	โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายใยประสาทเทียมสำหรับการทำนายแบบที่ใช้ ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายข้อมูล ออกรวมทั้งหมด	84
32	เมตริกซ์ของอนุภูมิภาค เวลา ในการอบแห้งและคุณลักษณะต่างๆ ของข้าว เปรียบถึงสำเร็จรูป	94
33	แผนภาพ Contour plot ของคุณลักษณะต่างๆ	97
34	สถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปรียบ	98

การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายกระบวนการอบแห้งของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา

Artificial Neural Network Application for Drying Process Prediction of Semi-Finished Holy Basil Cassava Cracker

คำนำ

ข้าวเกรียบ (Chip or Cracker) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง ผสมด้วยเนื้อสัตว์หรือผัก เครื่องปรุงรส บดผสมให้เข้ากัน ทำให้สุกแล้วทำเป็นรูปร่างต่างๆ ทำให้แห้ง นำไปทอดหรืออบก่อนรับประทาน

ข้าวเกรียบเป็นขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง พอง กรอบ มีรูพรุนเรียบสม่ำเสมอ นิยมบริโภคกันมานาน ปัจจุบันแม้ว่าจะมีขนมขบเคี้ยวจำหน่ายในท้องตลาดมากมายที่ผลิตจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารประเภทอาหารขบเคี้ยว ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะพองตัว กรอบ และความหนาแน่นต่ำ แต่ข้าวเกรียบ ก็ยังได้รับความนิยมบริโภคกันพอสมควร ยิ่งกว่านั้นการผลิตข้าวเกรียบดูเหมือนว่าจะทำกันอย่างแพร่หลายทั่วประเทศ โดยเฉพาะกลุ่มแม่บ้านเกษตรกรในจังหวัดต่างๆ เนื่องจากเป็นวิธีการแปรรูปผลผลิตการเกษตร ประเภทพืชผัก ผลไม้ หรือเนื้อสัตว์ประเภทปลา กุ้งฝอย ที่ใช้เทคโนโลยีแบบง่ายๆ

ข้าวเกรียบที่ยังไม่ได้ทอดสามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือน ข้อสำคัญวัตถุดิบหลักที่ใช้ก็คือแป้งมันสำปะหลัง มีราคาถูก ส่วนผสมอื่นๆ อาจเป็นเนื้อสัตว์ หรืออาจเติมผักและผลไม้ชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงรสชาติให้แปลกและแตกต่างจากเดิม เช่น ขนุน มะละกอ เผือก มันเทศ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตข้าวเกรียบแบบนี้ มักจะทำกันโดยไม่มีการควบคุมกระบวนการผลิตให้คงที่ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

จากเหตุผลดังกล่าวนี้ การศึกษาถึงกระบวนการผลิตข้าวเกรียบจึงเป็นสิ่งที่สำคัญเนื่องจากการควบคุมสถานะในการผลิตข้าวเกรียบที่เหมาะสมจะมีผลต่อปัจจัยคุณภาพในด้านต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ เช่น สี การพองตัว ปริมาณความชื้นในตัวผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ปัญหาในการศึกษาถึงกระบวนการผลิตข้าวเกรียบที่เหมาะสมนั้นจะเป็นการศึกษาตั้งแต่อุณหภูมิและเวลาในการ

อบแห้ง ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเกรียบและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งสิ้น ซึ่งยังไม่สามารถทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบภายใต้สภาวะการผลิตที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาถึงสภาวะในกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อคุณลักษณะของข้าวเกรียบที่ได้ เพื่อเป็นแนวทางที่ดีสำหรับการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอและตรงตามความต้องการของผู้บริโภค

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และแบบจำลองความถดถอย (Regression model) ในการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้ง
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) กับแบบจำลองความถดถอย (Regression model) ในการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้งด้วยข้อมูลชุดทดสอบ
3. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

การตรวจเอกสาร

1. ความหมายของข้าวเกรียบ

ข้าวเกรียบ (Chip or Cracker) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งเป็นส่วนประกอบหลัก เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง ผสมด้วยเนื้อสัตว์หรือผัก เครื่องปรุงรส บดผสมให้เข้ากัน ทำให้สุกแล้วทำเป็นรูปร่างต่างๆ ทำให้แห้ง นำไปทอดหรืออบก่อนรับประทาน

ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป หมายถึง ข้าวเกรียบที่ยังไม่ได้ทอดหรืออบ

ข้าวเกรียบสำเร็จรูป หมายถึง ข้าวเกรียบที่ทอดหรืออบแล้ว พร้อมที่จะนำมารับประทาน

2. วัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบของข้าวเกรียบ

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลัง หมายถึง แป้งที่ทำจากหัวมันสำปะหลัง *Manihot utilissima* (Whistler *et al.*, 1984) ประกอบด้วยเม็ดแป้งตั้งแต่ 2 ถึง 8 เม็ดรวมกัน แต่ละเม็ดยาว 0.005-0.035 มิลลิเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.15 มิลลิเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะรูปไข่ ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดอาจจะแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจนและในบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งด้วย ดังแสดงในภาพที่ 1

การผลิตแป้งมันสำปะหลังทำโดยการนำหัวมันสำปะหลังสดไปล้างทำความสะอาด แยกเอาดินหรือสิ่งสกปรกออก แล้วนำไปขูดเปลือกออกพร้อมกับสับให้มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำไปบดย่อยพร้อมทั้งแยกเอากากมันสำปะหลังและน้ำแป้งออกจากกัน ส่วนกากมันสำปะหลัง (Cassava meal หรือ Cassava waste) จะถูกแยกออกไปตากให้แห้ง เพื่อนำไปจำหน่ายเป็นกากมันสำปะหลังหรือนำไปใช้ผสมกับมันเส้นเพื่ออัดเป็นมันเม็ดอีกครั้งหนึ่ง น้ำแป้งที่ถูกแยกออกมาจะถูกส่งไปฟอกด้วยไโอกัมมะถัน เพื่อขจัดยางและฟอกสีให้ขาวสะอาดขึ้น จากนั้นจะถูกส่งต่อไปทำให้แห้งเพื่อได้แป้งมันสำปะหลังออกมา การทำให้แห้งมีทั้งการใช้วิธีการสไลด์ (Centrifuge) และ

การอบด้วยความร้อน หัวมันสำปะหลังสดหนัก 1 กิโลกรัม ผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลังได้ 0.20 กิโลกรัม และได้กากมันสำปะหลังประมาณ 0.04-0.09 กิโลกรัม

จากแป้งมันสำปะหลังสามารถนำไปผลิตเป็นแป้งแปรรูป (Modified starch) ชนิดต่างๆ ซึ่งมีความสำคัญทางอุตสาหกรรมอาหาร ยา ตลอดจนสิ่งพิมพ์ หรือกาว และคาดว่าแป้งแปรรูปจากมันสำปะหลังจะมีบทบาทต่ออุตสาหกรรมมันสำปะหลังเพิ่มมากขึ้นในอนาคต



ภาพที่ 1 เม็ดแป้งมันสำปะหลังจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน x 1000
ที่มา: สุรางค์ (2534)

แป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการทำข้าวเกรียบ มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 สามารถพองตัวได้ง่าย ดูดน้ำได้เร็ว ให้แป้งเปียกที่ใสหนืดเมื่อแป้งเปียกเย็นตัวลงเกิดเจลบ้างเล็กน้อย อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งมีอิทธิพลต่อการพองตัว และเป็นผลทางอ้อมต่อการดูดซึมน้ำมันระหว่างทอด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแป้งชนิดต่างๆ

ปัจจัย	คุณสมบัติ		
	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	แป้งสาลี
ขนาดของอนุภาค (Granule size in microns , μ)	เฉลี่ย = 20 เล็กที่สุด = 5 ใหญ่ที่สุด = 35	3-8	2-10, 20-35
รูปร่าง (Granule shape)	กลม, รูปไข่, หน้า ตัด	หลายเหลี่ยม, เล็ก	กลม, รอยบากรูป ไข่
รูปแบบภายใต้แสง โพลาไรซ์ (Pattern under polarized light)	กากบาทสีดำ	ไม่ชัดเจน เนื่องจาก มีขนาดเล็ก	กากบาทสีดำ
อุณหภูมิการขึ้นไส (Gelatinization temperature range $^{\circ}\text{C}$)	52/64	68/78	52/64
ปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content approx., %)	0.1	0.4	1.0
ความใสของแป้งขึ้น (Paste clarity)	แสงทะลุผ่านได้	ทึบแสง	ทึบแสง
ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้ง ขึ้น (Paste texture)	ขาว, เหนียว เป็น ของไหลข้น	ลื่น, เนื้อหนัก	ลื่น, เนื้อหนัก

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ปัจจัย	คุณสมบัติ		
	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	แป้งสาลี
ความทนทานต่อแรงฉีก (Paste strength under mechanical shear and prolonged heat)	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง
รูปแบบภายใต้แสง โพลาไรซ์ (Pattern under polarized light)	กากบาทสีดำ	ไม่ชัดเจน เนื่องจากมีขนาดเล็ก	กากบาทสีดำ
อุณหภูมิการขึ้นไส (Gelatinization temperature range °C)	52/64	68/78	52/64
ปริมาณไขมันทั้งหมด (Total lipid content approx., %)	0.1	0.4	1.0
ความใสของแป้งขึ้น (Paste clarity)	แสงทะลุผ่านได้	ทึบแสง	ทึบแสง
ลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้ง ขึ้น (Paste texture)	ยาว, เหนียว เป็นของไหลข้น	สั้น, เนื้อหนัก	สั้น, เนื้อหนัก
ความทนทานต่อแรงฉีก (Paste strength under mechanical shear and prolonged heat)	ต่ำ	ปานกลาง	ปานกลาง

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ปัจจัย	คุณสมบัติ		
	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งข้าวเจ้า	แป้งสาลี
ความหนืด (Paste viscosity)	มาก, คืดัวช้า	ปานกลาง/ต่ำ, คืดัวเร็ว	ปานกลาง/ต่ำ, คืดัวเร็ว
รสและกลิ่น (Taste and odour)	ผลไม้ (Fruity)	ต่ำ	ต่ำ

ที่มา: Knight (1969)

2.2 แป้งข้าวเจ้า

แป้งข้าวเจ้า หมายถึง แป้งที่ได้จากข้าวเจ้า ข้าวเจ้า หมายถึง ข้าวหนึ่งที่เป็นข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว ข้าวหักใหญ่ ข้าวหักหรือปลายข้าว ที่ได้จากการสีข้าวเปลือกเจ้า ของพืชที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *ออไรซา ซาไคววา (Oryza sativa)* (อรพิน, 2533)

ในการผลิตข้าวเกรียบมักใส่แป้งข้าวเจ้าลงไปผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เพื่อปรับปริมาณอะไมโลสให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ (พรรณี, 2530) ทำให้ข้าวเกรียบพองตัวไม่มากหรือน้อยเกินไป แป้งข้าวเจ้าเตรียมได้จากข้าวหัก ด้วยเหตุนี้จึงมีองค์ประกอบเหมือนกับข้าวที่นำมาผลิตนั้น กล่าวคือ มีโปรตีน ไขมัน และอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกตินเหมือนกับข้าวปกติทุกประการ เนื่องจากข้าวมีหลายพันธุ์ แต่ละพันธุ์มีองค์ประกอบไม่เหมือนกัน ฉะนั้นแป้งที่ได้จึงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างกันไปด้วย เช่น ความหนืดของแป้งเปียก อุณหภูมิที่ทำให้แป้งสุก การดูดน้ำ และอื่นๆ ข้าวชนิดเมล็ดขาวที่ปลูกในประเทศไทยมีอะไมโลสประมาณ 17-30% เม็ดแป้งดูดน้ำได้ช้าลงทนต่อการแตกตัว ถ้าสามารถทำให้เม็ดแป้งแตกได้ แป้งเปียกและเจลที่ได้จะมีลักษณะเหนียวหนืดมากเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่าการทำแป้งข้าวเจ้านั้นทำได้ 2 วิธีคือ การโม่เปียกและการโม่แห้ง การโม่เปียกกระทำหลังจากที่นำข้าวไปแช่น้ำจนเม็ดแป้งนุ่มแล้วจึงนำมาบดด้วยโม่หิน การปฏิบัติเช่นนี้ทำให้เม็ดแป้งแตกออกจำนวนมาก แป้งที่ได้จึงดูดน้ำได้ดีและให้เจลที่เหนียว แต่การโม่แห้งนั้นกระทำได้โดยตรง โดยนำข้าวมาบดด้วย Hammer Mill แล้วร่อนผ่านตะแกรง แป้งที่ได้มีเม็ดแป้งแตกตัวน้อยมาก แป้งเปียกและเจลที่ได้จึงมี

ลักษณะเชิงกรอบ อนึ่ง โปรตีนที่มีอยู่ในข้าวเจ้าก็มีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้งมาก ทำให้แป้งดูดน้ำได้ช้าลง ส่วนเหตุผลที่แท้จริงนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด (ณรงค์, 2526) คุณสมบัติต่างๆ ของแป้งข้าวเจ้า แสดงไว้ดังตารางที่ 1

2.3 แป้งสาลีเนกประสงค์

แป้งสาลีชนิดเนกประสงค์ หมายถึง แป้งสาลีที่ได้จากการสีและบดเมล็ดข้าวสาลีชนิดธรรมดา หรือข้าวสาลีชนิดธรรมดาผสมกับคัลับหรือดูรัม (*Durum wheat, Triticum durum*) ซึ่งปราศจากสิ่งแปลกปลอม เป็นแป้งที่มีโปรตีนประมาณ 10-11% เป็นแป้งที่มีคุณสมบัติอยู่ตรงกลางระหว่างแป้งขนมปังและแป้งเค้ก (แป้งขนมปัง มีโปรตีนสูง 12-14% ใช้ทำผลิตภัณฑ์พวกขนมปังจืด ขนมปังหวาน และผลิตภัณฑ์ที่หมักด้วยยีสต์ทุกชนิด และแป้งเค้ก มีโปรตีนต่ำประมาณ 7-9 % ใช้ทำเค้กและคุกกี้) ดังคุณสมบัติของแป้งในตารางที่ 1 นิยมใช้ทำพายชนิดต่างๆ คุกกี้และกะหรี่ปั๊บ ถ้าเรานำแป้งชนิดนี้มาทำเค้กจะได้ลักษณะของเนื้อเค้กที่แน่นกว่าการใช้แป้งเค้กทำ และแป้งชนิดนี้เราสามารถเตรียมได้จากการนำแป้งขนมปังและแป้งเค้กมาผสมกัน (ใน 1 ถ้วยตวงจะได้น้ำหนักประมาณ 110 กรัม)

แป้งสาลีทำมาจากเมล็ดข้าวสาลี ซึ่งมีมากมายหลายพันธุ์ เป็นพืชตระกูลหญ้าในสกุล *Triticum* พันธุ์ที่ปลูกมากและเป็นที่รู้จักมี 3 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวสาลีชนิดธรรมดา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Triticum aestivum* นิยมปลูกมากถึง 92 % ของผลผลิตทั้งหมด พันธุ์นี้เหมาะในการทำขนมปัง พันธุ์ดูรัม (*Triticum durum*) มีเนื้อในสีเหลือง เหมาะในการทำมัคกะโรนี สปาเก็ตตี้ และพันธุ์ *Triticum compactum* เนื้อในสีขาวอ่อนนุ่ม ใช้ในการทำเค้ก คุกกี้และบิสกิต (อรอนงค์, 2532)

2.4 กุ้งแห้ง

สุรางค์ (2534) กล่าวว่า กุ้งแห้งที่ผลิตจากตำบลบางชันมีหลายอย่าง ราคาขึ้นอยู่กับคุณภาพ ขนาด และชนิดของกุ้งที่ใช้ทำกุ้งแห้ง ซึ่งพอจะแบ่งได้อย่างหายาๆ คือ

ก. กุ้งแห้งขนาดเล็ก ผลิตจากกุ้งที่เรียกว่า กุ้งเคย เหมาะกับการปรุงอาหาร

ข. กุ้งแห้งขนาดกลาง ผลิตจากกุ้งแช่บ๊วยขนาดเล็ก กุ้งตากขนาดเล็ก (ขนาดกุ้งสด 300 ตัวขึ้นไป ต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม) และมักจะมียูเรียมากกว่ากุ้งขนาดใหญ่ กุ้งนี้เหมาะแก่การรับประทานกับข้าวต้ม

ค. กุ้งขนาดใหญ่ ผลิตจากกุ้งแช่บ๊วยขนาดกลาง และกุ้งตากขนาดใหญ่ (ขนาดกุ้งสดประมาณ 200 ตัว ต่อน้ำหนัก 1 กิโลกรัม) ผู้ผลิตจะทำให้กุ้งมีรสพอดี ไม่เค็มเกินไป เหมาะกับการใช้รับประทานเล่นๆ

2.5 กระเทียม

สุรางค์ (2534) กล่าวว่า กระเทียม มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Allium Sativum* Linn. ชื่อวงศ์ Alliaceae ชื่ออังกฤษ Garlic ชื่อท้องถิ่น เทียม, หอมเทียม, หัวเทียม ส่วนที่ใช้เป็นอาหารมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ Leek คือ กระเทียมต้นไม่มีหัว ปลูกโดยใช้เมล็ดพันธุ์ เพื่อรับประทานลำต้นและใบ เป็นพืชผักสด และ Garlic คือกระเทียมที่ใช้ส่วนของหัว (Bulb) รับประทาน ปลูกด้วยกลีบพันธุ์ (Cloves) มีอายุยาวนานกว่าประเภทแรก พันธุ์ที่รู้จักกันดี ได้แก่ กระเทียมไทย มีหัวขนาดเล็กกลีบสีขาว เนื้อสีขาว รสและกลิ่นฉุนจัด กระเทียมลาว หัวสีม่วงอ่อน เนื้อข้างในสีเหลืองอ่อน รส และกลิ่นไม่ค่อยฉุน

สรรพคุณของกระเทียม ได้แก่ ฤทธิ์ในการขับน้ำดี เมื่อรับประทานเข้าไป จะไปเพิ่มน้ำย่อยและน้ำดี ฤทธิ์ฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุของอาการแน่นจุกเสียด เช่น *E. coli*, *Shigella* เป็นต้น โดยสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ คือ Allicin ฤทธิ์ลดการอักเสบ โดยกระเทียมสามารถช่วยบรรเทาอาการอักเสบ จึงช่วยรักษาแผลในกระเพาะอาหาร อันจะเป็นผลช่วยลดการแน่นจุกเสียดในผู้ป่วยที่เป็นโรคกระเพาะ โดยด้านการสังเคราะห์ Prostaglandin ฤทธิ์ป้องกันตับอักเสบ เนื่องจาก Carbon tetrachloride, Dimethylhydrazine, Galactosamine สารสำคัญในการออกฤทธิ์ คือ S-propyl cysteine, S-allyl mercaptocysteine, S-methyl-mercaptocysteine, Ajoene, Diallyl sulfide ฤทธิ์ฆ่าเชื้อรา มีผู้ทดลองฤทธิ์ต้านเชื้อราของกระเทียมมากมาย พบว่าสารสกัดด้วยน้ำและน้ำมันหอมระเหย สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา อันเป็นสาเหตุของโรคกลาก คือ *Trichophyton*, *Epidermophyton* และ *Microsporum* ได้ดี

2.6 รากผักชี

ผักชีมีชื่อเรียกหลายชนิดแตกต่างกันไป เช่น ภาคเหนือเรียกว่า ผักหอมป้อมและผักหอมพอม ภาคอีสานเรียกว่า ผักหอมน้อย และที่นครพนมเรียกว่า ผักหอม ผักชีเป็นผักที่อยู่ในตระกูล Umbelliferae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Coriandrum sativa* Linn. เป็นผักที่ใช้บริโภคส่วนของใบและก้านใบเป็นผักสด หรือใช้รับประทานกับสาหร่ายผักสด ต้นและรากใช้เป็นส่วนประกอบอาหารได้หลายอย่าง ใช้ต้มเป็นน้ำชุปหรือน้ำก๋วยเตี๋ยวทำให้มีกลิ่นหอมและรสชาติดี เมล็ดใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องแกงของเครื่องแกงเผ็ด นำมาบดคลุกกับเนื้อวัวสดใช้ทำเนื้อสวรรค์ที่มีกลิ่นหอมรับประทาน กลิ่นหอมของเมล็ด ราก ใบ และต้นของผักชีสามารถใช้ดับกลิ่นคาวของเนื้อสัตว์ได้ ในผักชีนั้นมีน้ำมันหอมระเหย สารเคมีที่พบในผักชีมีวิตามินซี 92-98% เช่น ดีคานาล (decanal) โนนานาล (nonanal) และลินาลิลออล (linalool) เป็นต้น (สุรางค์, 2534: วิจิต, 2530)

2.7 กะเพรา

กะเพรา มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Ocimum tenuiflorum* Linn., *Ocimum sanctum* Linn. ชื่อวงศ์ Labiatae ชื่ออังกฤษ Holy basil, Sacred basil ชื่อท้องถิ่น กอมก้อคง, กอมก้อ, กะเพราขาว, กะเพราแดง, ห่อแก้วชู, ห่อตูปู, อิมคิมหล้า ทางด้านอาหารใบ ยอดอ่อน และช่อดอกอ่อน ใช้แต่งกลิ่นอาหาร เพิ่มรสชาติ ดับกลิ่นคาว ทางด้านสมุนไพร ใช้ใบหรือทั้งต้นเป็นยาขับลม แก้ปวดท้อง ท้องเสีย และคลื่นไส้อาเจียน นิยมใช้กะเพราแดงมากกว่ากะเพราขาว

สรรพคุณของกะเพรา ได้แก่ ฤทธิ์ในการขับลม กะเพรามีน้ำมันหอมระเหยมีฤทธิ์ขับลม ฤทธิ์ด้านการเกิดแผลในกระเพาะ เมื่อป้อนสารสกัดกะเพราด้วยแอลกอฮอล์ 70% ทางท่อเข้าที่กระเพาะหนูขาว ในขนาด 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม มีผลรักษาแผลในกระเพาะอาหารที่เกิดจาก Aspirin ฤทธิ์ลดการบีบตัวของลำไส้ สารสกัดใบหรือใบแห้งด้วยน้ำหรือสารสกัดแอลกอฮอล์ 50% มีผลคลายกล้ามเนื้อเรียบของลำไส้หนูตะเภาและกระต่ายที่ถูกกระตุ้นด้วย Histamine, Acetylcholine, Carbachol ฤทธิ์ในการขับน้ำดีและลดการอักเสบ กะเพรา มี Eugenol ซึ่งมีฤทธิ์ขับน้ำดีและลดการอักเสบ โดยยับยั้งการสังเคราะห์ Prostaglandin

2.8 พริกไทย

พริกไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Piper nigrum* Linn. วงศ์ Piperaceae มีชื่อสามัญว่า Black pepper พริกไทย เป็นเครื่องเทศชนิดหนึ่งที่ใช้ในการประกอบอาหารเพื่อดับกลิ่นคาว คนไทยนิยมใช้มาตั้งแต่สมัยโบราณ ไม่ว่าจะเป็นรูปของพริกไทยป่น ซึ่งนิยมใช้กันทั่วไป หรือพริกไทยสด ซึ่งไม่ค่อยมีการนำมาใช้มากนักเพราะเน่าเสียเร็ว ประกอบกับมีราคาแพง คงใช้ในร้านอาหารภัตตาคารเท่านั้น แหล่งผลิตพริกไทยที่สำคัญในปัจจุบันคือ อำเภอท่าใหม่ จังหวัดจันทบุรี การเก็บพริกไทยสดจะต้องเก็บขณะที่ยังเขียวอยู่และต้องรีบนำส่งตลาดส่วนการเก็บพริกไทยเพื่อทำพริกไทยแห้งมี 2 ประเภท เรียกว่า พริกไทยขาวหรือพริกไทยอ่อน และพริกไทยดำ

พริกไทยขาว ได้จากพริกไทยที่สุกจัด คือ ในรวงมีผลสีแดง 1-2 ผล นำมากองสุ่มไว้บนเลื่อราแพน อาศัยความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมตาโบลิซึม เพื่อให้เมล็ดพริกไทยหลุดจากขั้ว นำไปใส่กระสอบแช่น้ำไหล 7-10 วัน หรือน้ำนิ่งในคลอง 5-7 วัน ต้องระวังไม่ให้เน่า การแช่น้ำทำให้เปลือกนิ่มเปื่อยนำมาผดให้เปลือกหลุดร้อนเอาเมล็ดพริกไทยไปตากแดดประมาณ 5-6 วัน พริกไทยที่ได้เรียกว่าพริกไทยขาวหรือพริกไทยอ่อน พริกไทยสดจำนวน 100 กิโลกรัม ได้พริกไทยขาวประมาณ 27 กิโลกรัม ส่วนการทำพริกไทยดำ เก็บพริกไทยดำที่แก่เต็มที่ขณะที่ผลยังเขียวอยู่นำมาตากโดยไม่ต้องแช่น้ำลอกเปลือกออก ถ้าเก็บพริกไทยสุกคือ มีผลสีแดงบ้างแล้ว เช่น การทำพริกไทยขาวมาทำพริกไทยดำจะทำให้ได้พริกไทยมีสีไม่สม่ำเสมอ พริกไทยสด 100 กิโลกรัม จะได้พริกไทยดำประมาณ 33 กิโลกรัม (สุรางค์, 2534: คำนิ้ง, 2530)

2.9 เกลือ

เกลือบริสุทธิ์มีลักษณะสีขาว มีสูตรทางเคมีว่า โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นผลึกรูปร่างไม่คงที่ จัดเป็นสื่อนำไฟฟ้า มีสมบัติดูดความชื้น จะมีสมบัติมากขึ้นถ้าเกลือนั้นไม่บริสุทธิ์ (กล้าณรงค์, 2521) นอกจากโซเดียมคลอไรด์แล้วยังมีโปรตัสเซียม แมกเนเซียม และแคลเซียม ในปริมาณเล็กน้อย หลังจากกินเกลือเข้าไปแล้ว โซเดียมจะถูกดูดซึมเข้าไปในร่างกายทำให้เกิดแรงดันออสโมติก มีผลต่อปริมาณน้ำในและนอกเซลล์ ทำให้ระดับน้ำในร่างกายเป็นปกติ (วิทิต, 2528)

สุรางค์ (2534) กล่าวว่า เกลือเป็นสารที่เพิ่มรสชาติของข้าวเกรียบ เมื่อใส่ลงไปในการทำให้ความหนืดของแป้งเปียกและเจลลดลง การเติมเกลือ 0.5-5.5% ช่วยเพิ่มการพองตัว นอกจากนี้เกลือยังมีผลต่อโปรตีนด้วย ทำให้ไมโอซินละลายออกมา ทำให้ส่วนผสมมีความเหนียวมากขึ้น เมื่อได้รับความร้อนก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เหนียว แต่อย่างไรก็ตามการดูดซึมน้ำมันจะลดลง ส่วนยูเรียและโซเดียมไบคาร์บอเนต 1-6% ลดการพองตัวของข้าวเกรียบที่ทอดแล้ว

2.10 น้ำ

ปริมาณความชื้นของส่วนผสมของวัตถุดิบมีผลต่อความหนาแน่นของข้าวเกรียบสำเร็จรูป การเกิดเจลของแป้งและการพองตัว ความชื้นได้จากน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมของน้ำจากองค์ประกอบของวัตถุดิบ

ปริมาณน้ำที่ใช้มีผลต่อการแตกตัวของเม็ดแป้งมาก ถ้าใช้น้ำมากเกินไปเม็ดแป้งจะแตกตัวมาก ให้เจลที่เหนียว (สุรางค์, 2534: Gutcho, 1973) และก้อนแป้งไม่คงรูปในขณะนึ่งให้สุก ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้น้ำน้อยเกินไปแป้งจะพองตัวน้อยและไม่สุก จะไม่เกิดเจลมากนัก ได้ก้อนแป้งที่ร่วน กรอบ และเมื่อนำไปทอดจะไม่พองตัว ผู้ผลิตมักจะคำนึงถึงปริมาณน้ำที่ใส่เพื่อการคงรูปของก้อนแป้งในขณะนึ่งให้สุก มิได้คำนึงถึงการเกิดเจลมากนัก จากการตรวจสอบสูตรต่างๆ พบว่าสูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเพียงอย่างเดียวจะใช้น้ำ 78 % ของน้ำหนักแป้ง เมื่อเพิ่มส่วนผสมของแป้งข้าวเจ้าลงไป ปริมาณน้ำที่ใช้จะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้าแต่เพียงอย่างเดียวจะใช้น้ำถึง 100% ของน้ำหนักแป้ง (เกรียงศักดิ์, 2523) แป้งชนิดต่างๆ มีความสามารถในการพองตัวและการดูดน้ำได้ไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อใส่ส่วนผสมอื่นที่มีความชื้นสูงลงไปด้วย ปริมาณน้ำที่ใช้จะลดลงแต่ลดลงเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของส่วนผสมนั้น

ตารางที่ 2 การพองตัวและการคูดน้ำของเม็ดแป้งจากแป้งชนิดต่างๆ

ชนิดของแป้ง	ค่าเฉลี่ยการเพิ่มของ เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค	การคูดน้ำต่อแป้งแห้ง 100 กรัม
แป้งข้าวโพด	0.1	39.9
แป้งมันฝรั่ง	12.7	50.9
แป้งมันสำปะหลัง	28.4	47.9

ที่มา: Knight (1969)

3. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

การตากแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่ง โดยมนุษย์เรียนรู้จากธรรมชาติ ตั้งแต่การอาศัยความร้อนจากแสงแดดมาตากแห้งผลิตผลเกษตร เช่น การตากกุ้ง ปลา ปลาหมึก เป็นต้น จากนั้นได้มีการพัฒนาเครื่องอบแห้งโดยอาศัยหลักการจากการตากแดด ประกอบด้วย แหล่งให้ลมร้อน ห้องอบแห้ง ระบบไหลเวียน อากาศร้อนและระบบระบายลมร้อนขึ้นออก ข้อได้เปรียบของการทำแห้งหรือการอบแห้งคือ ผลผลิตแห้งที่ได้มีน้ำหนักเบา เหลือน้ำในตัว ผลผลิตแห้งนั้นยังทำให้เก็บได้นานกว่า มีความคงตัวต่อสภาวะการเก็บ การทำแห้งเรียกได้หลายอย่าง เช่น การอบแห้ง การตากแห้ง การทำแห้ง หรือการคิงน้ำออก (ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549)

หลักการทำแห้งอาศัยพื้นฐานความรู้ที่ว่า ของสดจะมีปริมาณน้ำมากหรือมีความชื้นอยู่สูง ทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้น้ำในของสดได้ดี ทำให้ของสดเน่าเสียได้ง่ายจากการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์และเอนไซม์ เมื่อนำของสดไปทำแห้งหรือตากแห้ง ทำให้น้ำระเหยออกไปจากของสดได้ของแห้งซึ่งเหลือน้ำอยู่น้อยและมีความชื้นต่ำ จุลินทรีย์ไม่สามารถเติบโตได้ ทำให้ของแห้งสามารถเก็บได้นานขึ้น ในการทำแห้งต้องมีการควบคุมกระบวนการให้ความร้อนให้เหมาะสม เนื่องจากจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะได้ ถ้าควบคุมกระบวนการอบแห้งไม่ถูกต้องจะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิดรอยแตก ผิวหน้าแห้งแข็ง ดังนั้นการแปรรูปโดยการทำแห้งจึงมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงหลายประการ โดยเฉพาะระดับของอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ปริมาณและการไหลเวียนของอากาศร้อน ชนิด ขนาด และรูปร่างของของสดที่ต้องการทำแห้ง จึงได้มีการศึกษาปรากฏการณ์การทำแห้งตั้งแต่การถ่ายเทความร้อน ที่อาจเป็นแบบการนำความร้อน

การพาความร้อนหรือการแผ่รังสีความร้อน การแพร่ของของเหลวและไอน้ำในระหว่างการทำแห้ง คาบของการทำแห้งจนถึงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในระหว่างการทำแห้ง

ในการอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

ก. ช่วงให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัตถุ

จะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง อากาศร้อนจะสัมผัสกับวัสดุ และอุณหภูมิของวัสดุจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่ง และจะคงที่ที่ค่าอุณหภูมินี้ช่วงเวลาหนึ่ง เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ

ข. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

หลังจากที่วัสดุได้รับความร้อนในช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแล้ว ความร้อนส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ น้ำในอาหารจะเคลื่อนที่มายังบริเวณผิวโดยการเคลื่อนที่เป็นการเคลื่อนที่แบบการไหลผ่านช่องแคบ (Capillary flow) พร้อมกับไอน้ำที่เคลื่อนที่จากผิววัสดุมายังกระแสน้ำอากาศ ทำให้บริเวณผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำมาก อุณหภูมิ และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวคงที่ ทำให้การระเหยน้ำบริเวณรอบผิววัสดุเกิดขึ้นอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

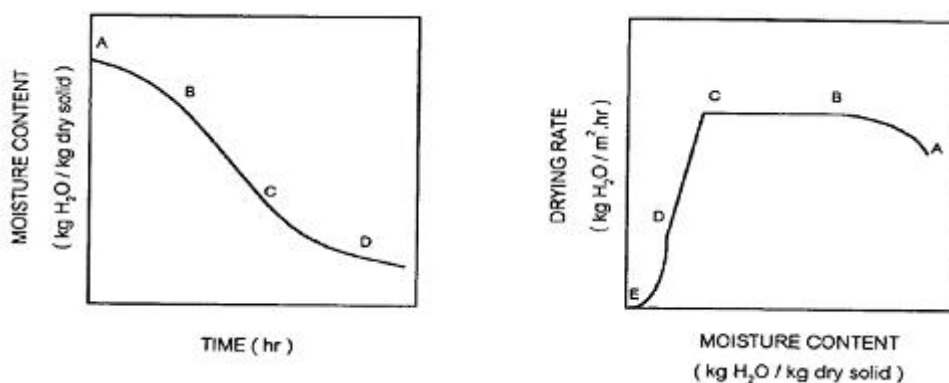
ค. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

เมื่อไอน้ำที่ผิววัสดุระเหยออกไปแล้ว ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และความเข้มข้นของไอน้ำลดลง น้ำจากภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (Diffusion) ซึ่งช้าลงจากเดิมมาก ทำให้การระเหยเกิดได้ช้า อัตราการอบแห้งลดลง จึงเรียกว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

การอบแห้งจะสิ้นสุดเมื่อ ความชื้นของอากาศในเตาสมดุลกับความชื้นของชิ้นอาหาร และเรียกความชื้นของอากาศขณะนั้นว่า ความชื้นสมดุล

การอบแห้งอาหารที่มีความชื้นมากโดยผ่านอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วกว่าคงที่ จะได้ปรากฏการณ์เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของอาหารคือ การแผ่

กระจายออกของของเหลวหรือไอน้ำ เนื่องจากความร้อนของอากาศร้อนที่ปะทะกับผิวหน้าอาหาร จะเปลี่ยนรูปเป็นความร้อนแฝงที่จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ขึ้นไป กลไกการส่งผ่านความร้อนและมวลนี้รวมถึงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของอาหาร อบแห้งและเวลาแสดงออกเป็นลักษณะดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้น
ที่มา: สิริลักษณ์ (2544)

จากภาพที่ 2 ในช่วงแรกอัตราการทำแห้ง AB ของการขจัดน้ำออกจากอาหารนั้น อัตราการทำแห้งอาหารจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิอาหารที่ทำแห้ง ในช่วงที่สอง อัตราการทำแห้ง BC อธิบายได้ว่า อุณหภูมิในอาหารที่ทำแห้งเริ่มคงที่ เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในอาหารมีมากเพียงพอที่จะเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าของอาหารและระเหยอยู่ในรูปของไอน้ำได้สม่ำเสมอตลอดเวลา ดังนั้นอัตราการทำแห้ง BC จะคงที่เป็นเส้นตรง ในช่วงที่สาม เส้น CD ความชื้นที่ผิวหน้าอาหารจะระเหยไปหมด ความชื้นจากโครงสร้างส่วนในของอาหารส่งมาไม่ทันกับความชื้นที่ระเหยไปจากผิวหน้าอาหาร ทำให้ผิวหน้าของอาหารมีลักษณะแห้ง และอุณหภูมิสูงขึ้น เส้นอัตราการทำแห้ง CD จึงเริ่มลดลงถึงอัตราส่วนของความชื้นสมดุล ถ้าเป็นการอบแห้ง อัตราการทำแห้งจะสิ้นสุดที่จุด E คือไม่มีความชื้นเหลืออยู่เลย เส้น CE เรียกว่าเป็นช่วงของอัตราความชื้นลดลง โดยความชื้นที่จุด C ซึ่งเป็นการเปลี่ยนอัตราการทำแห้งอย่างกะทันหัน จากอัตราการทำแห้งคงที่เป็นอัตราการทำแห้งลดลง เรียกว่าเป็นปริมาณความชื้นวิกฤต

โดยปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูประหว่างกระบวนการอบแห้ง ได้แก่

3.1 ขนาดและรูปร่างของวัสดุ (Sample thickness)

ส่วนใหญ่จะคำนึงถึงเฉพาะความหนา จากการศึกษาถึงอิทธิพลของความหนาของตัวอย่างกล้วยแผ่นของ Maskan (2000) ซึ่งอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การศึกษาการทำแห้งมันฝรั่งแผ่นของ Yusheng and Poulsen (1988) และการศึกษาถึงการทำแห้งแอปเปิ้ลแผ่นของ Roman *et al.* (1979) ทุกการวิจัยจะให้ผลสรุปเหมือนกันว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความบางจะแห้งได้เร็วกว่า เนื่องจากการลดระยะการเดินทางของความชื้นที่ออกจากผลิตภัณฑ์

3.2 อุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง (Drying temperature)

ถ้าอากาศมีความชื้นคงที่ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการรับไอน้ำเพิ่มขึ้น มีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้การแพร่กระจายของน้ำดีขึ้น มีผลต่ออัตราการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Maskan *et al.* (2002) ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิขณะอบแห้ง (Drying temperature) พบว่าเมื่ออุณหภูมิขณะอบแห้งสูงขึ้นอัตราการแห้ง (Drying rate) จะสูงขึ้น

3.3 เวลาในการอบแห้ง (Drying time)

Maskan *et al.* (2002) ศึกษาถึงอิทธิพลของเวลาในการอบแห้ง (Drying time) ต่อปริมาณความชื้น ที่ความเร็วลม (Air velocity) 0.86 m/s, 1.27 m/s และ 1.82 m/s ที่ 75 องศาเซลเซียส ในผลิตภัณฑ์องุ่นแผ่น (Grape leather หรือ Pestil) พบว่าปริมาณความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่จะเป็นเหมือนกันที่ความหนา และอุณหภูมิในการอบแห้งอื่นๆ ด้วย

3.4 ค่า water activity (a_w)

ค่า a_w เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจาก a_w เป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและ

ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ เราสามารถใช้ค่า a_w ในการประเมินว่าเชื้อจุลินทรีย์ชนิดใดเป็นหรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเสียตลอดจนใช้ในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดขึ้นจากเชื้อจุลินทรีย์ได้ เพราะเชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ภายใต้ค่า a_w ที่จำกัด โดยเราจะทำให้อาหารมีค่า a_w ต่ำกว่าที่เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ โดยปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหารทั้งหมดประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของน้ำที่เกาะติดกับอาหาร หรือถูกใช้ไปในการสร้างพันธะต่างๆ เช่น พันธะไฮดรอกซิล พันธะไฮโดรเจน และอีกส่วนคือ ปริมาณน้ำอิสระที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ในการเกิดพันธะใดๆ และจะอยู่ภายในช่องว่างของอาหาร ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร คือ รวมทั้งสองส่วนดังกล่าว ในขณะที่ a_w เป็นโมเลกุลของน้ำที่พร้อมจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอ ซึ่งเป็นส่วนของน้ำอิสระเท่านั้น ซึ่งในการทำให้แห้งหรือการทำแห้งเป็นการระเหยน้ำอิสระออกไป ส่วนการเติมเกลือ น้ำตาลหรือส่วนผสม (Ingredient) อื่นๆ ลงไป โมเลกุลของสารเหล่านั้นจะไปจับพันธะกับน้ำอิสระทำให้ค่า a_w ลดลงไปด้วย (เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว, 2546)

4. กรรมวิธีการผลิตข้าวเกรียบ

4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบหลักที่ใช้คือ แป้งมันสำปะหลัง ส่วนผสมอื่นๆ เช่น เนื้อสัตว์ ผัก ผลไม้ บางชนิดต้องนึ่งหรือต้มให้สุก แล้วบดละเอียด เช่น เผือก ฟักทอง มันเทศ แต่บางชนิดไม่จำเป็นต้องทำให้สุก เพียงแค่บดหรือโขลกให้ละเอียดก็ใช้ได้ เช่น มะละกอสุก กุ้งสุก หรือ ข้าวโพดหวาน เป็นต้น

หากเป็นเนื้อสัตว์ เช่น กุ้งต้องต้มให้สุก แกะเอาแต่เนื้อโขลกให้ละเอียด ผู้ผลิตบางรายใช้กุ้งแห้งบดละเอียด หรือบางรายต้องการลดต้นทุนก็ใช้หัวกุ้งสดต้มเอาน้ำออกจากหัวกุ้งไปใช้ หรือบางรายก็ใช้กลิ่นกุ้งแทน กรณีที่ทำข้าวเกรียบปลา อาจใช้ปลานิล ปลาหมอ นึ่งให้สุก บดให้ละเอียด ก่อนที่จะผสมกับส่วนผสมชนิดอื่นๆ สูตรตัวอย่างของข้าวเกรียบแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สูตรข้าวเกรียบพื้นฐาน

ส่วนผสม	ร้อยละ
แป้งมันสำปะหลัง	70
แป้งข้าวเจ้า	10
กุ้งแห้ง	12
กระเทียม	3
พริกไทย	1.5
รากผักชี	1.5
แป้งสาลี	1
เกลือ	1

หมายเหตุ อัตราส่วนระหว่างส่วนผสมทั้งหมดและน้ำเท่ากับ 500 กรัม ต่อ 275 กรัม

ที่มา: สุรางค์ (2534)

4.2 การผสมและการนวด

ผสมส่วนผสมที่เป็นของแห้งให้เข้ากันก่อน เช่น แป้งมันสำปะหลัง เกลือ พริกไทย แล้วจึงเติมส่วนผสมที่เป็นของสด เช่น กระเทียม เนื้อปลา เนื้อกุ้ง ผัก ผลไม้ชนิดต่างๆ คลุกเคล้าให้เข้ากัน เติมน้ำเดือดลงในส่วนผสม ในปริมาณพอเหมาะ แล้วนวดให้เข้ากันจนเนื้อเนียน

วิธีการผสมและนวดนั้นแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตหรือชนิดของผลิตภัณฑ์ ถ้าเป็นการผลิตแบบใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ การผสมจะทำเฉพาะส่วนที่เป็นของแห้ง แล้วนำไปใส่ในเครื่องเพื่อให้พอง ต่อจากนั้นจึงนำไปเคลือบกลั่น สี หรือรสต่อไป ส่วนการผลิตแบบก้อนแป้ง จะต้องผสมส่วนผสมทุกชนิดก่อนทำให้สุก แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการผสมและนวดก็แตกต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับปริมาณปลา และชนิดของแป้งที่ใช้ ถ้าสูตรใช้ปลาในปริมาณที่สูงจะใช้น้ำเย็นในการผสม โดยจะเริ่มด้วยการนวดเนื้อปลากับเกลือให้เข้ากันจนกระทั่งมีลักษณะเหนียว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 5-10 นาที ใส่กระเทียม พริกไทย นวดให้เข้ากันอีกครั้งหนึ่งหลังจากนั้นจึงใส่แป้งและน้ำสลับกันไป และนวดให้เข้ากันทุกครั้ง (ผ่องพรรณ, 2513) นอกจากนี้แล้วยังมีผู้แนะนำให้ นำเนื้อปลาที่บดละเอียดแล้วมาผสมกับกระเทียมและพริกไทยแล้วบดให้ละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

หลังจากนั้นจึงใส่เกลือนวดจนเหนียวแล้วจึงใส่แป้งสลับกับน้ำที่ละน้อยจนครบตามสูตร แบ่งออกเป็นส่วนๆ นำไปผสมกับสีตามต้องการ สำหรับการใช้น้ำอุ่นนั้นมักใช้กับสูตรที่มีเนื้อปลาปานกลาง แต่เนื้อปลายังให้ความเหนียวไม่พอที่จะทำให้แป้งจับตัวเป็นก้อนได้ วิธีการผสมเหมือนกับสูตรที่ใช้น้ำเย็นเพียงแค่เปลี่ยนเป็นน้ำอุ่นเท่านั้น ส่วนการใช้น้ำร้อนมักใช้กับสูตรที่มีเนื้อปลาค่อนข้างน้อยหรือเนื้อปลาที่ขาดความเหนียว แป้งไม่สามารถจับกันเป็นก้อนเหนียวได้ จึงต้องการความเหนียวของแป้งเปียกอีกส่วนหนึ่งด้วย วิธีผสมตามหลักการนี้ทำได้ 2 วิธี คือ วิธีที่เหมือนกับ 2 วิธีแรกที่ได้กล่าวมาแล้ว (เกรียงศักดิ์, 2523) และวิธีที่ต้องใช้ Pregelatinized starch จากแป้งหรือจากแป้งผสมส่วนหนึ่ง แล้วนำไปผสมกับส่วนผสมที่เหลือจนทำให้เข้ากันดี

การนวดแป้งก็มีความสำคัญมาก จากการทดลองพบว่า การนวดจะมีผลต่อการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวมาก และมีผลมากกว่าการนวดแป้งข้าวเจ้า ทั้งนี้เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวเม็ดแป้งแตกง่าย ส่วนแป้งข้าวเจ้าเม็ดแป้งแข็งแรงและแตกยาก แต่อย่างไรก็ตาม การนวดมีผลทำให้ข้าวเหนียวกับแป้งข้าวเจ้าพองตัวเพิ่มขึ้น

สำหรับข้าวเหนียวญี่ปุ่นนั้น วิธีการผสมและวิธีการนวดแตกต่างไปจากวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้ว กล่าวคือ การนวดและการผสมจะทำหลังจากที่นำแป้งที่มีความชื้น 38% ไปนึ่งให้สุกบางส่วน โดยใช้เวลานึ่ง 15-30 นาที การปฏิบัติเช่นนี้ทำให้แป้งสุกส่วนหนึ่งและทำให้เม็ดแป้งแตกตัว เมื่อปล่อยให้เย็นตัว 2-3 นาที แล้วนำไปนวด ปล่อยให้เย็นลงอีก ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปผสมกับเครื่องเทศ นวดอีกครั้งหนึ่งในภาชนะ นำไปแช่แข็งเพื่อลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งมีอุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 2-3 วัน เพื่อให้แป้งแข็งตัวและมีความเหนียวมากขึ้น ตัดเป็นชิ้นเคลือบด้วยซีอิ๊วและเครื่องปรุงรสแล้วนำไปลดความชื้นให้น้อยลงอีก อนึ่ง การเคลือบซีอิ๊วอาจทำก่อนหรือหลังการทำให้พองตัวแล้วก็ได้ (Li and Luh, 1980)

4.3 การปั้น

ปั้นก้อนแป้ง (dough) เป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 ½ นิ้ว ยาว 7-8 นิ้ว หรือความยาวขนาดที่จะวางเรียงได้ในลังถึงสำหรับนึ่ง

4.4 การนึ่ง

นึ่งให้สุก โดยใช้ถังต้มน้ำเดือด โดยวางก้อนแป้งลงในถังต้มน้ำโดยมีใบตองหรือผ้าดิบหุบน้ำพอหมาดๆ รองรับไว้ แป้งแต่ละก้อนควรวางให้มีระยะห่างกันประมาณ 1 นิ้ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันการติดกันต่อนั้นจึงนึ่งด้วยไฟกลาง (นิรมล, 2527) มีอุณหภูมิประมาณ 88-99 องศาเซลเซียส (Gutcho, 1973) ส่วนระยะเวลาที่ใช้นึ่งนั้นขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของก้อนแป้ง โดยปกติใช้เวลาหนึ่งประมาณ 1-1 ½ ชั่วโมง สำหรับก้อนแป้งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง ¾-1 นิ้ว (เกรียงศักดิ์, 2523; นิรมล, 2527) 40 นาที สำหรับก้อนแป้งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1-1 ½ นิ้ว (ประเสริฐ, 2514) หรือนึ่งจนก้อนแป้งใส ความแตกต่างของระยะเวลาที่ใช้นึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของแป้งที่เป็นส่วนผสม (พ่องพรรณ, 2513) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ ถ้าใช้น้ำมากแป้งจะสุกเร็วแต่ก้อนแป้งอาจจะไม่สามารถรักษารูปทรงไว้ได้ ถ้าใช้น้ำน้อยเกินไปแป้งจะสุกช้า หรือไม่สุกเลยถึงแม้จะใช้เวลาหนึ่งนาน ถ้าก้อนแป้งมีปริมาณน้ำพอเหมาะ ถึงแม้จะใช้เวลาหนึ่งนานไป 5 นาที ก็ไม่มีผลต่อการพองตัวมากนัก อีกประการหนึ่งในขณะทำการนึ่งควรระมัดระวังไม่ให้น้ำหยดลงบนก้อนแป้ง มิฉะนั้นก้อนแป้งอาจจะละลายได้ (Gutcho, 1973)

4.5 ทำให้เย็น

ปล่อยให้แป้งที่นึ่งสุก เย็นลงก่อน นำไปเก็บในตู้เย็น 4-10 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้ก้อนแป้งแข็งตัว จะทำให้หั่นง่ายขึ้น หากใช้เครื่องหั่นไม่จำเป็นต้องเก็บในตู้เย็น สามารถวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2-3 วันให้แป้งแข็งแล้วจึงหั่น ถ้าก้อนแป้งมีลักษณะไม่ติดมืออาจหั่นได้ทันที แต่ถ้าก้อนแป้งมีลักษณะเหนียวเหนอะหนะต้องทิ้งก้อนแป้งไว้ให้ผิวแห้ง ซึ่งต้องใช้เวลา 12 ชั่วโมง หรือนำเข้าตู้เย็นเป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง (งามจิตร์, 2529) มีผู้ปฏิบัติงานคนใช้วิธีลดอุณหภูมิด้วยการรดด้วยน้ำเย็นแล้วก้อนแป้งไปผึ่งให้แห้งแข็ง ก่อนจะนำมาหั่นต้องนำก้อนแป้งที่แห้งแข็งนี้มาแช่น้ำไว้ 30 นาที (นิรมล, 2527)

4.6 การหั่น

หั่นให้เป็นชิ้นบางๆ ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ข้าวเกรียบชิ้นบางๆ จะพองตัวดีกว่าชิ้นหนา การหั่นข้าวเกรียบอาจทำได้ทั้งหั่นด้วยมือหรือใช้เครื่องหั่น สิ่งที่ต้องระมัดระวังในการหั่นคือความหนาของแผ่น ถ้าแผ่นมีความหนามาก การพองตัวจะน้อย เนื้อแข็ง แต่ถ้าแผ่นมีความหนาน้อยลง การพองตัวจะมีมากขึ้น (Li and Luh, 1980) ความหนาของแผ่นข้าวเกรียบที่ใช้

กันมากอยู่ระหว่าง 1.0-1.75 มิลลิเมตร (ผ่องพรรณ, 2513; เกรียงศักดิ์, 2523; นิรมล, 2527)
สำหรับข้าวเกรียบญี่ปุ่น การหั่นจะแตกต่างออกไป โดยมีความหนามากกว่า (Li and Luh, 1980)

การหั่นข้าวเกรียบมักจะมีปัญหาเกิดขึ้นเสมอ โดยเฉพาะข้าวเกรียบที่มีแป้งมัน
สำปะหลังผสมอยู่ด้วย สูตรที่มีแป้งมันสำปะหลังผสมอยู่มากกว่า 70% ของแป้งที่ใช้ ข้าวเกรียบจะ
ติดมีดที่ใช้หั่น และแผ่นที่หั่นออกมาแล้วก็จะติดกัน เมื่อใช้แป้งข้าวเจ้ามากขึ้นปัญหาดังกล่าวก็จะ
หมดไป แต่ใช้แป้งข้าวเจ้ามากเกินไปแผ่นแป้งที่หั่นได้จะแตกมาก เนื่องจากแป้งไม่สุก (เกรียง
ศักดิ์, 2523)

4.7 การทำให้แห้ง

เนื่องจากน้ำที่มีอยู่มีผลต่อการพองตัวของข้าวเกรียบมาก ข้าวเกรียบที่มีน้ำมาก
เกินไปเมื่อนำไปทอดจะเกิดรูพรุนอยู่ทั่วไป ผิวขรุขระไม่น่ารับประทาน เมื่อลดความชื้นลงรูพรุน
 ขนาดใหญ่ค่อยๆ หายไป ผิวจะเรียบมากขึ้น (เกรียงศักดิ์, 2523) ในการผลิตข้าวเกรียบจึง
 จำเป็นต้องควบคุมความชื้นสุดท้ายของข้าวเกรียบให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ
 ข้าวเกรียบที่ความชื้นบริเวณพื้นผิวดำกว่าภายในมากเมื่อนำไปทอดจะไม่พองตัว (สุรางค์, 2534:
 Gutcho, 1973)

การทำให้แห้งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ การใช้แสงแดด และการใช้ตู้อบ การทำให้แห้ง
แบบใช้แสงแดดใช้เวลาประมาณ 1-2 แดด (ผ่องพรรณ, 2513) ระยะเวลาที่แตกต่างกันนั้นขึ้นอยู่กับ
กับความหนาของแผ่น แผ่นข้าวเกรียบที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร จะใช้เวลาตากแดดเพียง
3 ชั่วโมงเท่านั้น สำหรับการทำให้แห้งแบบใช้ตู้อบนั้น ใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 3-4
ชั่วโมง สำหรับข้าวเกรียบญี่ปุ่นการอบแห้งจะทำได้ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการนำเอาข้าว
เกรียบที่หั่นแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 45-47 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีความชื้น 20% เคลือบด้วยซีอิ๊ว
และเครื่องเทศ หลังจากนั้นจึงนำไปลดความชื้นอีกครั้งหนึ่ง (Li and Luh, 1980) สำหรับการ
อบแห้งข้าวเกรียบที่ผลิตแบบแป้งเหลวนั้น หลังจากที่ได้ตัดเป็นชิ้นตามขนาดที่ต้องการแล้วก็นำไป
ลดความชื้นซึ่งอาจใช้แสงแดดหรือเตาอบก็ได้ (Siegel, 1974)

สำหรับความชื้นสุดท้ายของข้าวเกรียบหลังจากลดความชื้นแล้วควรอยู่ระหว่าง 8-
12% และความชื้นที่เหมาะสมที่สุดควรเป็น 8% สำหรับข้าวเกรียบที่มีขายอยู่ในท้องตลาด ผลการ
วิเคราะห์ปรากฏว่ามีความชื้นระหว่าง 11-15% (สุรางค์, 2534: Gutcho, 1973)

4.8 การทอด

การทอดเป็นกระบวนการที่ทำให้ข้าวเกรียบพองตัวโดยใช้น้ำมันเป็นสื่อความร้อน ผลของการทอดจะลดความชื้นให้ต่ำลง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะกรอบ นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มไขมันให้มากขึ้นด้วย ข้าวเกรียบที่ทอดแล้วจะมีน้ำมันเพิ่มขึ้น 10-40% (Joslyn and Heid, 1964) ในการทดลองผลิตข้าวเกรียบที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเหลือง เมื่อนำไปทอดความชื้นจะลดลงเหลือ 3.9% (Siegel, 1974) โดยปกติการทอดข้าวเกรียบจะต้องใช้น้ำมันมาก น้ำมันที่ใช้ควรมีอุณหภูมิ 175-200 องศาเซลเซียส เวลาในการทอดประมาณ 4-5 วินาที ทันทีที่อาหารสัมผัสกับน้ำมัน พรายน้ำมันจะพุ่งขึ้นมาอย่างแรง เมื่อข้าวเกรียบพองตัวดีแล้วพรายน้ำมันจะหมดไป อาหารจะแข็งและเกิดสีน้ำตาลขึ้น

ตารางที่ 4 ระยะเวลาในการทอดและอุณหภูมิในการทอด

ความหนา (มม.)	เวลา (วินาที)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
1	4 – 5	175 – 180 ¹
1.6	10	177 – 204 ²

ที่มา: ¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร (2533)

²เกรียงศักดิ์ (2523)

สำหรับปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในข้าวเกรียบนั้นขึ้นอยู่กับความชื้นของอาหาร ถ้าข้าวเกรียบมีความชื้นสุดท้ายก่อนทอดสูงจะดูดน้ำมันได้มากกว่าข้าวเกรียบที่มีความชื้นต่ำ (Siegel, 1974)

การผลิตข้าวเกรียบดังที่กล่าวมาข้างต้น แสดงได้เป็นแผนภาพดังภาพที่ 3

แป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งข้าวเจ้าหรือแป้งสาลี

↓ ← เติมเกลือ พริกไทย

คลุกเคล้าให้เข้ากัน

↓ ← เติมกระเทียม ผัก/ผลไม้ หรือเนื้อสัตว์
บดละเอียดและน้ำปลาหลังจาก
นำไปต้มกับน้ำจนเดือด

ผสมให้เข้ากัน

↓

นำส่วนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน

↓

ปั้นก้อนแป้งเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง

1 ½ นิ้ว ยาวประมาณ 7-8 นิ้ว

↓

นึ่งให้สุก ใช้เวลาประมาณ 30 นาที

↓

แช่ในตู้เย็น หรือวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน

↓

หั่นเป็นชิ้นบางๆ

↓

ตากแดดหรืออบด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60°C 3-4 ชั่วโมง

ภาพที่ 3 แผนภาพการผลิตข้าวเกรียบ

ที่มา: เพลิโนใจ (2546)

5. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ในการพัฒนากระบวนการผลิต

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เป็นตัวแทนของระบบที่สร้างขึ้นเป็นชุดของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ของระบบ โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้ในการศึกษาและพยากรณ์ถึงเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้น แบบจำลองที่ดีควรมีความเรียบง่ายและมีพฤติกรรมเป็นไปตามปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ การพัฒนาด้านอุตสาหกรรมเกษตรปัจจุบันพบว่า แบบจำลองได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มมากขึ้น โดยแบบจำลองสามารถนำมาใช้ในแต่ละขั้นตอนของการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้แบบจำลองในการพัฒนาสูตร ใช้แบบจำลองในการทำนายการตัดสินใจของผู้บริโภค เป็นต้น (นันทวัน, 2548) โดยทั่วไปเทคนิคการสร้างแบบจำลอง สามารถจำแนกได้อย่างกว้างๆ เป็น 2 แบบ ดังนี้

5.1 แบบจำลองแบบกล่องสีขาว (White box model)

สามารถเรียกได้อีกอย่างว่า แบบจำลองแบบกล่องใส (Glass box หรือ Clear box) เป็นเทคนิคการสร้างแบบจำลองที่ในระบบจะมีข้อมูลที่จำเป็นทุกอย่าง สามารถที่จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และสถิติเข้ามาช่วยแบบจำลองที่สร้างโดยเทคนิคนี้ เช่น Deterministic model, Data fitting เป็นต้น

แบบจำลองการถดถอย (Regression model) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการประมาณค่าหรือทำนายค่าของตัวแปรหนึ่งโดยใช้ค่าของข้อมูลอีกตัวหนึ่งหรือหลายตัวเป็นตัวทำนายค่าตัวแปรที่ใช้ในการทำนาย เรียกว่าตัวทำนายค่า (predictor) หรือตัวแปรอิสระ (independent variable) ส่วนผลที่ได้ เรียกว่าผลที่วัดได้ (outcome หรือ response) หรือตัวแปรตาม (dependent variable) แบบจำลองประเภทนี้ มีข้อสมมติหรือเงื่อนไขทางสถิติที่ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มของแบบจำลองต้องมีการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่ และตัวแปรอิสระต้องไม่มีสหสัมพันธ์กัน (multicollinearity) (กัลยา, 2546) การวิเคราะห์จะนำตัวแปรทั้งสองมาพิจารณาพร้อมๆ กัน เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยที่ต้องทราบค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง หรือต้องกำหนดค่าของตัวแปรตัวหนึ่งไว้ล่วงหน้า แบบจำลองการถดถอยจะเกี่ยวข้องกับการประมาณค่าหรือการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม เมื่อกำหนดค่าของตัวแปรอิสระ โดยพยายามให้ค่าที่ประมาณหรือค่าที่พยากรณ์ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อย หรือมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

แบบจำลองความถดถอยที่ใช้ในการทำนายนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ แต่สามารถจำแนกได้ 2 แบบใหญ่ๆ คือ แบบจำลองความถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression) ได้แก่ ความถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple Linear Regression) และความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) และแบบไม่เชิงเส้นตรง (non-linear regression) ได้แก่ ความถดถอยแบบโพลิโนเมียล (Polynomial regression)

5.1.1 ความถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่าย (Simple Linear Regression) เป็นการวิเคราะห์ความถดถอยที่มีตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว โดยความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ประมาณได้ มีลักษณะเป็นเส้นตรงสามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ดังนี้

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

โดยที่ Y_i = ตัวแปรตาม (Dependent variable)

X = ตัวแปรอิสระ (Independent variable)

β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y_i เมื่อ X_i มีค่าเป็นศูนย์

β_1 = ความชัน (Slope) ของเส้นตรง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y_i เมื่อ X_i เปลี่ยนไป 1 หน่วย หรือเรียก สัมประสิทธิ์ความถดถอย (regression coefficient)

ε_i = ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random Error)

5.1.2 ความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) การวิเคราะห์ความถดถอยที่มีตัวแปรอิสระที่ศึกษามีมากกว่า 1 ตัวแปร สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ดังนี้

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

โดยที่ Y_i = ตัวแปรตาม (Dependent variable)

X_{ij} = ตัวแปรอิสระ (Independent variable) ค่าของตัวแปรต้นที่ j จากทศดลองที่ i โดย X_{ij} เป็นอิสระต่อกัน ($j = 1, 2, 3, \dots, k$)

β_0 = ส่วนตัดแกน Y หรือค่าของ Y_i เมื่อ X_{ij} มีค่าเป็นศูนย์

β_i = ความชัน (Slope) ของเส้นตรง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y_i เมื่อ X_{ij} เปลี่ยนไป 1 หน่วย ($i = 1-k$) หรือเรียก สัมประสิทธิ์ความถดถอย (regression coefficient)

$\mathcal{E}_i$ = ความคลาดเคลื่อนอย่างสุ่ม (Random Error)

5.1.3 ความถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) ถ้าตัวแปรอิสระหลายตัวที่ยกกำลังสูงกว่าหนึ่ง (higher order) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม Y จะได้สมการความถดถอยแบบยกกำลัง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง X และ Y ดังนี้ (อัมรินทร์, 2548)

$$Y_i = \sum_{j=1}^l \sum_{k=1}^p \beta_k Z_k(X_{ij}) + \mathcal{E}_i$$

โดยที่ Y_i = ค่าของตัวแปรตามจากการทดลองที่ i

X_{ij} = ค่าของตัวแปรต้นที่ j จากการทดลองที่ i โดย X_{ij} เป็นอิสระต่อกัน ($j = 1, 2, 3, \dots, k$)

$Z_k(X_{ij})$ = รูปแบบของสมการที่เป็นฟังก์ชันของ X_{ij} โดยอาจอยู่ในรูปกำลังหนึ่ง กำลังสอง หรือสูงกว่า หรือปฏิสัมพันธ์ของ X_{ij}

β_k = สัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน โดยที่ β_k แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม Y_i เมื่อเปลี่ยนไป $Z_k(X_{ij})$ 1 หน่วย โดยที่ตัวแปรอื่นๆ มีค่าคงที่

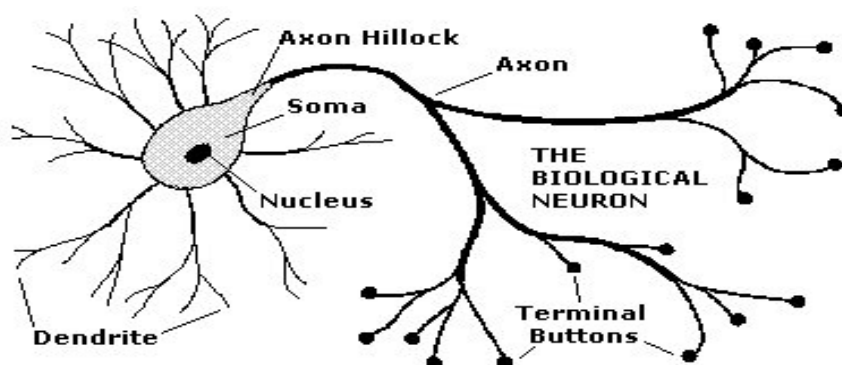
$\mathcal{E}_i$ = ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม มีแจกแจงแบบปกติเป็นอิสระต่อกัน มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีค่าความแปรปรวนคงที่ เท่ากับ σ^2

5.2 แบบจำลองแบบกล่องสีดำ (Black box model)

เป็นเทคนิคการสร้างแบบจำลองที่ไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามได้ เป็นเทคนิคที่ใช้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นมาแล้วในอดีต มาใช้เพื่อทำนายผลของเหตุการณ์ที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต โดยแบบจำลองที่จะสร้างขึ้นจากเทคนิคนี้ ต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมากเพื่อสร้างและจดจำรูปแบบของความสัมพันธ์ แบบจำลองที่สร้างโดยเทคนิคนี้ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network model) เป็นต้น

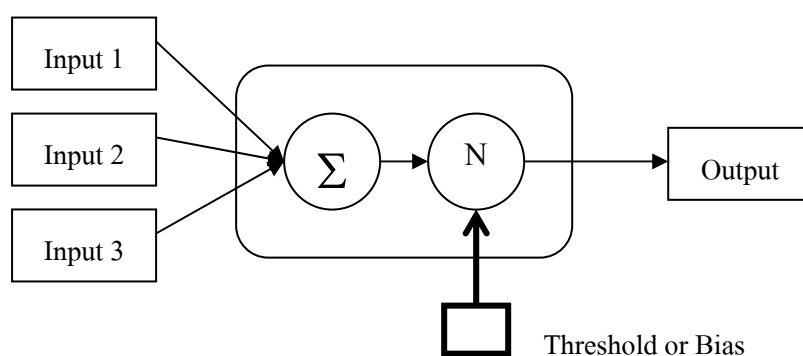
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network หรือ ANN) เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคนิค Black box model เป็นแนวคิดที่ถูกออกแบบให้ทำงานเช่นเดียวกับสมองมนุษย์ซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผล (Processing elements) ซึ่งมีเซลล์หลายๆ ตัวที่ทำ

หน้าที่คล้ายกับเซลล์สมองของมนุษย์ โดยที่แต่ละเซลล์จะโยงใยติดต่อกันโดยส่งสัญญาณเอาต์พุต(Output) ผ่านส่วนที่เรียกว่า ไซแนปส์ (Synapses) กลายมาเป็นข้อมูลนำเข้า (Input) ของส่วนที่เรียกว่า เดนไดรต์ (Dendrites) และเมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลจะได้เอาต์พุตออกมาในส่วนที่เรียกว่า แอ็กซอน (Axon) ในแต่ละเซลล์จะรับรู้ข้อมูลได้จากหลายทาง แล้วส่งต่อไปยังเซลล์อื่นๆ โดยใช้หลักการ Synaptic Strength ของการเชื่อมโยงเซลล์สมอง ภาพที่ 4 แสดงการจำลองโครงข่ายประสาทของมนุษย์ และภาพที่ 5 แสดงการจำลองโครงข่ายประสาทเทียม



ภาพที่ 4 การจำลองโครงข่ายประสาทของมนุษย์

ที่มา: www.swarthmore.edu 15/04/2008



ภาพที่ 5 การจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ที่มา: สมยศ (2547)

ส่วนวิธีการประมวลผลภายในโดยเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะมีจุดเชื่อมโยงระหว่างการทำงานเป็น 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการกระตุ้น (Excitatory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านเข้ามามีความถี่สูงขึ้น และลักษณะการยับยั้ง (Inhibitory) เป็นการทำให้สัญญาณที่ส่งผ่าน

เข้ามามีความถี่ลดลง ซึ่งแบบจำลองของ ANN จะมีอัตราการขยายหรือหดได้เมื่อถูกกำหนดด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม แสดงได้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ประสาทกับเซลล์ประสาทเทียม

ลำดับ	เซลล์ประสาท	เซลล์ประสาทเทียม
1	ตัวเซลล์	ยูนิต
2	เดนไดรต์	ตัวแปรอินพุต
3	แอกซอน	ตัวแปรเอาต์พุต
4	ไซแนปส์	ค่าถ่วงน้ำหนัก
5	ความเร็วในการทำงานช้า	ความเร็วในการทำงานสูง
6	มีเซลล์จำนวนมาก (ประมาณ 10^9 ยูนิต)	มีเซลล์จำนวนน้อยกว่า(เป็นหลักร้อย)

ที่มา: สมยศ (2547)

ANN เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์และอาศัยหลักกระจายข้อมูลด้วยความเท่าเทียมกัน ระบบนี้มีวิธีที่แน่นอนเหมือนสมองมนุษย์ ใช้ในการประมาณค่า การทำนายผลหรือการจัดกลุ่ม ระบบจะมีความสามารถในการจดจำความสัมพันธ์ของข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลออก (Output) จากรูปแบบที่กำหนดให้โดยการเรียนรู้ ทำให้ ANN สามารถแก้ไขปัญหามีความยุ่งยากซับซ้อนมากๆ ได้ เช่น รูปแบบของการบันทึกความจำแบบจำลองไม่เชิงเส้น การจำแนกแยกแยะความสัมพันธ์ของหลายๆ ส่วนการควบคุม และอื่นๆ ANN ถูกพัฒนาเหมือนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั่วไปของระบบสมองมนุษย์ สรุปข้อดีของการใช้งานระบบ ANN ที่ชัดเจนคือความสามารถในการแก้ปัญหาที่ไม่จำเป็นต้องมีนิยามที่เด่นชัดเหมือนปัญหาเชิงคณิตศาสตร์ทั่วไป ในทางตรงกันข้าม ระบบ ANN จะแก้ไขปัญหาก็เพียงแต่มีการรวบรวมชุดของตัวอย่างของปัญหาและคำตอบ และระบบจะพยายามปรับปรุงข้อมูลความรู้ภายใน แต่ในการเลือกพารามิเตอร์ เช่น จำนวนของหน่วยซ่อน (Hidden nodes) อัตราการเรียนรู้ (Learning rate) และน้ำหนักเริ่มต้น (Initial weight) ทำได้ยาก เนื่องจากไม่มีทฤษฎีเริ่มต้นที่จะสามารถบอกได้ว่าจะมีจำนวนหน่วย (Node) ใน ชั้นซ่อน (Hidden layer) เท่าไร ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการประมาณค่าเริ่มต้นต่างๆ

5.2.1 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

ก. การเรียนรู้แบบมีครูสอน (Supervised learning) เป็นการใช้รูปแบบของชุดข้อมูลคู่ข้อมูลนำเข้า-ข้อมูลออก (Input-Output) เพื่อให้โครงข่ายได้เรียนรู้หาความสัมพันธ์ภายในของข้อมูลนำเข้า (Input) ต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลออก (Output) ของโครงข่ายใกล้เคียงหรือตรงกับข้อมูลออก (Output) ที่กำหนดให้ ดังนั้นการเรียนรู้แบบนี้ ถ้าข้อมูลออกที่ได้ไม่ตรงกับค่า Target output โครงข่ายจะส่งข้อมูลความคลาดเคลื่อนกลับไปปรับแก้ค่าต่างๆ ที่เชื่อมโยงในโครงข่าย เพื่อให้ได้ข้อมูลออก (Output) ที่มีความถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่า Target output เช่น โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Perceptron, Feedforward Backpropagation, Radial basis function เป็นต้น

Backpropagation Networks (BPN) เป็น ANN แบบ Supervised learning แบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย จุดประสงค์ของการฝึกฝนโครงข่ายแบบนี้เพื่อให้ได้ โครงข่ายที่มีแบบแผนการฝึกฝนข้อมูลนำเข้า (Input) ที่ถูกต้อง และเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความคล้ายคลึงกับข้อมูลนำเข้า (Input) เหมาะสำหรับข้อมูลแบบต่อเนื่อง ฟังก์ชันในการประมาณค่าของ BPN จะเป็นแบบไม่มีขีดจำกัด (Unbounded)

ข. การเรียนรู้แบบเสริม (Reinforcement) ในการเรียนรู้แบบเสริมนี้โครงข่ายจะต้องสามารถรับมือกับสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง และสามารถที่จะทำนายเหตุการณ์ในอนาคตที่มีลักษณะเหมือนกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตที่ผ่านมาแล้วได้ โดยการเรียนรู้แบบนี้มักจะไม่มีการมีข้อมูลนำเข้า (x) แต่จะสร้างข้อมูลจากข้อมูลที่เป็นตัวแทน เช่น ที่เวลา t ข้อมูลที่เป็นตัวแทน จะให้ผลเป็น y_t แล้วก็จะมีการสร้างข้อมูลนำเข้ามาเป็น x_t เป็นต้น

Radial Basis Function Networks (RBFN) เป็นโครงข่ายที่มีหลายชั้นเหมือนกับ BPN โดยจะมีการเรียนรู้เป็น 2 ส่วนคือ มีทั้งส่วนที่เป็น Supervised learning และ Unsupervised learning สามารถใช้ได้ทั้งในการประมาณ (Approximation)/ การทำนาย (Prediction) และการจำแนกประเภท (Classification) โครงสร้างเป็นแบบ Fully connected feedforward ซึ่งประกอบไปด้วย Input units, Hidden (Pattern/Cluster) units และ Output units โดยฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณใน RBFN คือ The Kernel function, K (ค่าที่เป็นบวก เป็น radial systematric function ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดศูนย์กลาง และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีระยะห่างออกไปจากจุดศูนย์กลาง) ฟังก์ชันในการประมาณค่าของ RBFN จะเป็นแบบมีขีดจำกัด (Bounded)

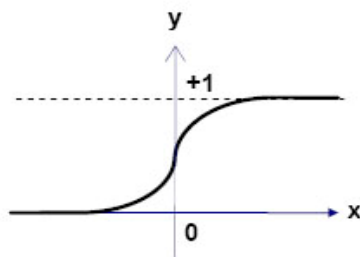
ค. การเรียนรู้แบบไม่มีครูสอน (Unsupervised learning) ในโครงข่ายของการเรียนรู้แบบนี้จะปรับตัวเองหรือหาความสัมพันธ์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เองโดยไม่ต้องการความช่วยเหลือจากภายนอกและไม่รับรู้ความผิดพลาดที่เกิดจากข้อมูลเป้าหมาย การเรียนรู้แบบนี้จะใช้วิธีการสร้างความเข้มแข็งให้กับค่าถ่วงน้ำหนักที่เชื่อมโยงกับข้อมูลออก (Input) ที่ตอบสนองได้ดีกับค่า Target output เช่น โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Self organizing maps, Hopfield networks เป็นต้น

Kohonen Self-Organizing Maps (SOM) เป็น ANN แบบ Unsupervised learning ชนิดหนึ่ง โดยโครงข่ายจะเรียนรู้จากข้อมูลที่เกิดขึ้นร่วมกันบ่อยๆ ใช้จับกลุ่มข้อมูลนำเข้า (Input) ที่มีลักษณะคล้ายๆ กันเข้าด้วยกัน โดยแต่ละ Output จะเป็นตัวแทนของกลุ่ม ดังนั้นจำนวนของ Output จะจำกัดเท่ากับจำนวนของกลุ่มที่ถูกจัดขึ้นมา

5.2.2 ฟังก์ชันการเปลี่ยน (Transfer function)

ฟังก์ชันการเปลี่ยน (Transfer Function) คือกฎในการคำนวณค่าข้อมูลนำเข้าของหน่วยประมวลผล เพื่อส่งไปยังหน่วยประมวลผลถัดไป การเลือกฟังก์ชันการเปลี่ยนพิจารณาตามความเหมาะสมกับปัญหา ฟังก์ชันการเปลี่ยนของโครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้กันได้แก่ ฟังก์ชันแบบลอจิสติกมอย (Log-Sigmoid Transfer Function , Log-Sig) ซึ่งเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องและมีค่าไม่ลดลง (monotonic and non-decreasing) โดยค่าจะเพิ่มจาก 0 ไปยัง 1 เมื่อค่า x เปลี่ยนจาก $-\infty$ ไปยัง $+\infty$ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันแบบลอจิสติกมอย จะเป็นตัวกำหนดระยะการเปลี่ยนของฟังก์ชัน ถ้ามีค่าน้อยระยะการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปยัง 1 จะมีช่วงกว้าง ในทางกลับกัน ถ้ามีค่ามาก ระยะการเปลี่ยนแปลงจาก 0 ไปยัง 1 จะมีช่วงแคบ ข้อดีของฟังก์ชันแบบลอจิสติกมอยคือ สามารถใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับและหาอนุพันธ์ได้ โดยฟังก์ชันการเปลี่ยนแบบลอจิสติกมอยนี้มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 6 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ออกมาเป็นสมการได้คือ

$$y = \frac{1}{1+e^{-x}}$$

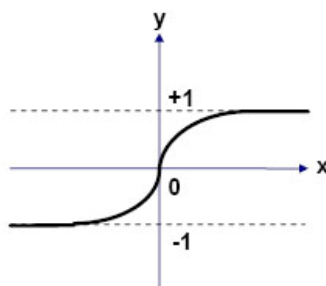


ภาพที่ 6 Log-Sigmoid Transfer Function (Log-Sig)

ที่มา: สมภพ (2546)

ฟังก์ชันแบบแทนซิกมอย (Tan-sigmoid Transfer Function, Tan-sig) ผลการคำนวณตัวแปรออกจะมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง +1 ดังภาพที่ 7 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ออกมาเป็นสมการได้คือ

$$y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

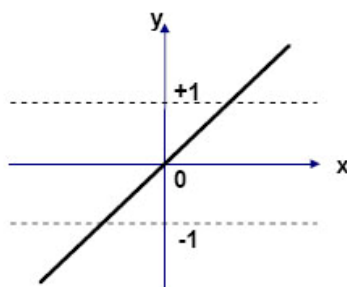


ภาพที่ 7 Tan-Sigmoid Transfer Function (Tan-Sig)

ที่มา: สมภพ (2546)

ฟังก์ชันแบบเส้นตรง (Linear Transfer Function, Purelin) เป็นทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามเป็นเส้นตรง ดังภาพที่ 8 ซึ่งค่าตัวแปรตามที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าของตัวแปรต้นหรือ

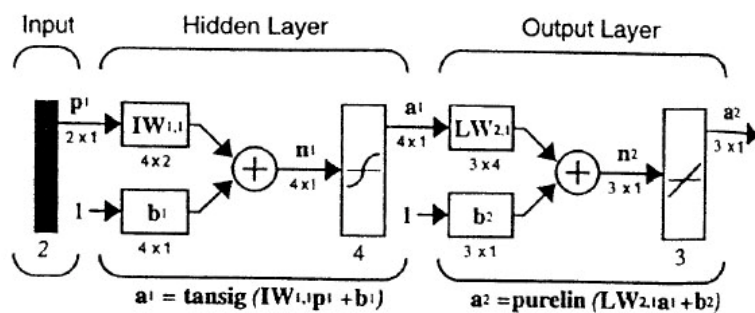
$$y = x$$



ภาพที่ 8 Linear Transfer Function (Purelin)

ที่มา: สมภพ (2546)

ถ้าในชั้นสุดท้ายของโครงข่ายประสาทเทียมใช้ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงลอจิสติกมอย ค่า output ที่ได้ออกมาจากระบบจะเป็นช่วงแคบๆ แต่ถ้าในชั้นสุดท้ายใช้ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงแบบ Linear ค่า output ที่ออกมาจะเป็นค่าใดก็ได้ ดังนั้นในการใช้งานจึงมักใช้ฟังก์ชันการเปลี่ยนซ้อนกัน 2 ตัว คือ ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงลอจิสติกมอย เพื่อให้ค่า output ที่ออกมาอยู่ในช่วงแคบๆ จากนั้นใช้ฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงแบบ Linear เพื่อทำให้ค่า output ที่ออกมาเป็นค่าใดก็ได้



ภาพที่ 9 ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยฟังก์ชันการเปลี่ยน

ที่มา: Demuth and Beale (2002)

5.2.3 กระบวนการฝึกฝน (Training Algorithm) (Kulkarni, 2001; Demuth and Beale, 2002; สุชาติพิทย์, 2550)

ระหว่างการฝึกฝนน้ำหนักและค่า Bias ของโครงข่ายจะถูกปรับเพื่อให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายสูงที่สุด รูปแบบการวัดค่าประสิทธิภาพของโครงข่ายที่ประมวลผลแบบย้อนกลับ คือ Mean Squared Error (MSE) ซึ่งคือ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวแปรออกจากโครงข่ายกับตัวแปรออกจริงๆ ยกกำลังสอง

ก. การฝึกฝนแบบ Batch Gradient Descent (Traingd) การฝึกฝนแบบนี้จะเป็นการฝึกฝนที่ค่าน้ำหนักและค่า Bias จะถูกปรับจากผลต่างของค่า Mean Squared Error

ข. การฝึกฝนแบบ Batch Gradient Descent with Momentum (Traingdm) เป็นรูปแบบการฝึกฝนที่พัฒนาให้มีความเร็วในการไปถึงจุดที่เหมาะสมเร็วกว่า การฝึกฝนแบบ Batch Gradient Descent (Traingd) โดยมีการใช้โมเมนตัมเข้ามาช่วย ซึ่งโมเมนตัมจะเข้ามาช่วยเพิ่มการเรียนรู้แบบย้อนกลับโดยการเปลี่ยนน้ำหนักให้เท่ากับผลรวมสัดส่วนระหว่างน้ำหนักสุดท้ายที่เปลี่ยนกับน้ำหนักที่ต้องการให้เปลี่ยน ขนาดการเปลี่ยนน้ำหนักขึ้นกับค่าโมเมนตัมที่ตั้งไว้ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

ค. การฝึกฝนแบบ Batch Gradient Descent with Adaptive Learning Rate (Traingda) ประสิทธิภาพของการคำนวณขึ้นกับอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ถ้าตั้งอัตราการเรียนรู้ไว้สูงการคำนวณจะแกว่งและไม่เสถียร แต่ถ้าตั้งอัตราการเรียนรู้ไว้ต่ำการคำนวณให้ถึงก็ใช้เวลาานกว่าจะถึงจุดที่เหมาะสม ดังนั้นจึงไม่สามารถบอกได้ว่าควรจะต้องตั้งอัตราการเรียนรู้ไว้ที่เท่าใด แต่ความจริงแล้วอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมควรจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างการฝึกฝน การเปลี่ยนแปลงอัตราการเรียนรู้ต้องพยายามรักษขนาดการเรียนรู้ที่เป็นไปได้เพื่อให้การเรียนรู้เสถียร การเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้จะต้องดูจากสภาพแวดล้อมทั่วไปด้วย ถ้าอัตราการเรียนรู้มากขึ้นแต่ผลการเรียนรู้ค่อนข้างคงที่ อัตราการเรียนรู้ก็จะถูกเพิ่มขึ้นไปอีก แต่ถ้าเพิ่มอัตราการเรียนรู้แล้วความคลาดเคลื่อนลดลง อัตราการเรียนรู้ก็จะถูกลดลงจนกระทั่งความคลาดเคลื่อนค่อนข้างคงที่

ง. การฝึกฝนแบบ Resilient Backpropagation (Trainrp) จุดประสงค์ของการฝึกฝนแบบ Resilient Backpropagation คือ เพื่อกำจัดผลของการลดอนุพันธ์ ซึ่งสัญลักษณ์ของอนุพันธ์จะบอกทิศทางการปรับน้ำหนัก แต่ขนาดของอนุพันธ์ไม่มีผลต่อการปรับขนาดน้ำหนัก

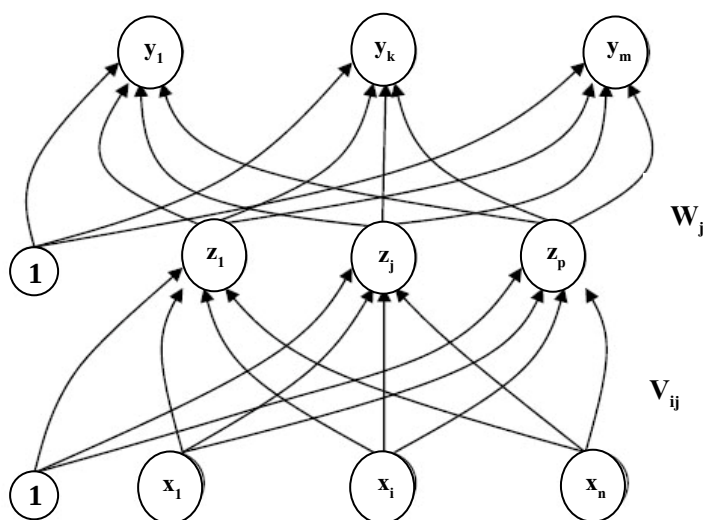
จ. การฝึกฝนแบบ Conjugate Gradient Descent Backpropagation การฝึกฝนแบบนี้จะต่างจากการคำนวณทั่วไป เนื่องจากการคำนวณทั่วไปจะมุ่งถึงอัตราการเรียนรู้เท่านั้น แต่การฝึกฝนแบบ Conjugate Gradient Descent Backpropagation จะมุ่งถึงขนาดในการขยับแต่ละครั้ง ซึ่งมีรูปแบบการหาขนาดในการขยับมีหลายแบบ เช่น Fletcher-Reeves Update (Traincgf), Polak-Ribiere Update (Traincgp), Powell-Beale Restarts (Traincgb) และ Scaled Conjugate Gradient (Trainscg)

ฉ. การฝึกฝนแบบ Quasi-Newton การคำนวณของ Newton เป็นรูปแบบที่แตกต่างออกมาจากแบบ Conjugate Gradient Descent เพื่อให้มีความเร็วที่สูงขึ้น แต่การคำนวณจะยากและซับซ้อนขึ้น รูปแบบการคำนวณ เช่น BFGS Algorithm (Trainbfgf) และ One Step Descent Algorithm (Trainoss)

ช. การฝึกฝนแบบ Levenberg-Marquardt (Trainlm) จากวิธีการของ Newton ที่เป็นวิธีที่ดีเนื่องจากเป็นวิธีการคำนวณที่จะทำให้โครงข่ายถึงจุดที่เหมาะสมได้เร็วขึ้น แต่ก็มีข้อเสียคือใช้วิธีการคำนวณที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีใหม่ต่อจากวิธีของ Newton วิธีใหม่นั้นคือการคำนวณแบบ Levenberg-Marquardt

5.2.4 โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับได้ (Backpropagation neural network) (อัมรินทร์, 2548)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับได้ เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ที่มีการส่งข้อมูลไปข้างหน้าแบบสมบูรณ์ ดังภาพที่ 10 การเรียนรู้เป็นแบบมีผู้สอน กลไกการเรียนรู้จะเป็นแบบส่งข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ (backpropagation of error) เพื่อฝึกให้เครือข่ายตอบสนองได้อย่างถูกต้อง เครือข่ายแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับ ถือเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด และเป็นตัวประมาณค่าแบบสากลในทางทฤษฎี (theoretic universal approximator) ซึ่งสามารถใช้จำลองความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนได้มีความแม่นยำถึงระดับใดๆ ที่ต้องการได้



ภาพที่ 10 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายกลับได้
ที่มา: Fausett (1994)

การฝึกเครือข่ายแบบส่งถ่ายข้อมูลย้อนกลับให้เรียนรู้ความสัมพันธ์ใด จะใช้พื้นฐานของการลดผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (total square error) ระหว่างผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากเครือข่ายประสาทเทียมกับผลลัพธ์ที่ต้องการ นิยมใช้กับเครือข่ายประสาทเทียมแบบป้อนสู่ด้านหน้า กลไกการเรียนรู้โดยวิธีส่งถ่ายข้อมูลความคลาดเคลื่อนย้อนกลับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ การป้อนข้อมูลชุดที่ใช้ฝึกไปข้างหน้า การถ่ายทอดแบบย้อนกลับของข้อมูลความคลาดเคลื่อนและการปรับแต่งค่าน้ำหนักพร้อมกันทั้งเครือข่าย

ในระหว่างการป้อนข้อมูลไปข้างหน้า แต่ละหน่วยของข้อมูลป้อนเข้า (x_i) ได้รับข้อมูลป้อนเข้า และส่งข้อมูลเหล่านี้ที่ผ่านการถ่วงน้ำหนัก (V_{ij}) ไปยังหน่วยซ่อน (z_j) แต่ละหน่วยซ่อนจะรวบรวมข้อมูลปรับน้ำหนักแบบเชิงเส้นแล้วผ่านฟังก์ชันกระตุ้นแบบตัวเอส เพื่อคำนวณค่าการกระตุ้น และส่งค่ากระตุ้นที่ผ่านการถ่วงน้ำหนัก (W_{jk}) ไปยังหน่วยข้อมูลส่งออก (y_k) ซึ่งจะรวบรวมข้อมูลนี้แล้วผ่านฟังก์ชันกระตุ้นแบบตัวเอส เพื่อคำนวณค่าการกระตุ้น เป็นผลตอบสนองหรือผลลัพธ์ของเครือข่ายสำหรับรูปแบบข้อมูลที่ให้มา ระหว่างการเรียนรู้หรือการฝึกสอน หน่วยข้อมูลส่งออกแต่ละหน่วยจะเปรียบเทียบค่าการกระตุ้นที่คำนวณได้ (y_k) กับค่าเป้าหมาย (t_k) เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนที่ใช้ในการคำนวณข้อมูลความคลาดเคลื่อน δ_k ใช้สำหรับกระจายความคลาดเคลื่อน ที่หน่วยข้อมูลส่งออก (y_k) กลับไปยังหน่วยซ่อน (z_j) และใช้สำหรับปรับค่าน้ำหนัก ระหว่างชั้นข้อมูลส่งออกกับชั้นซ่อน (W_{jk}) ในทำนองเดียวกันก็จะมีค่าการคำนวณข้อมูลความคลาดเคลื่อน δ_j เพื่อกระจายความคลาดเคลื่อนที่หน่วยซ่อน (z_j) กลับไปยังหน่วย

ทั้งหมดของชั้นข้อมูลรับเข้า (x_i) และใช้สำหรับปรับค่าน้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนกับชั้นข้อมูลรับเข้า (V_{ij}) ขั้นตอนการเรียนรู้ทั้ง 3 ขั้นตอนนี้ จะดำเนินการซ้ำไปซ้ำมาหลายรอบการฝึก จนกระทั่งได้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำตามที่ต้องการหรือเมื่อค่าน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง หรือถึงจำนวนรอบการฝึกที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

5.2.5 ข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียม

ก. ด้วยความสามารถในการตีความข้อมูลที่ซับซ้อนและคลุมเครือของโครงข่ายประสาทเทียมสามารถนำมาใช้ในการถอดรูปแบบของข้อมูล และทราบถึงแนวโน้มของข้อมูลที่ซับซ้อน ที่ไม่สามารถรู้ได้โดยมนุษย์ และเทคนิคทางคอมพิวเตอร์แบบอื่นๆ

ข. เมื่อข้อมูลบางส่วนของ โครงข่ายประสาทเทียมเกิดความผิดพลาดหรือบิดเบือน โครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะดำเนินการวิเคราะห์ต่อไปได้โดยไม่มีปัญหาใดๆ โดยการใช้ข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกันในการวิเคราะห์ต่อไป

ค. ไม่ต้องพิสูจน์ข้อสมมติพื้นฐานทางสถิติก่อนนำไปใช้งาน

ง. โครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะทำงานในหน้าที่ที่สูงกว่าที่มนุษย์จะทำได้ เช่น การตัดสินใจ การวางแผน การจัดตารางเวลา การจดจำรูปแบบต่างๆ การวินิจฉัยโรค การจัดแบ่งประเภทในการแก้ปัญหา และการออกแบบ

จ. ไม่ต้องพิสูจน์ข้อสมมติพื้นฐานทางสถิติก่อนนำไปใช้งาน

5.2.6 ข้อเสียของโครงข่ายประสาทเทียม

ก. ความสามารถในการทำงานของแบบจำลองขึ้นกับข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ข. ธรรมชาติของ Black box model ถึงแม้ว่าโครงข่ายประสาทเทียมจะสามารถทำการทำนายได้แม่นยำ แต่ก็ไม่มีหลักฐานว่าตัวแปรอิสระ (predictive variable, independent variable, X) มีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรตามอย่างไร (dependent variable, Y)

ค. การสร้างและทดสอบทำได้ยาก เพราะมีทางเลือกมากและไม่มีแนวทางที่เป็นมาตรฐานในการสร้างแบบจำลอง

6. การตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง (model performance)

ในการสร้างแบบจำลองนั้นก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้งานจริงจะต้องมีการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองก่อน ซึ่งในการตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองสามารถตรวจสอบได้หลายแบบโดยพิจารณาจากค่าบ่งชี้ต่าง ๆ เช่น ค่า sum squared error (SSE) ค่า mean squared error (MSE) ค่า relative error ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, r) และการหาความแตกต่าง (difference test) ระหว่างค่าจริง (actual value) กับค่าทำนาย (predicted value) (นันทวัน, 2548) ซึ่งตัวตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Mean Squared Error, MSE) และค่าสหสัมพันธ์ที่เลือกใช้คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)

ในการหาความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error, MSE) นั้นสามารถทำได้โดยการนำผลต่างระหว่างค่าจริงและค่าจากการทำนาย มาทำการยกกำลังสอง จากนั้นทำการหารเพื่อหาค่าเฉลี่ยมีกระบวนการดังนี้

หาค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละจุดข้อมูลจาก

$$e_i = Y - \hat{Y}$$

โดยที่ Y = ค่าจริง $\hat{Y}$ = ค่าจากการทำนาย

$$\text{Mean Square Error} = \text{MSE} = \left[\frac{\sum e_i^2}{n} \right] = \left[\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n} \right]$$

โดยที่ Y = ค่าจริง

$\hat{Y}$ = ค่าจากการทำนาย

n = จำนวนข้อมูลที่ทดสอบ

สหสัมพันธ์ (Correlation) คือ ระดับความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปร โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นเครื่องวัดระดับความสัมพันธ์ว่ามีมากน้อยเพียงใดและมีทิศทางเป็นอย่างไร การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เป็นการศึกษาสมบัติร่วมกันของตัวแปรทั้งสองโดยไม่คำนึงว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรตามหรือเป็นตัวแปรอิสระ สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ทำได้โดยการสร้างกราฟระหว่างตัวแปรทั้งสอง ค่าการกระจายของจุดที่สร้างเป็นตัวบอกว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างไร ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 และสามารถบอกขนาดและทิศทางของสหสัมพันธ์ได้ดังนี้ ถ้า r มีค่าเป็น +1 หมายถึง ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์และมีทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ถ้าตัวแปรหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น อีกตัวแปรก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ถ้า r มีค่าเป็น -1 หมายถึง ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์แต่มีทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ถ้าตัวแปรหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น อีกตัวแปรหนึ่งก็จะมีค่าลดลง ถ้า r มีค่าเท่ากับ 0 หรือใกล้เคียง 0 แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองไม่มีสหสัมพันธ์หรือมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะเป็นตัวบอกให้ทราบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือ ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ถ้ามีความสัมพันธ์กันจะมีขนาดใด และความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นไปในทิศทางใด (ทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม) สูตรหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)}{\sqrt{\left[n \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[n \left(\sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}}$$

โดยที่ X_i = ค่าของตัวแปร X ลำดับที่ i

Y_i = ค่าของตัวแปร Y ลำดับที่ i

n = จำนวนชุดข้อมูล

สัมประสิทธิ์การกำหนด (r^2) เป็นค่าที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระ โดยที่ r^2 จะเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระมากน้อยเพียงใด แต่ไม่ได้บอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง เนื่องจาก $0 \leq r^2 \leq 1$ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้ค่า

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ วัดความสัมพันธ์ของตัวแปร เนื่องจาก ค่า r จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ($-1 \leq r \leq 1$) ซึ่งสามารถบอกทิศทางความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ด้วย (พิศมัย, 2550) ค่า r^2 สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความแปรปรวน Y ที่เนื่องมาจากตัวแปร X ดังสูตร

$$r^2 = \frac{\left[n \left(\sum_{i=1}^n X_i Y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) \right]^2}{\left[n \left(\sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[n \left(\sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}$$

โดยที่ X_i = ค่าของตัวแปร X ลำดับที่ i

Y_i = ค่าของตัวแปร Y ลำดับที่ i

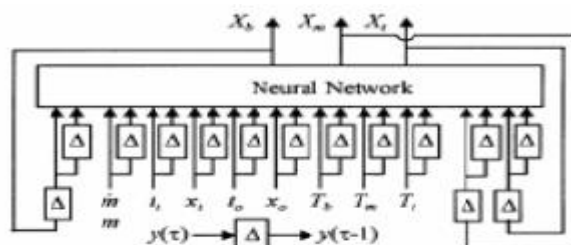
n = จำนวนชุดข้อมูล

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Farkas *et al.* (2000) กล่าวถึง การใช้ ANN เข้ามาช่วยในการทำแห้งแบบ Fixed-bed dryer โดยทำการศึกษา ANN ที่แตกต่างกัน และเลือก ANN ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดมาใช้ จุดประสงค์ของการศึกษาคือ เพื่อให้ ANN กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้น (Moisture Distribution) ของข้าวบาร์เลย์กับปัจจัยด้านกายภาพ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิในการทำแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ และอัตราการไหลของอากาศ ขณะที่ข้อมูลที่ได้จะถูกสร้างขึ้นโดย O'Callaghan's model ซึ่งข้อมูลที่น่าเข้าไปมีพื้นฐานมาจากการทำแห้งข้าวบาร์เลย์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การกระจายความชื้น (Moisture Distribution) บน drying bed สามารถที่จะสร้างเป็นแบบจำลองได้โดยการใช้ ANN ดังภาพที่ 11

Farkas *et al.* (2000) ได้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความชื้น (Moisture Distribution) ของข้าวบาร์เลย์กับปัจจัยทางกายภาพ (Physical parameters) คือ อุณหภูมิของอากาศที่นำมาทำให้แห้ง (Drying air temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Humidity) และอัตราการไหลของอากาศ (Air flow rate) ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองได้จาก Physically-based simulation แทนการวัดค่าจริง ในการศึกษาครั้งนี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของ Sampling time, Randomised training, วิธีการฝึกฝนที่แตกต่างกัน (Different back-propagation training algorithms) และจำนวน Hidden neurons จาก

การทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกระจายความชื้นบน Drying bed สามารถที่จะทำนายได้ด้วยการใช้ ANN



โดยที่

m = จำนวนของข้อมูลในการฝึกฝน (number of training data pairs)

$\dot{m}$ = อัตราการไหลของอากาศ (air flow rate) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

t = อุณหภูมิของอากาศ (air temperature) ($^{\circ}\text{C}$)

T = อุณหภูมิของวัตถุ (material temperature) ($^{\circ}\text{C}$)

x = ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (air humidity) (kg kg^{-1})

X = ความชื้นของวัตถุ (material moisture content) (kg kg^{-1})

τ = เวลา (time) (s)

b = ตัวแปรของอากาศและวัตถุในชั้นล่างสุด (air and material parameter in the bottom layer)

t = ตัวแปรของอากาศและวัตถุในชั้นบนสุด (air and material parameter in the top layer)

m = ตัวแปรของอากาศและวัตถุในชั้นกลาง (air and material parameter in the middle layer)

i = ตัวแปรของอากาศที่เข้ามาในตู้อบ (air parameters, inlet to dryer)

o = ตัวแปรของอากาศที่ออกจากตู้อบ (air parameters, outlet from dryer)

ภาพที่ 11 โครงสร้าง Neural Network ที่ได้จากการพัฒนา

ที่มา: Farkas *et al.* (2000)

Chen *et al.* (2001) อธิบายถึงแบบจำลองของการทำแห้งวัตถุดิบที่เป็นแผ่นบางโดยการ
ใช้วิธีการทางวิศวกรรมศาสตร์ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\frac{\Delta E_v}{\Delta E_{v,\infty}} = f(X - X_\infty)$$

โดยที่ ΔE_v = พลังงานกระตุ้นที่เพิ่มขึ้น (additional activation energy)

$\Delta E_{v,\infty}$ = value determined at the equilibrium condition

f = relative drying rate or a function of water content

X = water content on dry basis

X_∞ = the bulk water content on dry basis

พลังงานกระตุ้นได้ถูกสร้างขึ้นและมีความสัมพันธ์กับน้ำในผลิตภัณฑ์และ sorption isotherm ที่สมดุล แบบจำลองที่ได้แสดงถึงอัตราการแห้งที่มีผลต่อคุณลักษณะภายในของวัตถุดิบ

Maskan *et al.* (2002) ศึกษาถึงการแห้งด้วยวิธีใช้ลมร้อนและการตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ของผลิตภัณฑ์องุ่นแผ่น (Grape leather หรือ Pestil) พบว่าเวลาในการแห้ง ความหนาของตัวอย่าง และอุณหภูมิ มีผลต่อปริมาณความชื้นใน Grape leather (Pestil) ระหว่างการแห้ง ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถใช้ได้กับ Fick's model ที่เป็นแบบจำลองเกี่ยวกับการแพร่ของน้ำ และผลการทดลองให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficients) ที่ยอมรับได้

$$\text{Fick's model : } MR = \frac{(X - X_e)}{(X_o - X_e)} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left(\frac{-\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2} \right)$$

โดยที่ MR = อัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) (dimensionless)

X = ปริมาณความชื้นที่เวลาใดๆ (moisture content at any time)
(kg water / kg DS)

X_o = ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (initial moisture content) (kg water / kg DS)

X_e = ปริมาณความชื้นที่สมดุล (equilibrium moisture content) (kg water/kg DS)

D_{eff} = effective moisture diffusivity (m^2 / s)

L = ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (film / slap thickness) (m)

t = เวลา (time) (min)

Hernández-Pérez *et al.* (2004) ได้ทำการทดลองโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ two separate feed forward networks ที่มี hidden layer 1 ชั้น เพื่อทำนายการส่งผ่านมวลและความร้อนขณะการทำแห้งของมันสำปะหลังและมะม่วง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ประสบความสำเร็จในการทำนายจลศาสตร์การทำแห้ง (drying kinetics) ของการทดลอง โดยผลลัพธ์ (output) ของการทดลองคือ อุณหภูมิและปริมาณความชื้นของมันสำปะหลังและมะม่วง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการผลิตข้าวเกรียบ

1.1 วัตถุดิบในการผลิตข้าวเกรียบ

- 1.1.1 แป้งมันสำปะหลัง
- 1.1.2 แป้งข้าวเจ้า
- 1.1.3 แป้งสาลีเอนกประสงค์
- 1.1.4 กุ้งแห้ง
- 1.1.5 กระเทียม
- 1.1.6 กะเพรา
- 1.1.7 พริกไทย
- 1.1.8 เกลือ
- 1.1.9 รากผักชี

1.2 วัสดุและอุปกรณ์

1.2.1 เครื่องผสม (Blender)

1.2.2 ตู้อบแห้งไฟฟ้า ขนาด 48x45x50 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยถาดสำหรับอบแห้งจำนวน 5 ถาด สามารถปรับอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 35-200 องศาเซลเซียส มี Thermo stat ทำงานติดต่ออยู่ตลอดเวลาที่ตู้อบเปิดใช้งาน เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ผลิตโดย ห้างหุ้นส่วนจำกัด เจ เอส กรุงเทพฯ เทรดดิ้ง

1.2.3 ตู้แช่เย็น

1.2.4 เครื่องหั่น ปีห่อ WASINO

1.2.5 อุปกรณ์เครื่องครัว

2. อุปกรณ์ในการวัดค่าทางเคมีและกายภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูป

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าคุณภาพทางเคมี

2.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

- ตู้อบไฟฟ้าชนิดควบคุมอุณหภูมิได้ ยี่ห้อ Binder FD-115
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- กระจกอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด
- เครื่องชั่งไฟฟ้า (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าคุณภาพทางกายภาพ

2.2.1 ค่าสี

- เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d

2.2.2 ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล (Hardness)

- เครื่อง Lloyd TA500

2.2.3 ค่า water activity (a_w)

- เครื่อง water activity (Novasina รุ่น MLK)

3. อุปกรณ์ในการบันทึกข้อมูลและประมวลผลข้อมูล

3.1 สมุดจดบันทึก

3.2 เครื่องเขียนต่างๆ

3.3 เครื่อง Data Logger โมเดล ML27

3.4 เครื่องคอมพิวเตอร์ประมวลผลข้อมูล

3.5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 โปรแกรม Matlab version 6.5.0

3.5.2 โปรแกรม Labview version 7

3.5.3 โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล (Microsoft Excel)

3.5.4 โปรแกรมวิเคราะห์ผลสำเร็จรูป SPSS version 10.0

3.5.5 โปรแกรม Photoshop CS2

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างข้าวเกรียบ

ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้มาจากการสร้างแนวความคิดผลิตภัณฑ์ (Idea generation) ด้วยวิธี Brain Storming แนวความคิดผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากรีการนี้ มีทั้งหมด 9 แนวความคิด ได้แก่

- ข้าวเกรียบรสสาหร่าย
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสต้มยำกุ้ง
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสกุ้งน้ำพริกเผา
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสโสม
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสสังกะสี
- ข้าวเกรียบรสกะเพรา
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสปูอัด
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสหอยลายผัดฉ่า
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสแกงส้ม

คัดเลือกแนวความคิดผลิตภัณฑ์ทั้งหมดด้วยวิธี Pass/Fail Screening โดยมีข้อกำหนด คือ วัตถุดิบและส่วนผสมต้องมาจากธรรมชาติ วัตถุดิบและส่วนผสมต้องสามารถหาได้ง่าย มีทุกฤดูกาล และผลิตภัณฑ์เป็นที่ยอมรับของลูกค้า หรือผู้ทดสอบ โดยแนวความคิดผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกด้วยวิธี Pass/Fail Screening ได้แก่

- ข้าวเกรียบกลิ่นรสต้มยำกุ้ง
- ข้าวเกรียบกลิ่นรสกุ้งน้ำพริกเผา
- ข้าวเกรียบรสกะเพรา

จากนั้นทำการประเมินแนวความคิดผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการคัดเลือกจากวิธี Pass/Fail Screening โดยการให้คะแนน (Scoring Screening) โดยกำหนดเกณฑ์การให้คะแนน ดังนี้

- ความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิต = 10 คะแนน
- ความท้าทาย และความใหม่ของผลิตภัณฑ์ = 7.5 คะแนน
- การยอมรับทางการตลาด = 5 คะแนน

แนวความคิดผลิตภัณฑ์ที่ได้รับคะแนนสูงที่สุดและสามารถทำการผลิตได้จริง คือ ข้าวเกรียบรสกะเพรา จากนั้นทำการพัฒนาสูตรข้าวเกรียบรสกะเพรา โดยสูตรข้าวเกรียบพื้นฐานดังตารางที่ 3 ศึกษาปริมาณใบกะเพรา 3 ระดับ คือ 8% 10% และ 12% ทำการคัดเลือกผู้ทดสอบที่มีประสบการณ์และชอบรับประทานข้าวเกรียบเป็นเกณฑ์พิจารณาจำนวน 50 คน ซึ่งทำการประเมินความชอบโดยรวม (Overall Liking) โดยทำการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-point Hedonic scale) ในคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรสกะเพรา และความกรอบ จากนั้นทำการคัดเลือกตัวอย่างที่ได้รับคะแนนความชอบสูงสุด เพื่อกำหนดเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบข้าวเกรียบรสกะเพราที่มีปริมาณใบกะเพรา 10% สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คะแนนความชอบของข้าวเกรียบรสกะเพราที่มีปริมาณใบกะเพรา 8% 10% และ 12%

ปริมาณใบ กะเพรา	ลักษณะ ปรากฏ	สี	กลิ่นรส กะเพรา	ความกรอบ	ความชอบ รวม
8%	7.00 ^b	5.96 ^b	7.22 ^b	7.52 ^a	6.48 ^b
10%	7.10 ^a	6.96 ^a	7.92 ^a	7.48 ^a	7.16 ^a
12%	4.00 ^c	3.96 ^c	4.68 ^c	5.00 ^b	4.84 ^c

หมายเหตุ ^{a-c} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันที่มีตัวอักษรแตกต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ต้นแบบสำหรับงานวิจัยนี้ คือ ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบรสกะเพรา ที่มีปริมาณใบกะเพราผสมอยู่ 10% โดยมีสูตรข้าวเกรียบที่ได้รับการพัฒนาแล้วดังตารางที่ 7 นำข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปที่ได้จากการพัฒนาไปวัดคุณลักษณะต่างๆ ทางเคมีและทางกายภาพได้เป็นข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ดังตารางที่ 8

เตรียมตัวอย่างข้าวเกรียบสำหรับงานวิจัยดังสูตรที่ได้รับการพัฒนาแล้วในตารางที่ 7 จากนั้นทำการผสมส่วนทั้งหมดดังภาพที่ 3 จนถึงขั้นตอนของการหั่นเป็นแผ่นบางๆ โดยกำหนดความหนาของแผ่นข้าวเกรียบทุกชิ้นในขั้นตอนของการหั่นด้วยเครื่องหั่นยี่ห้อ WASINO ให้มีความหนาประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูป เท่ากับ 3 เซนติเมตร

ตารางที่ 7 ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบรสกะเพราที่ได้รับการพัฒนา

ส่วนผสม	เปอร์เซ็นต์
แป้งมันสำปะหลัง	42.42
แป้งข้าวเจ้า	6.06
กุ้งแห้ง	7.27
กระเทียม	1.82
พริกไทย	0.91
รากผักชี	0.91
แป้งสาลี	0.61
เกลือ	0.61
กะเพรา	6.06
น้ำ	33.33

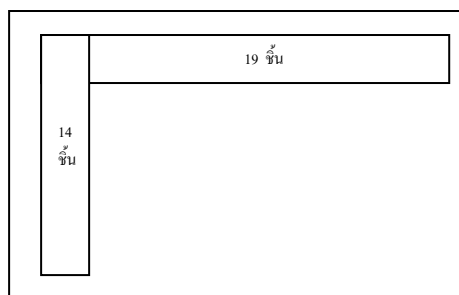
ตารางที่ 8 ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

คุณลักษณะ	
ปริมาณความชื้น (%)	8.35% – 12.00%
ค่า a_w	0.395 – 0.500
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล	
- ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) (N)	15.03 – 20.35
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) (mm.)	0.41 – 0.62
- พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) (kgf.mm.)	0.72 – 1.33
ค่าสี L^*	41.05-43.17
ค่าสี a^*	9.26-10.00
ค่าสี b^*	15.00-16.08

หมายเหตุ ข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบมาจากขั้นตอนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบรสกะเพรา ที่ผ่านการยอมรับจากผู้ทดสอบแล้ว

2. การเก็บข้อมูลคุณลักษณะของข้าวเกรียบกิ่งสำเร็จรูป

นำตัวอย่างข้าวเกรียบที่เตรียมได้จากข้อ 1 เข้าตู้อบลมร้อนที่เปิดเครื่องเอาไว้และตั้งอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ก่อน เพื่อทำการเก็บข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลออก (Output) ซึ่งได้แก่ ข้อมูลทางเคมีและทางกายภาพต่างๆ โดยวางตัวอย่างข้าวเกรียบลงบนถาดสำหรับอบแห้ง วางตามแนวกว้าง 14 ซัน และตามแนวลึก 19 ซัน รวมเป็นถาดละ 266 ซัน ดังภาพที่ 12 โดยในตู้อบลมร้อนที่ใช้ในการทดลองสามารถใส่ได้ทั้งหมด 5 ถาด ดังนั้นจะได้ตัวอย่างข้าวเกรียบทั้งหมด 1330 ซัน โดยวางแผนข้าวเกรียบไม่ให้ซ้อนกัน



ภาพที่ 12 รูปแบบแสดงการวางชั้นข้าวเกรียบบนถาดสำหรับอบแห้ง

จากนั้นอบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังนี้

1) อุณหภูมิ 7 ระดับ ได้แก่ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง เป็นการตั้งอุณหภูมิที่หน้าปัดเครื่องอบแห้งเริ่มต้น

2) เวลา 18 ระดับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 และ 180 นาที

ทำการเก็บข้อมูลระหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังต่อไปนี้

2.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในตู้อบขณะอบแห้ง

เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่อง Data Logger โมเดล ML27 สำหรับเก็บความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบทุกๆ 10 นาที

2.2 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

เก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Labview version 7 เก็บข้อมูลของอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งทุกๆ 10 นาที ผ่าน sensor สำหรับวัดอุณหภูมิ 2 ตัว โดย sensor ตัวที่ 1 จะติดอยู่บริเวณฝาเปิดของตู้อบด้านใน และ sensor ตัวที่ 2 จะติดอยู่บริเวณด้านข้างของตู้อบระหว่างชั้นที่ 3 และ

นำตัวอย่างข้าวเกรียบที่สุ่มเก็บจากตู้อบแห้งทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่ที่เวลา 0 นาที จนกระทั่งครบ 180 นาที เพื่อหาข้อมูลทางเคมีและกายภาพต่างๆ ดังนี้

2.3 ความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

วิเคราะห์ตามวิธีของ A.O.A.C. 2000 นำตัวอย่างที่สุ่มเก็บมาจากตู้อบแห้งมาปั่นในเครื่องผสม (Blender) นาน 1 นาที ชั่งตัวอย่างหนัก 2 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนในกระป๋องอลูมิเนียมพร้อมฝาปิดที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำไปอบที่ตู้อบไฟฟ้าชนิดควบคุมอุณหภูมิ ได้ยี่ห้อ Binder FD-115 ที่อุณหภูมิประมาณ 100 ± 5 องศาเซลเซียส นานประมาณ 4 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน ทำการอบซ้ำนานครั้งละ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนักจนกว่าน้ำหนักต่างกันไม่เกิน 2 มิลลิกรัม คำนวณเปอร์เซ็นต์ปริมาณความชื้นในตัวอย่างจากสูตรทำการทดลอง 3 ซ้ำ

$$\text{ร้อยละปริมาณความชื้น} = \frac{100 \times (W_1 - W_2)}{W_1 - W}$$

โดยที่ W = น้ำหนักกระป๋องอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (กรัม)

W_1 = น้ำหนักกระป๋องอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด และตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักกระป๋องอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด และตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

2.4 ค่า water activity (a_w)

นำตัวอย่างที่สุ่มเก็บมาจากตู้อบแห้งมาปั่นในเครื่องผสม (Blender) นาน 1 นาที นำตัวอย่างที่ได้มาวัดค่าด้วยเครื่องวัดค่า water activity ยี่ห้อ Novasina รุ่น MLK ทำการทดลอง 2 ซ้ำ

2.5 ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล

โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของ Lloyd รุ่น TA 500 โดยใช้หัวกดแบบหัวบอล (Ball probe) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และฐานรองรับรูปทรงกระบอกกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 20 มิลลิเมตร/นาที จนกระทั่งทำให้

ตัวอย่างแตก ทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ ทำการบันทึกค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง ต่อมิลลิเมตร (Kilograms Force per Millimetre, kgf.mm.)

2.6 ค่าสีในระบบ L^* a^* และ b^*

วัดค่าสีด้วยเครื่อง เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ Minolta รุ่น CM-3500d ค่าสีที่วัดได้แก่ ค่า L^* , a^* และ b^* โดยค่า L^* จะอธิบายความสว่างของผลิตภัณฑ์ ($L^* = 100$ คือสีขาว, $L^* = 0$ คือสีดำ) ส่วนค่า a^* ใช้กำหนดความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a^* เป็นบวก = สีแดง, a^* เป็นลบ = สีเขียว) และค่า b^* ใช้กำหนดความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^* เป็นบวก = สีเหลือง, b^* เป็นลบ = สีน้ำเงิน) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3. การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

3.1 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network หรือ ANN)

โดยข้อมูลนำเข้า (Input) ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในตู้อบขณะอบแห้ง และคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ส่วนข้อมูลออก (Output) ได้แก่ คุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป จากนั้นทำการแบ่งข้อมูลทั้งหมด 126 ข้อมูล ออกเป็น 3 ส่วน คือ 70%:15%:15% ด้วยการสุ่มเลือก เพื่อการฝึกฝน (Training) โครงข่ายประสาทเทียม ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) และส่วนสุดท้ายเพื่อการทดสอบแบบจำลองที่ได้ (Testing) ตามลำดับ

ข้อมูลสำหรับฝึกฝน (Training) โครงข่ายประสาทเทียม ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 88 ชุด (70%)

ข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 19 ชุด (15%)

ข้อมูลการทดสอบแบบจำลองที่ได้ (Testing) ข้อมูลทั้งหมดจำนวน 19 ชุด (15%)

เปรียบเทียบหน่วยซ่อน (Hidden Neuron) 5 ระดับ คือ 1, 5, 10, 15 และ 20 นิวรอน และจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) 2 ระดับ คือ 1 และ 2 ชั้น เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำนายคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้ง

โดยทำการกำหนดส่วนประกอบของโครงข่ายประสาทเทียมต่อไปนี้ให้คงที่

- ใช้ฟังก์ชันการฝึกฝน (Training function) แบบ TRAINLM (Levenberg-Marquardt backpropagation)

- ใช้ Adaptation learning function แบบ LEARNNGDM (Gradient decent w/momentum weight/bias learning function)

- ใช้ ฟังก์ชันการเปลี่ยน (Transfer function) ดังต่อไปนี้

ก. กรณีที่มีชั้นซ่อน (Hidden layer) 1 ชั้น ชั้นที่ 1 ใช้แบบ LOGSIG (Log-Sigmoid Transfer Function) และชั้นที่ 2 ใช้แบบ PURELIN (Linear Transfer Function)

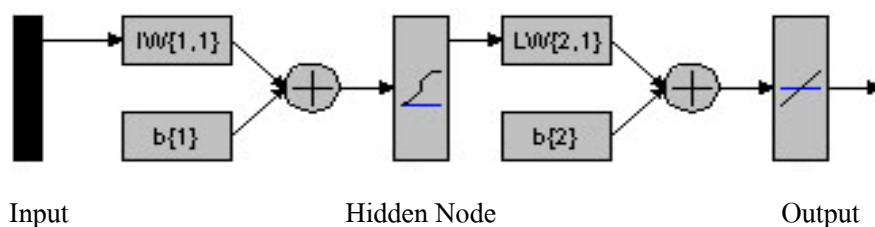
ข. กรณีที่มีชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ใช้แบบ LOGSIG (Log-Sigmoid Transfer Function) และชั้นที่ 3 เป็น ใช้แบบ PURELIN (Linear Transfer Function)

- ใช้ Performance function เป็นความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean Squared Error, MSE)

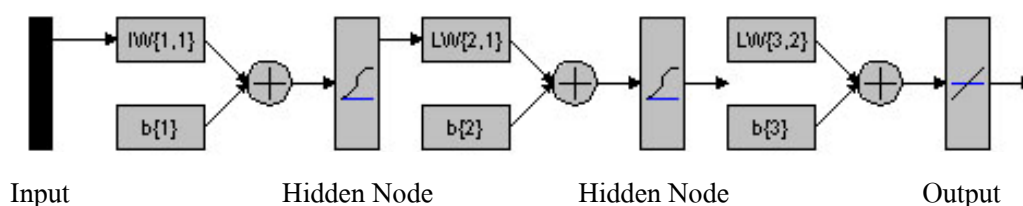
- กำหนดจำนวนรอบของการฝึกฝน (Epochs) ที่มากที่สุดในการฝึกฝน เท่ากับ 1000 รอบ

- กำหนด Stopping rule คือ เมื่อถึงจำนวนรอบสูงสุดในการฝึกฝน (Maximum number of epochs to train) คือ 1000 รอบ, เมื่อค่า Performance ลดลงถึง Goal ที่กำหนด คือ 0 และเมื่อค่า Performance ของขั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) ไม่สามารถที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นหรือ มีค่าคงที่ที่ค่า Maximum validation failures (max_fail) กำหนดไว้ คือ 5 รอบ

เมื่อข้อมูลออกที่ทำการศึกษาคือ คุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วย จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ระดับ คือ 1 และ 2 ชั้น แสดงได้ดังภาพที่ 13 และ 14



ภาพที่ 13 โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 1 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้ง



ภาพที่ 14 โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้ง

ทำการเลือกจำนวนหน่วยซ่อน (Hidden Neuron) และจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) ที่ทำให้แบบจำลองมีค่า MSE ต่ำที่สุด ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้น

จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) โดยค่า r จะเป็นตัวบอกให้ทราบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือ ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ถ้ามีความสัมพันธ์กันจะมีขนาดใด และความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นไปในทิศทางใด (ทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม) สำหรับความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) นั้นเป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างกำลังสองเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย ฉะนั้นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพควรมีค่า MSE ต่ำ และ r สูง

โดยจะแบ่งการสร้างแบบจำลองออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

3.1.1 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1

คุณลักษณะ

ศึกษาจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) 2 ระดับ คือ 1 และ 2 ชั้นและหน่วยซ่อน (Hidden Neuron) 5 ระดับ คือ 1, 5, 10, 15 และ 20 นิวรอนโดยใช้โปรแกรม MATLAB version 6.5.0 ทำการเลือกแบบจำลองมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด แต่มีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) จะได้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ ทั้งหมด 3 แบบจำลอง ดังนี้

ก. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

ข. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่า water activity (a_w) เป็นข้อมูลออก

ค. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลเป็นข้อมูลออก โดยข้อมูลออกของค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล ประกอบด้วย ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work)

จำนวนสิ่งทดลองทั้งหมด 10 สิ่งทดลอง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 9 โดยแต่ละสิ่งทดลองทำการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้องด้วยชุดข้อมูลที่ทำกรสุ่มมาแตกต่างกัน 3 ชุด (cross-validation) และในแต่ละ cross-validation ทำการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้องด้วยค่าน้ำหนักเริ่มต้น (Initial weight) ที่แตกต่างกัน 3 แบบ จากการใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่แตกต่างกัน เลือกแบบจำลองที่ให้ค่าของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) เพื่อเป็นตัวแทนสำหรับ cross-validation นั้น จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และค่าสหสัมพันธ์ (r) จากทั้ง 3 cross-validation เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสิ่งทดลอง เลือกสิ่งทดลองที่มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด และมีค่าเฉลี่ยสหสัมพันธ์สูง (r) โดยค่าเฉลี่ย MSE และค่าเฉลี่ย r ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาจากข้อมูลออกที่ผ่านการแปลงค่า (Normalize)

ตารางที่ 9 สิ่งทดลองสำหรับการศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ

สิ่งทดลอง	จำนวนชั้นซ่อน	จำนวนหน่วยซ่อน
1	1	1
2	1	5
3	1	10
4	1	15
5	1	20
6	2	1
7	2	5
8	2	10
9	2	15
10	2	20

โดยแต่ละแบบจำลองมีข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลออก (Output) ดังนี้

ก. ข้อมูลนำเข้า (Input)

- อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ที่เวลา t นาที
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity, RH) ในตู้อบขณะอบแห้ง ที่เวลา t นาที
- คุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป (ปริมาณความชื้น ค่า water activity (a_w) และค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล) ที่เวลา t นาที

โดยเริ่มต้นที่เวลา $t = 0, \dots, 170$ นาที

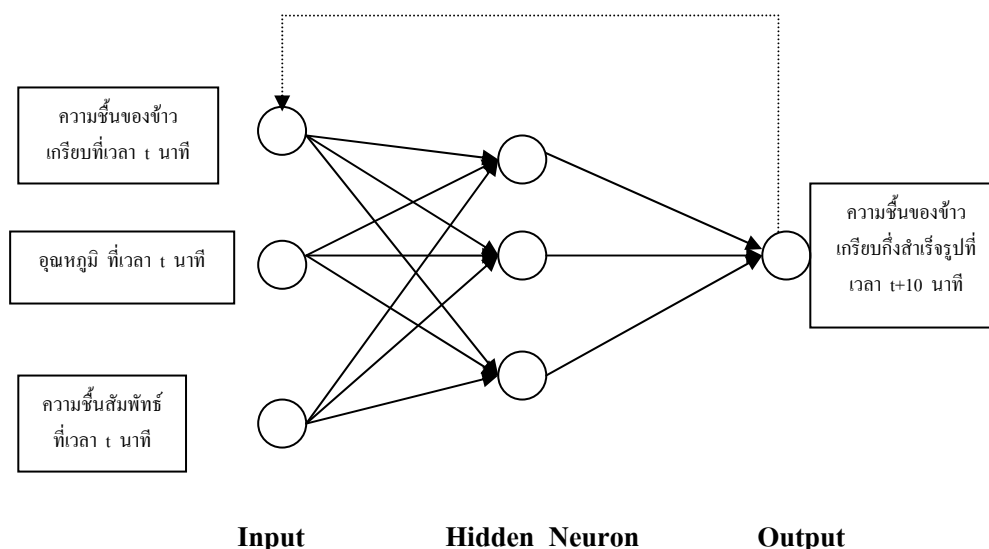
ดังนั้นชุดข้อมูลนำเข้าเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง ที่เก็บข้อมูลได้ทั้งหมดจะเท่ากับ $7 \times 18 = 126$ ข้อมูล และข้อมูลนำเข้าต้องผ่านการแปลงค่า (Normalize) ให้ข้อมูลมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากข้อมูลนำเข้าแต่ละตัวมีขนาดที่แตกต่างกัน แล้วจึงจะนำมาหาความสัมพันธ์และสร้างเป็นแบบจำลองได้

ข. ข้อมูลออก (Output)

คุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป (ปริมาณความชื้น ค่า water activity (a_w) และค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล) ที่เวลา $t+10$ นาที

ดังนั้นชุดข้อมูลออกเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง ที่เก็บข้อมูลได้ทั้งหมดจะเท่ากับ $7 \times 18 = 126$ ข้อมูล และข้อมูลออกต้องผ่านการ Normalize ให้ข้อมูลมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เช่นเดียวกันกับข้อมูลนำเข้า

โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ
ในกรณีที่ใช้ความชื้นของข้าวเก็บยบสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

3.1.2 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะ รวมทั้งหมด

ศึกษาจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) 2 ระดับ คือ 1 และ 2 ชั้น และหน่วยซ่อน (Hidden Neuron) 5 ระดับ คือ 1, 5, 10, 15 และ 20 นิวรอน โดยจำนวนหน่วยซ่อนของแบบจำลองที่มีจำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น กำหนดให้ ชั้นซ่อนที่ 1 และ 2 มีจำนวนหน่วยซ่อนเท่ากัน โดยใช้โปรแกรม MATLAB version 6.5.0 ทำการเลือกแบบจำลองมี MSE ค่าที่ต่ำที่สุด แต่มีค่าสหสัมพันธ์สูง (r)

จำนวนสิ่งทดลองทั้งหมด 10 สิ่งทดลอง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 10 โดยแต่ละสิ่งทดลองทำการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้องด้วยชุดข้อมูลที่ทำการศึกษาแตกต่างกัน 3 ชุด (cross-validation) และในแต่ละ cross-validation ทำการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้องด้วยค่าน้ำหนักเริ่มต้น (Initial weight) ที่แตกต่างกัน 3 แบบ จากการใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่แตกต่างกัน เลือกแบบจำลองที่ให้ค่าของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) เพื่อเป็นตัวแทนสำหรับ cross-validation นั้น จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และค่าเฉลี่ยสหสัมพันธ์ (r) จากทั้ง 3 cross-validation เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสิ่งทดลอง เลือกสิ่งทดลองที่มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE)

น้อยที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) โดยค่าเฉลี่ย MSE และค่าเฉลี่ย r ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาจากข้อมูลออกที่ผ่านการแปลงค่า (Normalize)

ตารางที่ 10 สิ่งทดลองสำหรับการศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด

สิ่งทดลอง	จำนวนชั้นซ่อน	จำนวนหน่วยซ่อน
1	1	1
2	1	5
3	1	10
4	1	15
5	1	20
6	2	1
7	2	5
8	2	10
9	2	15
10	2	20

โดยแบบจำลองมีข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลออก (Output) ดังนี้

ก. ข้อมูลนำเข้า (Input)

- อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ที่เวลา t นาที
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity, RH) ในตู้อบขณะอบแห้ง ที่เวลา t นาที
- ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบ ที่เวลา t นาที
- ค่า water activity (a_w) ที่เวลา t นาที
- ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) ที่เวลา t นาที
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) ที่เวลา t นาที
- พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) ที่เวลา t นาที

โดยเริ่มต้นที่เวลา $t = 0, \dots, 170$ นาที

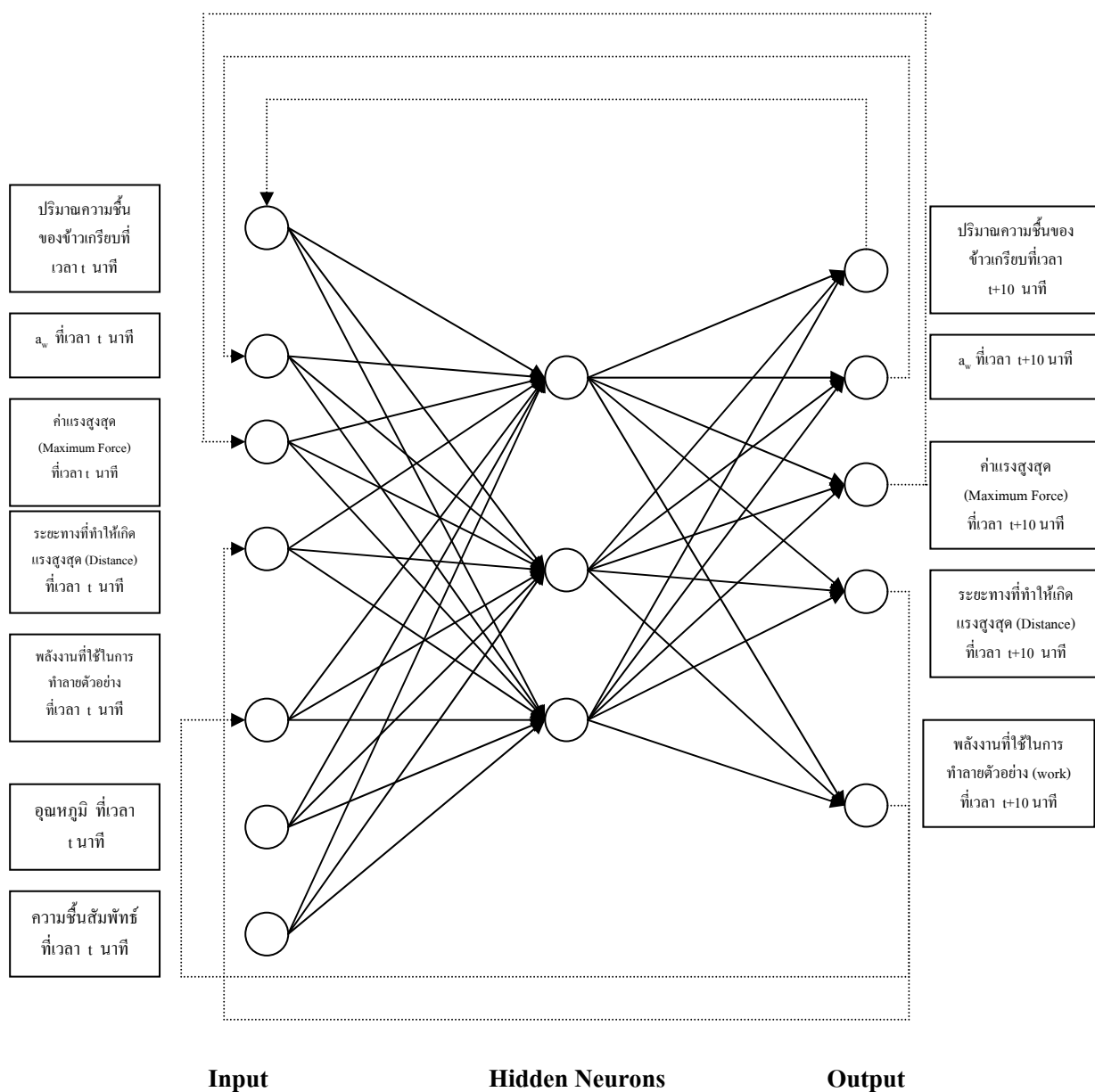
ดังนั้นชุดข้อมูลนำเข้าเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง ที่เก็บข้อมูลได้ทั้งหมดจะเท่ากับ $7 \times 18 = 126$ ข้อมูล และข้อมูลนำเข้าต้องผ่านการแปลงค่า (Normalize) ให้ข้อมูลมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากข้อมูลนำเข้า แต่ละตัวมีขนาดที่แตกต่างกัน แล้วจึงจะนำมาหาความสัมพันธ์และสร้างเป็นแบบจำลองได้

ข. ข้อมูลออก (Output)

- ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบ ที่เวลา $t+10$ นาที
- ค่า water activity (a_w) ที่เวลา $t+10$ นาที
- ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) ที่เวลา $t+10$ นาที
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) ที่เวลา $t+10$ นาที
- พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) ที่เวลา $t+10$ นาที

ดังนั้นชุดข้อมูลออกเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง ที่เก็บข้อมูลได้ทั้งหมดจะเท่ากับ $7 \times 18 = 126$ ข้อมูล และข้อมูลออกต้องผ่านการแปลงค่า (Normalize) ให้ข้อมูลมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เช่นเดียวกับข้อมูลนำเข้า

โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายจากคุณลักษณะรวมทั้งหมด สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด

3.1.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

เปรียบเทียบแบบจำลองที่พัฒนาได้ทั้งหมดจากข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 เพื่อหาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้ง โดยคัดเลือกแบบจำลองที่ให้ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ

แบบจำลองความถดถอย (Regression model) ต่อไปนี้ข้อ 4 โดยค่า MSE ทั้งหมด เป็นค่า MSE ของข้อมูลที่ได้แปลงกลับให้อยู่ในหน่วยตั้งต้น (Unnormalized) แล้ว

3.2 แบบจำลองความถดถอย (Regression model)

นำข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลออก (Output) มาวิเคราะห์ความถดถอยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for Window version 10.0 เพื่อหาแบบจำลองความถดถอย ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป โดยสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ แบบจำลองความถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression) ได้แก่ ความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) และแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ได้แก่ ความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบหุนกำลังสอง (Second-order polynomial regression) โดยข้อมูลนำเข้า (Input) ในที่นี้เป็นเวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิที่ตั้งค่าเอาไว้เริ่มต้นคงที่ที่หน้าปัทม์เครื่องอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) เริ่มต้นของอากาศภายในตู้อบแห้ง ไม่ใช่ข้อมูลแบบ online โดยข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสมการถดถอยจะมีจำนวน 107 ชุด (85%) จากข้อมูลทั้งหมด 126 ชุด ส่วนข้อมูลอีก 19 ชุด (15%) จะนำไปใช้ในการทดสอบแบบจำลอง โดยชุดข้อมูลที่ทำการศึกษาแตกต่างกัน 3 ชุด (cross-validation)

ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) โดยค่า r จะเป็นตัวบอกให้ทราบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือ ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ มีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ถ้ามีความสัมพันธ์กันจะมีขนาดใด และความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นไปในทิศทางใด (ทางเดียวกันหรือตรงกันข้าม) สำหรับความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) นั้นเป็นค่าที่ใช้วัดความแตกต่างกำลังสองเฉลี่ยระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนาย ฉะนั้นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพควรมีค่า MSE ต่ำ และ r สูง

4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) กับ แบบจำลองความถดถอย (Regression model)

นำข้อมูลส่วนสุดท้าย (15%) สำหรับการทดสอบแบบจำลอง (Testing) มาทดสอบแบบจำลอง เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) กับประสิทธิภาพของแบบจำลองความถดถอย ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้น จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองที่มีค่าสูง และความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ที่ต่ำที่สุด โดยค่า MSE ทั้งหมดจากโครงข่ายประสาทเทียม เป็นค่า MSE ของข้อมูลที่ได้แปลงกลับให้อยู่ในหน่วยดั้งเดิม(Unnormalized) แล้ว เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับแบบจำลองความถดถอยได้

5. การหาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบ

ในการแสดงวิธีการหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป จะใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในข้อ 4 มาทำนายค่าคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป เมื่อใช้เวลา และอุณหภูมิในการอบแห้งต่างๆ แต่จะกำหนดให้ความสัมพันธ์ เป็นปัจจัยที่แปรตามอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง โดยหาความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในรูปของฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง ด้วยการใช้แบบจำลองความถดถอยดังนี้ แบบจำลองความถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression) ได้แก่ ความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) และแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ได้แก่ ความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบหุนกำลังสอง (Second-order polynomial regression)

จากนั้นนำข้อมูลจากแบบจำลองมาทำการวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เพื่อศึกษาถึงเวลาในการอบแห้ง อุณหภูมิในการอบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบระหว่างการอบแห้ง ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป โดยมีข้อกำหนดตามผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ดังแสดงในตารางที่ 8 จากนั้นหาพื้นที่ที่ซ้อนทับกันด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 เพื่อหาเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งที่เหมาะสม ทำการทดสอบสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบที่ได้ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง โดยการผลิตข้าวเกรียบตามการทดลองข้อ 1 อบแห้งข้าวเกรียบตามสถานะที่เหมาะสมที่ได้จากการซ้อนทับกราฟพื้นที่ตอบสนอง เก็บข้อมูลทางเคมีและทางกายภาพของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

ที่อบที่อุณหภูมิในการอบแห้ง และเวลาในการอบแห้ง ดังกล่าวตามการทดลองข้อ 2 เพื่อ
เปรียบเทียบกับข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

ผลและวิจารณ์

1. ผลการเตรียมตัวอย่างข้าวเกรียบ

เมื่อผสมส่วนผสมทั้งหมดตามสูตร และทิ้งไว้ให้เย็น หั่นแท่งข้าวเกรียบเป็นแผ่นบางๆ ด้วยเครื่องหั่น จะได้ตัวอย่างข้าวเกรียบสำหรับการทดลองอบแห้ง เพื่อเก็บข้อมูลคุณลักษณะของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปต่อไป ดังภาพที่ 17



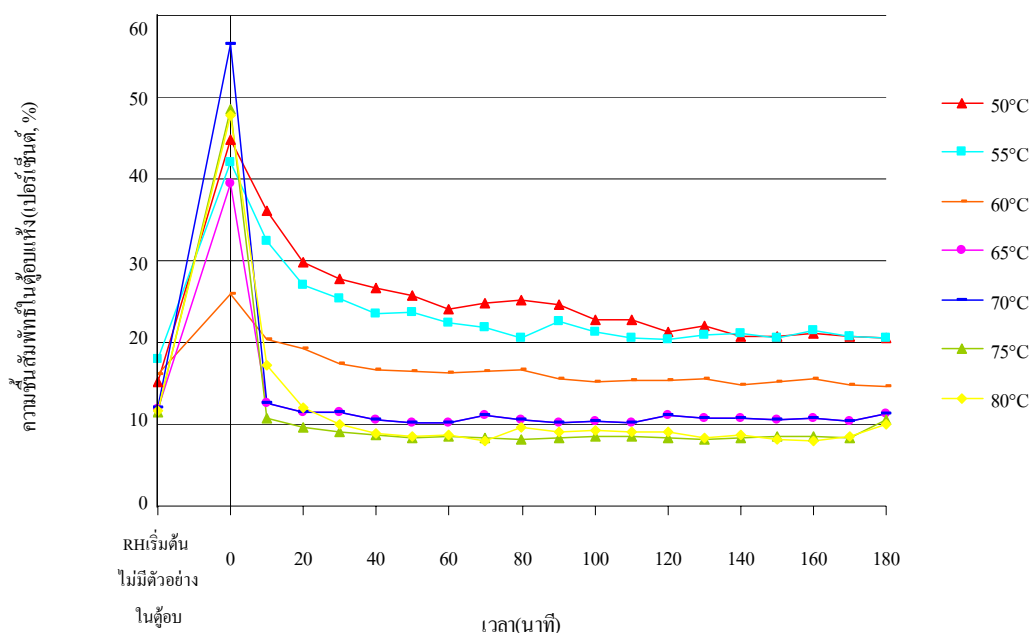
ภาพที่ 17 ตัวอย่างข้าวเกรียบสำหรับการทดลอง

2. ผลการเก็บข้อมูลคุณลักษณะของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูป

2.1 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในตู้อบขณะอบแห้ง

ก่อนเริ่มกระบวนการอบแห้ง (ไม่มีตัวอย่างอยู่ในตู้อบแห้ง) และเริ่มกระบวนการอบแห้งตั้งแต่วเวลา 0 ถึง 180 นาที เก็บข้อมูลของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบขณะอบแห้ง ด้วยเครื่อง Data Logger โมเดล ML27 เก็บความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบทุกๆ 10 นาที จากการทดลองพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ก่อนนำตัวอย่างข้าวเกรียบเข้าตู้อบจะมีค่าต่ำ เมื่อนำตัวอย่างข้าวเกรียบเข้าตู้อบความชื้นสัมพัทธ์จะสูงขึ้น เนื่องจากตัวอย่างข้าวเกรียบมีความชื้นสูง นอกจากนี้พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 75 และ 80 องศาเซลเซียส จะลดลงอย่างรวดเร็ว และลดลงมาถึงจุดที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการอบแห้งอื่นๆ โดยภาพรวมแล้ว มีการลดลงของความชื้นสัมพัทธ์ในทุกๆ อุณหภูมิ โดยช่วงแรกของการอบแห้งที่ในตู้อบมีข้าวเกรียบที่มีความชื้นสูงอยู่เต็มภายในตู้อบ

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ ปรับขึ้นลงเพียงเล็กน้อย แสดงดังภาพที่ 18

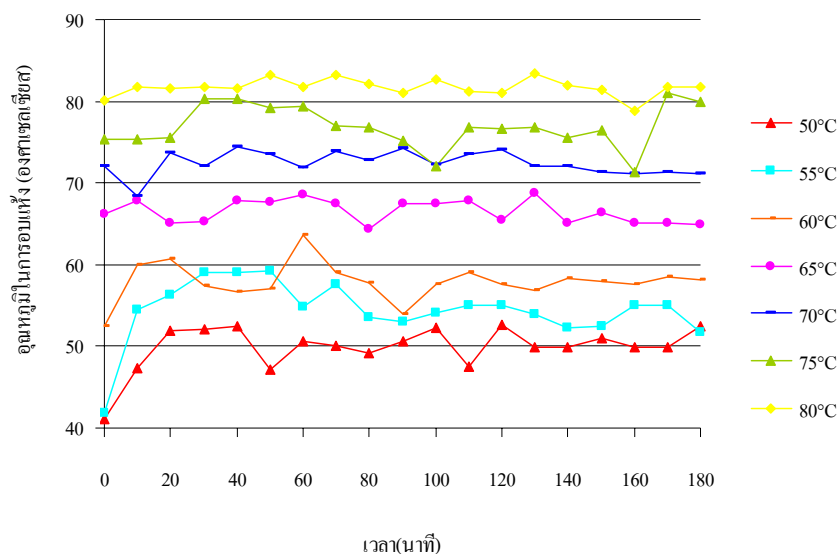


ภาพที่ 18 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในตู้อบขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

จากภาพที่ 18 แสดงถึงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบขณะอบแห้ง โดยเริ่มต้นจากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบที่ไม่มีตัวอย่างข้าวเกรียบในตู้อบ หลังจากนั้นเปิดตู้อบเพื่อนำตัวอย่างข้าวเกรียบใส่ในตู้อบเพื่อเริ่มการทดลอง โดยอบแห้งข้าวเกรียบตั้งแต่เวลาในการอบแห้ง 0 ถึง 180 นาที เปิดตู้อบเพื่อเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที

2.2 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

ระหว่างกระบวนการอบแห้ง เก็บข้อมูลของอุณหภูมิที่ใช้ระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยโปรแกรม Labview version 7 โดยเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่วเวลา 0 ถึง 180 นาที จากภาพที่ 19 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้ง ทุกอุณหภูมิมีการแกว่งขึ้นลงของอุณหภูมิไม่คงที่ และในช่วงเวลา 20 นาทีแรกอุณหภูมิในตู้อบจะต่ำกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้ที่หน้าปัดของตู้อบ เนื่องจากการเปิดตู้อบเพื่อนำตัวอย่างข้าวเกรียบเข้าไปอบในตู้อบ



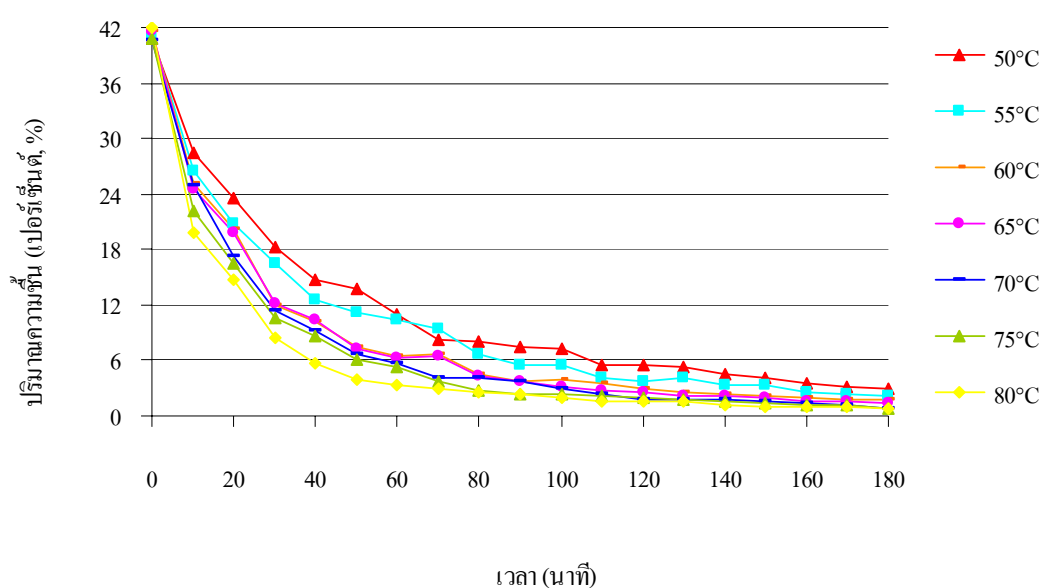
ภาพที่ 19 อุณหภูมิในตู้อบขณะอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส
ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

2.3 ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

จากการเตรียมตัวอย่างข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพ ตามสูตร และกรรมวิธีการผลิตขั้นพื้นฐาน เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้ง พบว่าเมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งที่แตกต่างกันนั้น ข้าวเกรียบจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยในระยะเริ่มต้นกระบวนการอบแห้ง เมื่อทดลองหักข้าวเกรียบจะมีลักษณะยืดหยุ่นไม่ขาดจากกัน เมื่ออบแห้งเป็นระยะเวลานานขึ้นข้าวเกรียบจะเริ่มแห้ง กรอบ จนกระทั่งเมื่ออบแห้งเป็นระยะเวลานานจะเกิดรอยแตกขึ้นภายในชิ้นข้าวเกรียบ

เสาวณีย์ (2550) กล่าวว่า ข้าวเกรียบเมื่อหักแล้วมีลักษณะเปราะหักได้ง่ายแล้วแสดงว่าแห้งได้ที่แล้ว และมีความชื้นอยู่ประมาณ 12% ถ้าลองหักดูแล้วชิ้นข้าวเกรียบเหนียวไม่ขาดออกจากกัน หรือขาดออกจากกันได้ยาก แสดงว่าข้าวเกรียบยังมีความชื้นสูงเกินไป ถ้าอบข้าวเกรียบนานเกินไป ข้าวเกรียบจะมีความชื้นต่ำมากเกินไปจนกระทั่งข้าวเกรียบแตก เมื่อนำไปทอดจะไม่พองตัวเท่าที่ควร ลักษณะของข้าวเกรียบจะไม่สวยงาม เนื่องจากรอยแตกนั้นทำให้ชิ้นข้าวเกรียบไม่เรียบ

จากการทดลอง เมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 0-180 นาที เก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาที ดังแสดงในภาพที่ 20 พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ในทุกๆ อุณหภูมิ และเมื่ออบข้าวเกรียบด้วยอุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มขึ้น จาก 50 จนถึง 80 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้งนานขึ้น ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจะลดลงเร็วขึ้นด้วยเช่นกัน โดยข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณความชื้นลดลงเร็วที่สุด



ภาพที่ 20 ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

เมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 20 ข้าวเกรียบที่อบแห้งที่เวลา 10-50 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 13.76%-28.51% จะมีลักษณะที่ยังชื้นอยู่ และเมื่อทดลองหักข้าวเกรียบจะยังยืดหยุ่นไม่ขาดจากกัน และเมื่ออบแห้งนานขึ้น ข้าวเกรียบจะเริ่มแห้ง แต่ยังไม่ร่อนแตกภายใน ที่เวลา 60-130 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 5.35%-10.93% เมื่อทดลองหักจะกรอบ แตกออกจากกันได้ง่าย และเมื่อเวลาในการอบแห้งนานมากยิ่งขึ้น จนกระทั่งเวลา 140-180 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 2.88%-4.44% ข้าวเกรียบจะเริ่มมีรอยแตกภายใน เมื่อทดลองหักจะกรอบแตกออกจากกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งที่อุณหภูมิกว่าอื่นๆ จะพบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มการลดลงของปริมาณความชื้นช้าที่สุด

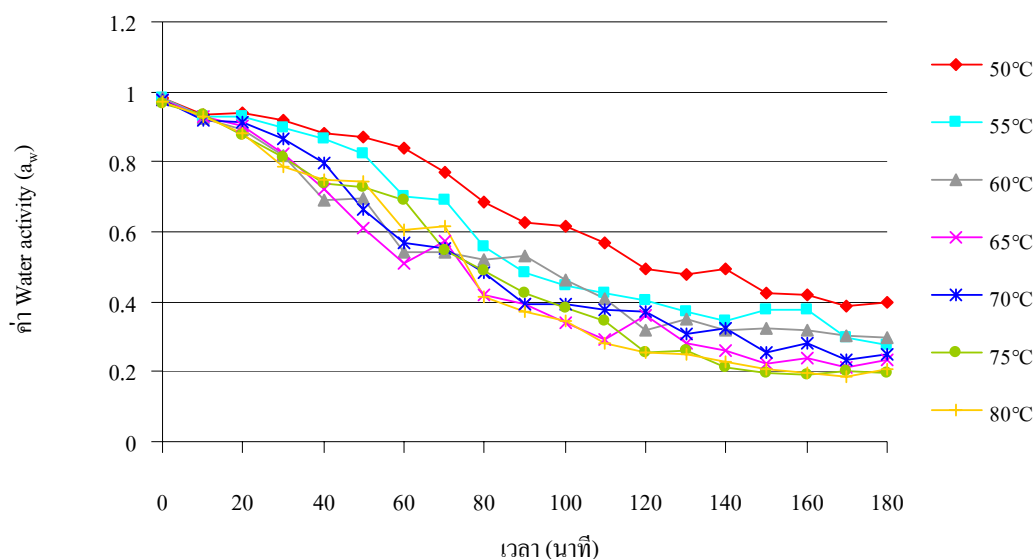
เมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 20 ข้าวเกรียบที่อบแห้งที่เวลา 10-40 นาที ที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12.56%-26.53%, 10.26%-25.18% และ 10.33%-24.49% ตามลำดับ จะมีลักษณะที่ยังชื้นอยู่ และเมื่อทอดลงห้ข้าวเกรียบจะยังยึดหยุ่นไม่ขาดจากกัน สำหรับข้าวเกรียบที่อบที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส ที่เวลา 50-100, 50-90 และ 50-70 นาที ตามลำดับ เมื่ออบนานขึ้น ข้าวเกรียบจะเริ่มแห้ง แต่ยังไม่มีการอบแตกลายภายใน เมื่อทอดลงห้จะกรอบ แตกออกจากกัน มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 5.40%-11.27%, 3.80%-7.39% และ 6.52%-7.24% ตามลำดับ และสำหรับข้าวเกรียบที่อบที่อุณหภูมิ 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาในการอบนานมากยิ่งขึ้น จนกระทั่งเวลา 110-180, 100-180 และ 80-180 นาที ตามลำดับ ข้าวเกรียบจะเริ่มมีรอยแตกลายภายใน เมื่อทอดลงห้จะกรอบแตกออกจากกัน โดยมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 2.16%-4.16%, 1.68%-3.39% และ 1.30%-4.15% ตามลำดับ

เมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิ 70 และ 75 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปลดลงเมื่อระยะเวลาการอบแห้งนานขึ้น ดังภาพที่ 20 ข้าวเกรียบที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 และ 75 องศาเซลเซียส ที่เวลา 10-30 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 11.39%-24.86% และ 10.51%-22.25% ตามลำดับ จะมีลักษณะที่ยังชื้นอยู่ และเมื่อทอดลงห้ข้าวเกรียบจะยังยึดหยุ่นไม่ขาดจากกัน และเมื่ออบนานขึ้น ข้าวเกรียบจะเริ่มแห้ง แต่ยังไม่มีการอบแตกลายภายใน ที่อุณหภูมิ 70 และ 75 องศาเซลเซียส เวลา 40-60 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 5.63%-9.16% และ 5.24%-8.70% ตามลำดับ เมื่อทอดลงห้จะกรอบ แตกออกจากกัน และเมื่อเวลาในการอบนานมากยิ่งขึ้น จนกระทั่งเวลา 70-180 นาที ที่อุณหภูมิ 70 และ 75 องศาเซลเซียส มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0.86%-4.15% และ 0.83%-3.76% ตามลำดับ ข้าวเกรียบจะเริ่มมีรอยแตกลายภายใน เมื่อทอดลงห้จะกรอบแตกออกจากกัน

เมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 20 ข้าวเกรียบที่อบแห้งที่เวลา 10-20 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 14.64%-19.76% จะมีลักษณะที่ยังชื้นอยู่ และเมื่อทอดลงห้ข้าวเกรียบจะยังยึดหยุ่นไม่ขาดจากกัน และเมื่ออบนานขึ้น ที่เวลา 30-40 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 5.72%-8.52% ข้าวเกรียบจะเริ่มแห้ง แต่ยังไม่มีการอบแตกลายภายใน เมื่อทอดลงห้จะกรอบ แตกออกจากกัน และเมื่อเวลาในการอบนานมากยิ่งขึ้น จนกระทั่งเวลา 50-180 นาที มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 0.86%-3.90% ข้าวเกรียบจะเริ่มมีรอยแตกลายภายใน เมื่อทอดลงห้จะกรอบแตกออกจากกัน โดยข้าวเกรียบซึ่งอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มของปริมาณความชื้นลดลงรวดเร็วที่สุด

2.4 ค่า water activity (a_w) ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

ผลของค่า a_w จากกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงดังภาพที่ 21 จะพบว่าค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปมีแนวโน้มที่ลดลง ทุกๆ อุณหภูมิ โดยจะมีค่าตั้งแต่ 0.939-0.184 โดยที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มของค่า a_w ลดลงค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิอื่นๆ ส่วนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มของค่า a_w ที่ลดลงมากที่สุด โดยมีค่า a_w ต่ำที่สุด คือ 0.184 ที่เวลา 170 นาที และการอบแห้งที่อุณหภูมิอื่นๆ ก็จะมีแนวโน้มการลดลงที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากข้อ 2.3 กับค่า a_w แล้วพบว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

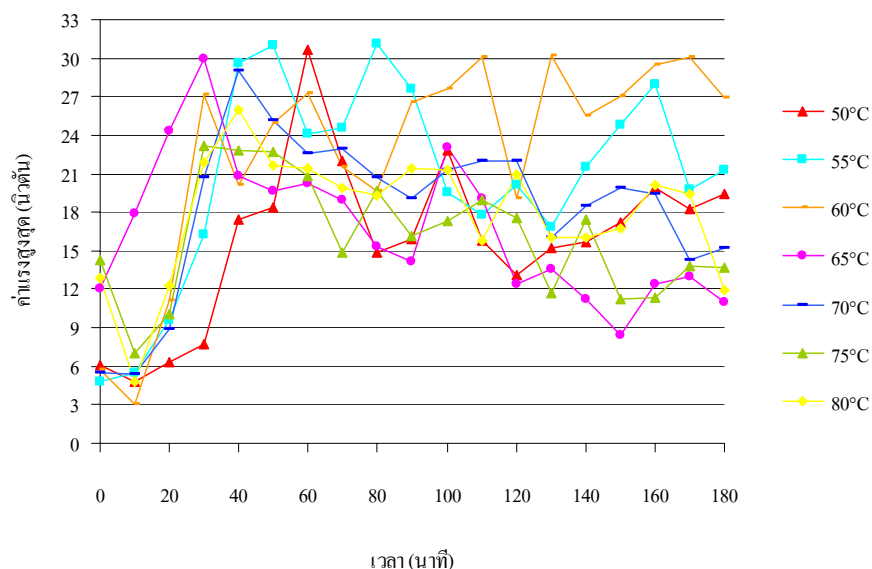


ภาพที่ 21 ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

2.5 ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

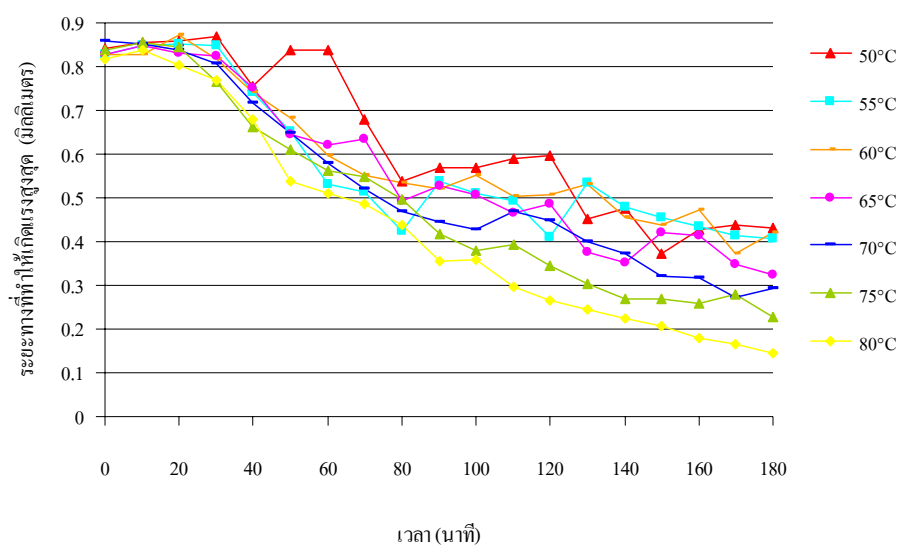
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) ที่บันทึกได้ แสดงดังภาพที่ 22 พบว่าค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตกหักนั้น จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 20-40 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงไปตลอดระยะเวลา

การอบแห้ง ยกเว้นที่อุณหภูมิ 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่มีแนวโน้มของกราฟที่ขึ้นลงไม่แน่นอน



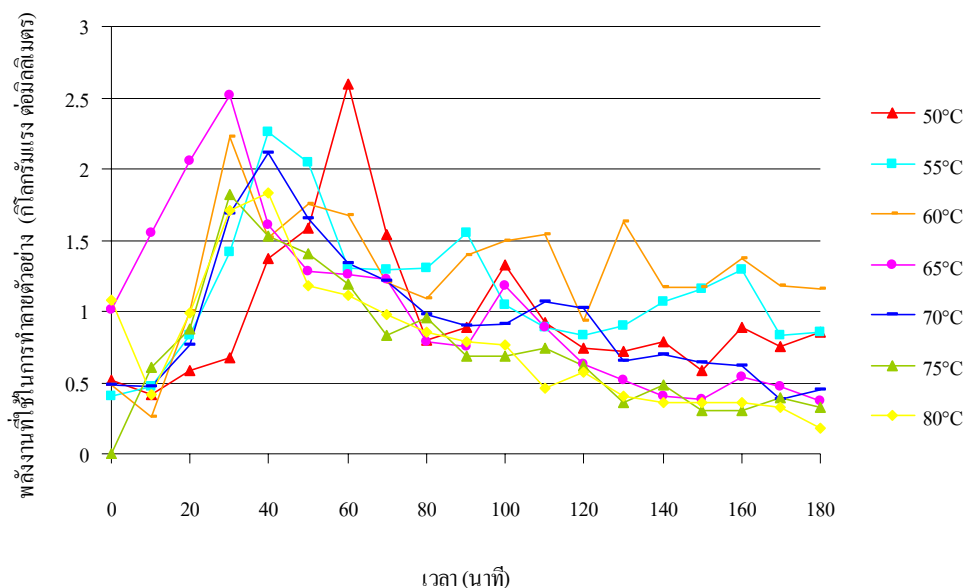
ภาพที่ 22 ค่าแรงสูงสุด (Maximum force) ที่ทำให้ข้าวเกรียบแตกหักของข้าวเกรียบ
กึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน
(0-180 นาที)

ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) ที่บันทึกได้จากการวัดค่าแสดงดังภาพที่ 23 พบว่า แนวโน้มของระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงทุกๆ อุณหภูมิ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ช่วงแรกของการอบแห้งข้าวเกรียบจะมีความชื้นสูง มีลักษณะยืดหยุ่นไม่ขาดจากกัน ดังนั้นระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดจะสูงตามไปด้วย แต่เมื่ออบข้าวเกรียบนานขึ้น ความชื้นภายในข้าวเกรียบจะลดลง และเมื่อมีความชื้นต่ำมากๆ จะทำให้ข้าวเกรียบมีรอยแตกภายใน ทำให้ข้าวเกรียบเปราะ แตกได้ง่าย ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดจึงลดลง



ภาพที่ 23 ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance)ของข้าวเกรียบ
กึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส
ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

พลังงานที่ใช้ในการทำตัวอย่าง (Work) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง ต่อมิลลิเมตร (Kilograms Force per Millimetre, kgf.mm.) ที่บันทึกได้จากการวัดค่าแสดงดังภาพที่ 24 พบว่า จะมีค่าสูงขึ้นในช่วง 0-60 นาทีของการอบแห้ง จากนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออบแห้งนานขึ้น และจะมีค่าสูงที่สุดในช่วง 30-60 นาที ในช่วงแรกของการอบแห้งข้าวเกรียบมีปริมาณความชื้นสูง และมีความยืดหยุ่น พลังงานที่ใช้ในการทำตัวอย่างจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น หลังจากอบนานขึ้น ข้าวเกรียบจะเปลี่ยนสภาพจากที่ยืดหยุ่นจะเริ่มแข็งขึ้น และจะใช้พลังงานในการทำตัวอย่างสูงที่สุด ในช่วง 30-60 นาที จากนั้นจะเริ่มเปราะ และแตกได้ง่าย เกิดรอยแตกภายในขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลง จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการทำตัวอย่างลดลง

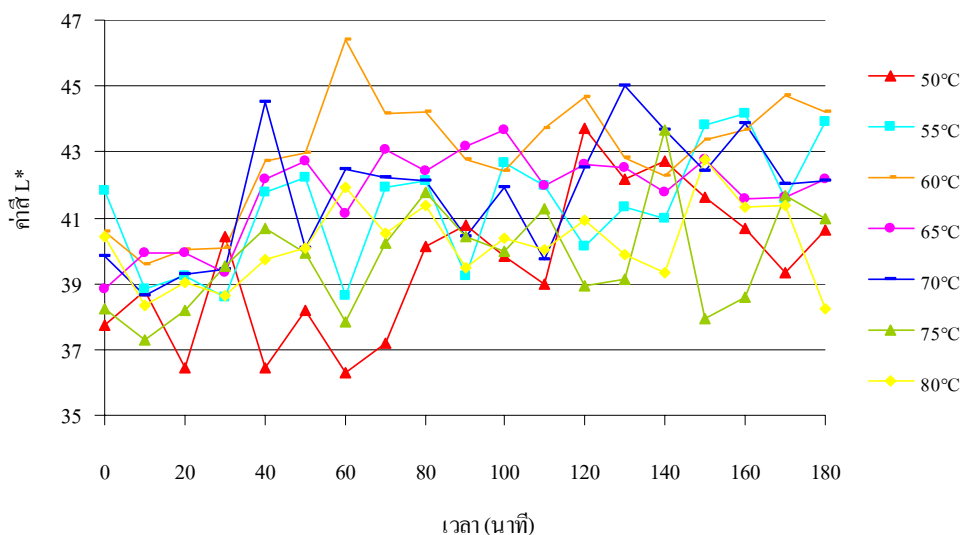


ภาพที่ 24 พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) ของข้าวเกรียบ
กึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส
ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

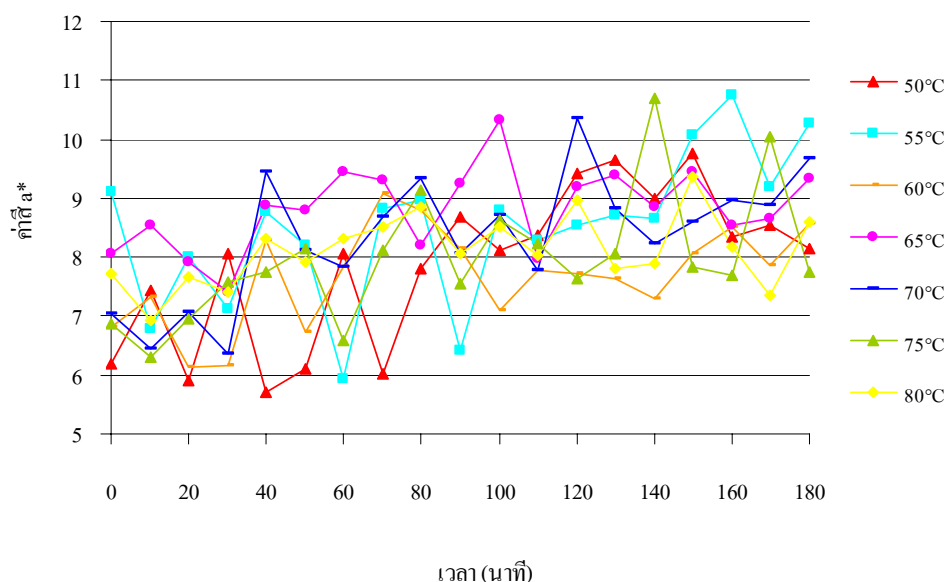
2.6 ค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

ผลของค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป จากกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แสดงดังภาพที่ 25-27 พบว่าค่าสีในระบบ L^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปซึ่งอธิบายถึงความสว่างของผลิตภัณฑ์ ($L^* = 100$ คือสีขาว, $L^* = 0$ คือสีดำ) จะอยู่ในช่วง 36.28-46.41 ส่วนค่า a^* ใช้กำหนดความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (a^* เป็นบวก = สีแดง, a^* เป็นลบ = สีเขียว) จะอยู่ในช่วง 5.72-10.76 ซึ่งในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปนี้จะแสดงถึงความเป็นสีแดง และค่า b^* ใช้กำหนดความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^* เป็นบวก = สีเหลือง, b^* เป็นลบ = สีน้ำเงิน) จะอยู่ในช่วง 8.94-18.11 ซึ่งในผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปนี้จะแสดงถึงความเป็นสีเหลือง เมื่อพิจารณาถึงแนวโน้มของกราฟทั้ง 3 แล้วพบว่าไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน โดยมีการแกว่งขึ้นลงตลอดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยจากภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปมีสีน้ำตาลอ่อน มีใบกะเพรากระจายอยู่ทั่วแผ่น ซึ่งอาจทำให้การวัดค่าสีไม่สม่ำเสมอ และเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากชิ้นข้าวเกรียบไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงจะไม่นำค่าสี L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายคุณลักษณะด้านสี ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้ง จากการทดลอง

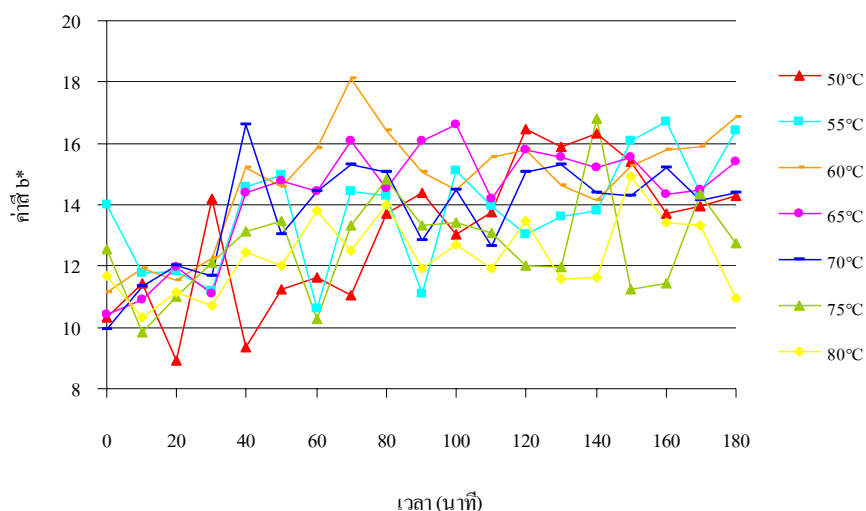
พบว่าเวลา และอุณหภูมิในกระบวนการอบแห้ง มีอิทธิพลต่อค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปโดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังตารางผนวกที่ ก1 และ ก2



ภาพที่ 25 ค่าสีในระบบ L^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)



ภาพที่ 26 ค่าสีในระบบ a^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)



ภาพที่ 27 ค่าสีในระบบ b* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ที่เวลาแตกต่างกัน (0-180 นาที)

3. ผลการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

3.1 ผลการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) สำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

3.1.1 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ

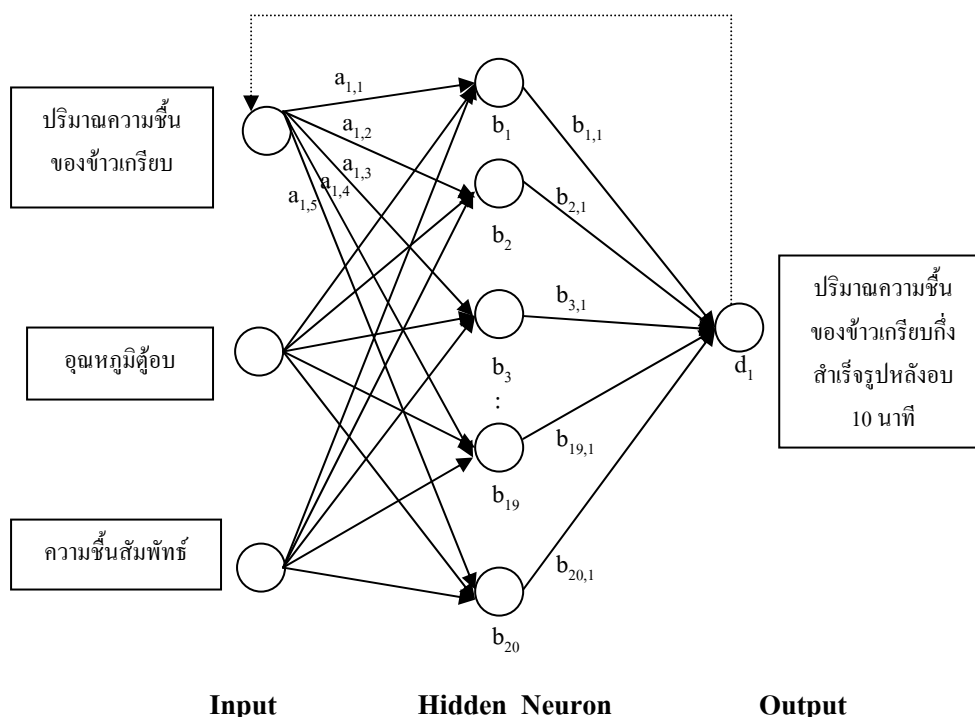
ก. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

ค่า MSE จากการฝึกฝนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 11 ซึ่งค่า MSE และค่า r ที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการทำการทดลองโดยสุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ครั้ง (Cross-validation) ของข้อมูลที่ผ่านการ Normalize มาก่อน สำหรับ 10 สิ่งทดลอง เมื่อพิจารณาค่า MSE เฉลี่ยที่ต่ำที่สุดแล้ว สิ่งทดลองที่ 5 มีค่า MSE เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 8.42×10^{-4} และค่า r ที่สูงมาก คือ 0.9981 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่สมบูรณ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง จึงคัดเลือกให้เลือกสิ่ง

ทดลองที่ 5 เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ความชันของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองนี้ประกอบด้วย จำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 20 นิวรอน โดยมีโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมดังภาพที่ 28 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางผนวกที่ ข1

ตารางที่ 11 ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ปริมาณความชันของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออกจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง

แบบจำลอง	จำนวนหน่วยซ่อน (นิวรอน)	จำนวนชั้นซ่อน (ชั้น)	MSE	r
1	1	1	$4.63 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9902 ± 0.0014
2	5	1	$2.77 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9941 ± 0.0015
3	10	1	$6.60 \times 10^{-3} \pm 0.01$	0.9873 ± 0.0098
4	15	1	$1.53 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9967 ± 0.0025
5	20	1	$8.42 \times 10^{-4} \pm 0.00$	0.9981 ± 0.0007
6	1	2	$6.07 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9884 ± 0.0016
7	5	2	$2.19 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9951 ± 0.0024
8	10	2	$3.49 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9926 ± 0.0088
9	15	2	$9.61 \times 10^{-4} \pm 0.00$	0.9980 ± 0.0011
10	20	2	$2.10 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9964 ± 0.0023



ภาพที่ 28 โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายแบบที่ใช้ปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

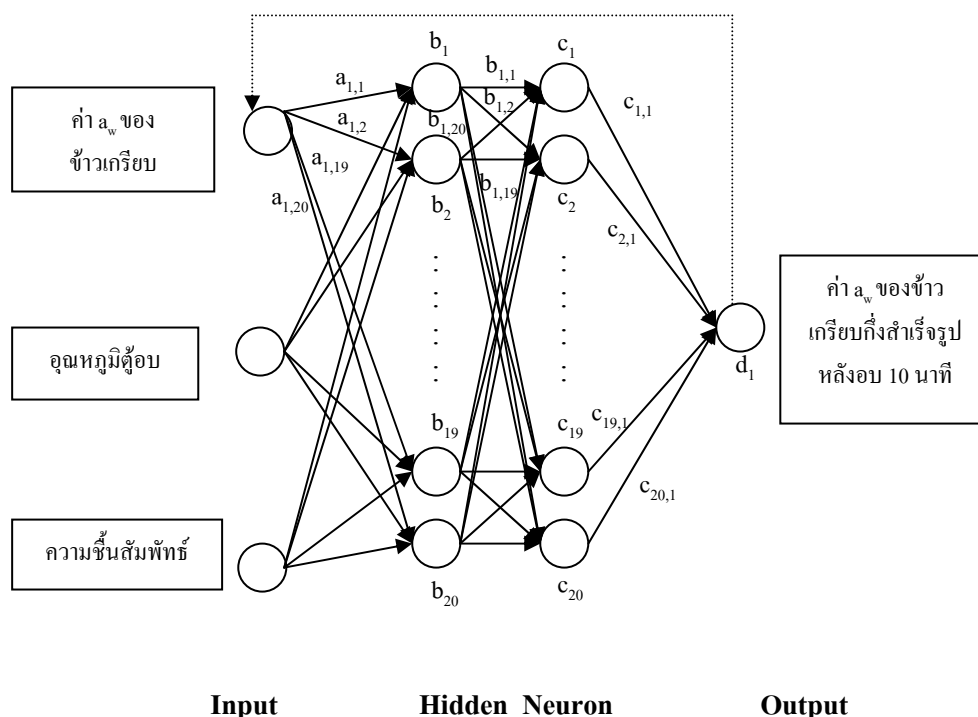
ข. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่า water activity (a_w) เป็นข้อมูลออก

ค่า MSE จากการฝึกฝนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ สำหรับทำนายค่า a_w แสดงไว้ในตารางที่ 12 ซึ่งค่า MSE และค่า r ที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการทำการทดลองโดยสุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ครั้ง (Cross-validation) ของข้อมูลที่ผ่านการ Normalize มาก่อน สำหรับ 10 สิ่งทดลอง เมื่อพิจารณาค่า MSE เฉลี่ยของแบบจำลอง สิ่งทดลองที่ 10 มีค่า MSE เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 5.43×10^{-3} และมี ค่า r ที่สูง คือ 0.9943 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่สมบูรณ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง จึงคัดเลือกให้เลือกลักษณะสิ่งทดลองที่ 10 เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลอง

นี้ประกอบด้วย จำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 20 นิวรอน โดยมีโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมดังภาพที่ 28 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางผนวกที่ ข2

ตารางที่ 12 ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่า a_w ของข่าวเกรียบถึง
ถ้าเรีจรูปเป็นข้อมูลออกจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง

แบบจำลอง	จำนวนหน่วยซ่อน (นิวรอน)	จำนวนชั้นซ่อน (ชั้น)	MSE	r
1	1	1	$1.00 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9871 ± 0.0012
2	5	1	$9.23 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9882 ± 0.0010
3	10	1	$7.50 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9904 ± 0.0021
4	15	1	$8.07 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9907 ± 0.0021
5	20	1	$7.93 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9901 ± 0.0022
6	1	2	$1.01 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9871 ± 0.0012
7	5	2	$1.00 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9882 ± 0.0028
8	10	2	$6.60 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9917 ± 0.0023
9	15	2	$1.02 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9903 ± 0.0054
10	20	2	$5.43 \times 10^{-3} \pm 0.00$	0.9934 ± 0.0035



ภาพที่ 29 โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายแบบที่ใช้ค่า a_w ของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

ค. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลเป็นข้อมูลออก

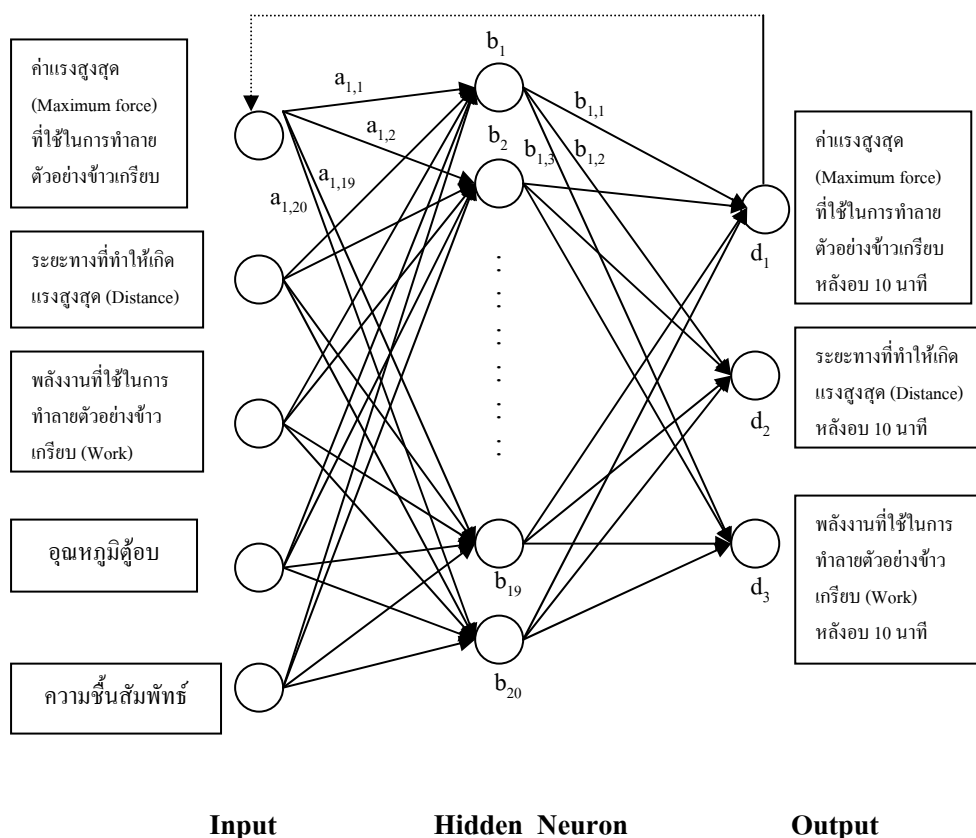
ค่า MSE จากการฝึกฝนของโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ สำหรับทำนายค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลแสดงไว้ในตารางที่ 13 ซึ่งค่า MSE และค่า r ที่แสดงในตารางเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการทำการทดลองโดยสุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ครั้ง (Cross-validation) ของข้อมูลที่ผ่านมาการ Normalize มาก่อน สำหรับ 10 สิ่งทดลอง เมื่อพิจารณาค่า MSE เฉลี่ยที่ต่ำที่สุดแล้ว สิ่งทดลองที่ 5 มีค่า MSE เฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 2.60×10^{-2} และมีค่า r ที่ค่อนข้างสูง คือ 0.9504 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง จึงคัดเลือกให้เลือกสิ่งทดลองที่ 5 เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล ของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองนี้ประกอบด้วย จำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 20 นิวรอน โดยมีโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่

เหมาะสมดังภาพที่ 30 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางผนวกที่ ข3 โดยค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลจะหมายถึง ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง ต่อ มิลลิเมตร (Kilograms Force per Millimetre, kgf.mm.)

ตารางที่ 13 ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออกจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง

แบบจำลอง	จำนวนหน่วยซ่อน (นิวรอน)	จำนวนชั้นซ่อน (ชั้น)	MSE	r
1	1	1	$1.27 \times 10^{-1} \pm 0.00$	0.7153 ± 0.0007
2	5	1	$4.13 \times 10^{-2} \pm 0.01$	0.9171 ± 0.0116
3	10	1	$5.02 \times 10^{-2} \pm 0.01$	0.9040 ± 0.0484
4	15	1	$4.48 \times 10^{-2} \pm 0.03$	0.9086 ± 0.0807
5	20	1	$2.60 \times 10^{-2} \pm 0.01$	0.9504 ± 0.0164
6	1	2	$1.30 \times 10^{-1} \pm 0.01$	0.7079 ± 0.0143
7	5	2	$6.19 \times 10^{-2} \pm 0.01$	0.8755 ± 0.0332
8	10	2	$3.29 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9353 ± 0.0051
9	15	2	$4.81 \times 10^{-2} \pm 0.03$	0.9262 ± 0.0351
10	20	2	$2.83 \times 10^{-2} \pm 0.02$	0.9465 ± 0.0344

หมายเหตุ ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลจะหมายถึง ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง ต่อ มิลลิเมตร (Kilograms Force per Millimetre, kgf.mm.)



ภาพที่ 30 โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบถึงสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

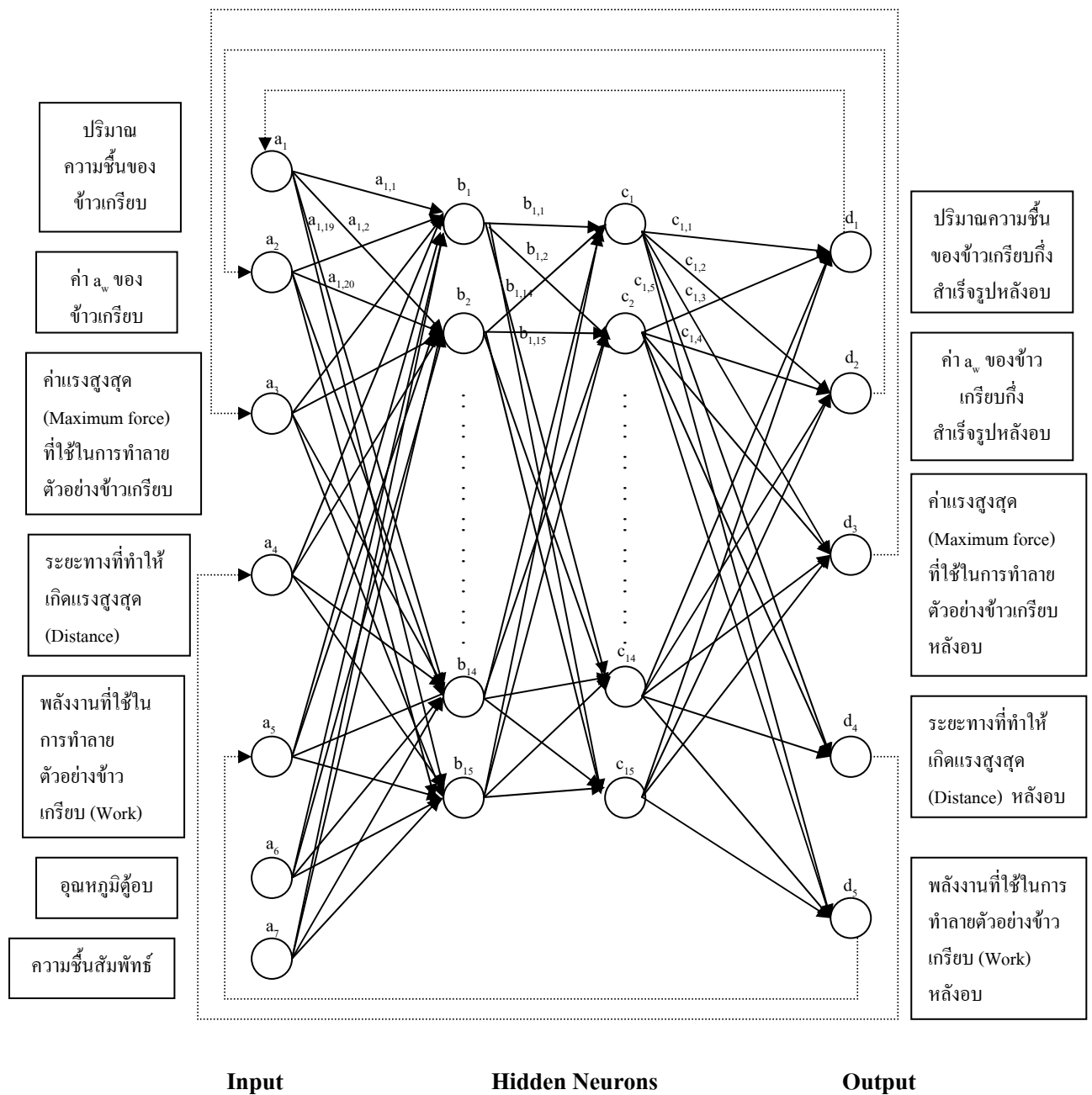
3.1.2 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด

ค่า MSE จากการฝึกฝนของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด แสดงไว้ในตารางที่ 14 ซึ่งค่า MSE ที่แสดงเป็นค่า MSE ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด ที่ผ่านการ Normalize มาก่อน และค่า MSE ที่แสดงในตารางยังเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจากการทำการทดลองโดยสุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ครั้ง (Cross-validation) สำหรับ 10 สิ่งทดลอง เมื่อพิจารณาค่า MSE เฉลี่ยที่ต่ำที่สุดแล้ว สิ่งทดลองที่ 9 มีค่า MSE เฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 1.20×10^{-2} และมีค่า r ที่สูงมาก คือ 0.9794 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่สมบูรณะระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง จึงคัดเลือกให้เลือกสิ่งทดลองที่ 9 ให้เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด ซึ่งโครงสร้างของแบบจำลองนี้

ประกอบด้วย จำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 15 นิวรอน โดยมีโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมดังภาพที่ 31 โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงดังตารางผนวกที่ ข7

ตารางที่ 14 ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมดจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง

แบบจำลอง	จำนวนหน่วยซ่อน (นิวรอน)	จำนวนชั้นซ่อน (ชั้น)	MSE	r
1	1	1	$8.06 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.8668 ± 0.0002
2	5	1	$3.28 \times 10^{-2} \pm 0.02$	0.9481 ± 0.0263
3	10	1	$2.02 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9695 ± 0.0015
4	15	1	$2.14 \times 10^{-2} \pm 0.01$	0.9668 ± 0.0222
5	20	1	$2.24 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9656 ± 0.0055
6	1	2	$8.04 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.8670 ± 0.0003
7	5	2	$2.49 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9614 ± 0.0055
8	10	2	$2.43 \times 10^{-2} \pm 0.01$	0.9779 ± 0.0085
9	15	2	$1.20 \times 10^{-2} \pm 0.00$	0.9794 ± 0.0048
10	20	2	$1.65 \times 10^{-2} \pm 0.02$	0.9752 ± 0.0223



ภาพที่ 31 โครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด

จากตารางที่ 15 สรุปผลของโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุดทั้งหมดที่ได้จากการทดลองข้างต้น

ตารางที่ 15 ผลสรุปของโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุด

ข้อมูลออก	Neural Network	จำนวนชั้นซ่อน	จำนวนหน่วยซ่อน
ปริมาณความชื้น	5	1	20
ค่า a_w	10	2	20
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล	5	1	20
แบบรวมทั้งหมด	9	2	15

3.1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

เปรียบเทียบแบบจำลองทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษาจากข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 เพื่อหาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปในกระบวนการอบแห้ง โดยค่า MSE ทั้งหมดในตารางที่ 16 เป็นค่าเฉลี่ย MSE ของข้อมูลที่ได้แปลงกลับให้อยู่ในหน่วยดั้งเดิม (Unnormalized) แล้ว เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด โดยเลือกแบบจำลองที่ให้ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) น้อยที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) เพื่อที่จะเลือกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม

ตารางที่ 16 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่
ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนาย
คุณลักษณะรวมทั้งหมดจากการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้อง

คุณลักษณะ	ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ		ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด	
	MSE	r	MSE	r
ปริมาณความชื้น	0.16	0.9981	0.95	0.9880
ค่า a_w	2.00×10^{-4}	0.9983	1.39×10^{-4}	0.9880
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล	2.19	0.9879	1.29	0.9935
- ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force)	6.56	0.9257	3.85	0.9579
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรง สูงสุด (Distance)	1.40×10^{-3}	0.9781	9.98×10^{-4}	0.9863
- พลังงานที่ใช้ในการทำลาย ตัวอย่าง (Work)	2.11×10^{-2}	0.9597	1.56×10^{-2}	0.9763

หมายเหตุ ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลจะหมายถึง ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง ต่อ มิลลิเมตร (Kilograms Force per Millimetre, kgf.mm.)

จากตารางที่ 16 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย MSE ของโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ และแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด โดยแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด จะแยกคุณลักษณะต่างๆ ออกจากกัน แล้วหาค่า MSE ของแต่ละคุณลักษณะเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าโดยภาพรวมแล้วแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมดสามารถทำนายค่าของ ค่า a_w และค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด(Distance) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) ได้ดีกว่าแบบ

จำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ ขณะที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะสามารถทำนายค่าได้ดีกว่าเพียงคุณลักษณะเดียวคือ ปริมาณความชื้น ดังนั้นจึงพิจารณาให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมของกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูป เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ลดเวลาในการคำนวณลงได้ เพราะสามารถที่จะทำนายข้อมูลออกทั้ง 3 คุณลักษณะออกมาได้ภายในเวลาเดียวกัน จึงสามารถที่จะประหยัดเวลาในการทำนายค่าลงได้

3.2 ผลการสร้างแบบจำลองความถดถอย (Regression model)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองความถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression) ได้แก่ แบบความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) และแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ได้แก่ ความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบหุนกำลังสอง (Second-order polynomial regression) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างตัวแปรต้น (X_i) ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิที่ตั้งค่าเอาไว้เริ่มต้นคงที่ที่หน้าปัทม์เครื่องอบแห้ง (X_1) เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง (X_2) และความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นของอากาศในตู้อบแห้ง (X_3) กับตัวแปรตาม (Y_j) ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Y_1) ค่า a_w (Y_2) ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Y_3) ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Y_4) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Y_5) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 17 โดยในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้น จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ที่ต่ำที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r)

ตารางที่ 17 แบบจำลองความถดถอยสำหรับทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้งและประสิทธิภาพของแบบจำลอง

คุณลักษณะ	ชนิด สมการ	สมการถดถอย	ประสิทธิภาพของแบบจำลอง	
			MSE	r
ปริมาณ ความชื้น (Y ₁)	Linear regression	$Y_1 = -6.746 + 0.189X_1 - 0.1x_2 + 0.714X_3$	15.82±0.01	0.9203±0.0022
	Non-linear regression	$Y_1 = -38.303 + 1.30X_1 - 0.174X_2 + 1.403X_3 - 1.403 \times 10^{-3}X_1X_2 - 6.54 \times 10^{-3}X_1X_3 - 4.90 \times 10^{-3}X_2X_3 - 8.18 \times 10^{-3}X_1^2 + 1.279 \times 10^{-3}X_2^2 - 7.25 \times 10^{-3}X_3^2$	4.59±0.01	0.9776±0.0026
a _w (Y ₂)	Linear regression	$Y_2 = 1.167 - 4.257 \times 10^{-3}X_1 - 4.35 \times 10^{-3}X_2 + 2.407 \times 10^{-3}X_3$	5.11×10 ⁻³ ±0.04	0.9604±0.0017
	Non-linear regression	$Y_2 = 3.443 - 6.15 \times 10^{-2}X_1 - 1.30 \times 10^{-2}X_2 - 2.13 \times 10^{-2}X_3 + 5.766 \times 10^{-6}X_1X_2 + 1.973 \times 10^{-4}X_1X_3 + 7.773 \times 10^{-5}X_2X_3 + 4.039 \times 10^{-4}X_1^2 + 2.359 \times 10^{-5}X_2^2 + 8.042 \times 10^{-5}X_3^2$	2.03×10 ⁻³ ±0.02	0.9781±0.0021

ตารางที่ 17 (ต่อ)

คุณลักษณะ	ชนิด สมการ	สมการถดถอย	ประสิทธิภาพของแบบจำลอง	
			MSE	r
ค่าแรง สูงสุดที่ใช้ ในการ ทำลาย ตัวอย่าง (Y ₃)	Linear regression	$Y_3 = 38.833 - 0.232X_1 - 0.345X_3$	40.75±0.03	0.3885±0.0015
	Non-linear regression	$Y_3 = -38.424 + 2.296X_1 - 0.492X_2 - 1.637X_3 + 6.613 \times 10^{-3} X_1 X_2 + 1.343 \times 10^{-2} X_1 X_3 + 1.714 \times 10^{-2} X_2 X_3 - 2.043 \times 10^{-2} X_1^2 - 8.987 \times 10^{-4} X_2^2 + 8.911 \times 10^{-3} X_3^2$	28.15±0.02	0.6423±0.0011
ระยะทางที่ ทำให้เกิด แรงสูงสุด (Y ₄)	Linear regression	$Y_4 = 1.252 - 6.112 \times 10^{-3} X_1 - 3.378 \times 10^{-3} X_2$	$4.40 \times 10^{-3} \pm 0.02$	0.9433±0.0004
	Non-linear regression	$Y_4 = 2.303 - 2.75 \times 10^{-2} X_1 - 4.68 \times 10^{-3} X_2 - 2.4075 \times 10^{-2} X_3 - 3.31 \times 10^{-5} X_1 X_2 + 2.281 \times 10^{-4} X_1 X_3 + 2.91 \times 10^{-7} X_2 X_3 + 1.329 \times 10^{-4} X_1^2 + 1.823 \times 10^{-5} X_2^2 + 8.309 \times 10^{-5} X_3^2$	$2.22 \times 10^{-3} \pm 0.02$	0.9713±0.0003

ตารางที่ 17 (ต่อ)

คุณลักษณะ	ชนิด สมการ	สมการถดถอย	ประสิทธิภาพของแบบจำลอง	
			MSE	r
พลังงานที่ใช้ในการ ทำลาย ตัวอย่าง (Y_5)	Linear regression	$Y_5 = 3.765 - 2.756 \times 10^{-2} X_1$ $- 5.597 \times 10^{-3} X_2$ $- 2.918 \times 10^{-2} X_3$	0.20±0.02	0.6285±0.0012
พลังงานที่ใช้ในการ ทำลาย ตัวอย่าง (Y_5)	Non-linear regression	$Y_5 = 5.538 - 1.848 \times 10^{-2} X_1$ $- 4.098 \times 10^{-2} X_2 - 0.226 X_3$ $+ 4.031 \times 10^{-4} X_1 X_2$ $+ 1.992 \times 10^{-4} X_1 X_3$ $+ 1.018 \times 10^{-4} X_2 X_3$ $- 3.921 \times 10^{-4} X_1^2$ $- 2.809 \times 10^{-5} X_2^2$ $+ 1.092 \times 10^{-3} X_3^2$	0.15±0.02	0.6880±0.0013

หมายเหตุ X_1 = อุณหภูมิที่ตั้งค่าเอาไว้เริ่มต้นคงที่ที่หน้าปัทม์เครื่องอบแห้ง

X_2 = เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง

X_3 = ความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นของอากาศในตู้อบแห้ง

จากประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการพิจารณาจากค่าเฉลี่ย MSE และค่าเฉลี่ย r ของแบบจำลองความถดถอย ที่ได้มาจากการทำการทดลองโดยสุ่มข้อมูลที่แตกต่างกัน 3 ครั้ง (Cross-validation) จากขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองปริมาณความชื้น (Y_1) ค่า a_w (Y_2) และระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Y_4) มีค่า r สูงมาก ซึ่งหมายความว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระค่อนข้างสมบูรณ์และมีทิศทางเดียวกัน ความแม่นยำของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์ย่อมมีสูงมาก ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Y_3) และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Y_5) มีค่า r ในระดับปานกลาง หมายความว่า

ว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระในระดับปานกลางและมีทิศทางไปในทางเดียวกัน ความถูกต้องของการนำสมการไปใช้เพื่อทำนายหรือคาดคะเนผลลัพธ์มีความถูกต้องในระดับปานกลาง โดยการคัดเลือกแบบจำลองความถดถอยที่เหมาะสมนั้น ทุกคุณลักษณะพิจารณาเลือกแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ชนิดความถดถอยแบบพหุนามอันดับสอง (Second-order polynomial regression) เพราะมีค่า MSE ต่ำกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear regression) ชนิดความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) รวมถึงมีค่า r ที่สูงกว่าด้วย สำหรับค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Y_3) ที่มีค่า MSE ที่ค่อนข้างสูง และมีค่า r ต่ำ ถ้าพิจารณาจากภาพที่ 22 ซึ่งแสดงถึงค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการทำลายตัวอย่างจะพบว่าค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง มีการแกว่งขึ้นลงค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิที่ 55 และ 60 องศาเซลเซียส จึงทำให้ค่า MSE ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองความถดถอยในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองแล้วพบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองความถดถอยในทุกๆ คุณลักษณะ ดังตารางที่ 18 ซึ่งข้อดีของโครงข่ายประสาทเทียม คือ ระบบจะมีความสามารถในการจำการกำหนดความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและตัวแปรออก จากรูปแบบที่กำหนดทำให้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากๆ ได้เช่น รูปแบบของการบันทึกความจำแบบจำลองไม่เชิงเส้น การจำแนกแยกแยะ และอื่นๆ จึงทำให้ค่า MSE ที่ได้ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองนี้ โครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองความถดถอย

ตารางที่ 18 ค่า MSE ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด และแบบจำลองความถดถอย

คุณลักษณะ	ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด		แบบจำลองความถดถอย	
	MSE	r	MSE	r
ปริมาณความชื้น	0.95	0.9880	4.59	0.9776
ค่า a_w	1.39×10^{-4}	0.9880	2.03×10^{-3}	0.9781
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล				
- ค่าแรงสูงสุด	3.85	0.9579	28.15	0.6423
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด	9.98×10^{-4}	0.9863	2.22×10^{-3}	0.9713
- พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง	1.56×10^{-2}	0.9763	0.15	0.6880

4. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) กับแบบจำลองความถดถอย (Regression model)

เมื่อนำข้อมูลส่วนสุดท้าย (15%) สำหรับการทดสอบแบบจำลองที่ได้ โดยนำข้อมูลส่วนนี้มาวิเคราะห์กับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองข้อ 3.1.3 คือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมด ซึ่งมีโครงสร้างของแบบจำลองประกอบด้วย จำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น แต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 20 นิวรอนและสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression analysis) ที่ได้จากการทดลองข้อ 3.2 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับแบบจำลองความถดถอย โดยการพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ที่ต่ำที่สุด และมีค่าสหสัมพันธ์สูง (r) ผลการทดลองดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่า MSE และค่า r ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองความถดถอยของข้อมูลสำหรับการทดสอบแบบจำลอง

คุณลักษณะ	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม(ANN)		แบบจำลองความถดถอย (Regression model)	
	MSE	r	MSE	r
ปริมาณความชื้น	5.68	0.9526	7.00	0.9643
ค่า a_w	5.80×10^{-3}	0.9539	6.75×10^{-2}	0.9872
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล				
- ค่าแรงสูงสุด	18.22	0.8094	18.44	0.6894
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด	4.04×10^{-3}	0.9499	4.27×10^{-3}	0.9469
- พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง	7.68×10^{-2}	0.8365	7.12×10^{-2}	0.6001

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย MSE ระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และแบบจำลองความถดถอยพบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพของแบบจำลองดีกว่าแบบจำลองความถดถอยทุกๆ คุณลักษณะ ค่าเฉลี่ย MSE ของแบบจำลองของค่าแรงสูงสุดที่มีค่าค่อนข้างสูงนั้น อาจเกิดจากข้อมูลมีการแกว่งขึ้นลงมาก ดังภาพที่ 22 ดังได้กล่าวมาแล้ว และอาจเกิดจากข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับการทดสอบ (Testing) ซึ่งเป็นข้อมูลที่สุ่มจากชุดข้อมูลทั้งหมด หากข้อมูลชุดทดสอบนี้ไม่ได้ใช้ในการฝึกฝนอาจทำให้แบบจำลองที่ได้มีความผิดพลาดในการทำนายส่วนของข้อมูลที่ไม่เคยผ่านการฝึกฝนนี้ นอกจากนี้จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองอาจมีน้อยเกินไป ทำให้แบบจำลองมีลักษณะการทำนายผิดพลาดได้

5. การหาสถานะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบ

ในการวิเคราะห์พื้นที่ตอบสนองของคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่ทำนายจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำนายข้อมูลออกรวมทั้งหมดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยชั้นซ่อน 2 ชั้น และแต่ละชั้นซ่อนประกอบด้วยหน่วยซ่อนชั้นละ 15 นิวรอน ทำได้ด้วยสร้างเมตริกซ์ของอุณหภูมิ เวลา ในการอบแห้งและคุณลักษณะต่างๆ ของข้าว

เก็บข้อมูลสำเร็จรูปขนาด 7x18 ดังภาพที่ 32 ด้วยโปรแกรม MATLAB version 6.5.0 เพื่อนำมาใช้สร้างกราฟพื้นที่ตอบสนอง 3 มิติ (Contour plot)

$$x_1 = \begin{bmatrix} 50 & 50 & 50 & 50 & \dots & 50 \\ 55 & 55 & 55 & 55 & \dots & 55 \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ 80 & 80 & 80 & 80 & \dots & 80 \end{bmatrix}_{7 \times 18}$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} 10 & 20 & 30 & 40 & \dots & 180 \\ 10 & 20 & 30 & 40 & \dots & 180 \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ 10 & 20 & 30 & 40 & \dots & 180 \end{bmatrix}_{7 \times 18}$$

$$z = \begin{bmatrix} z_{50,10} & z_{50,20} & z_{50,30} & z_{50,40} & \dots & z_{50,180} \\ z_{55,10} & z_{55,20} & z_{55,30} & z_{55,40} & \dots & z_{55,180} \\ z_{60,10} & z_{60,20} & z_{60,30} & z_{60,40} & \dots & z_{60,180} \\ \vdots & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ z_{80,10} & z_{80,20} & z_{80,30} & z_{80,40} & \dots & z_{80,180} \end{bmatrix}_{7 \times 18}$$

ภาพที่ 32 เมตริกซ์ของอุณหภูมิ เวลา ในการอบแห้งและคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบ
กึ่งสำเร็จรูป (x_1 คือ อุณหภูมิในการอบแห้ง x_2 คือ เวลาในการอบแห้ง
และ z คือ คุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป)

ในที่นี้กำหนดให้ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยที่แปรตามอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง เนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความชื้นสัมพัทธ์ในรูปของฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง แต่ในการใช้งานจริงแล้วค่าความชื้นสัมพัทธ์จะได้อัตโนมัติจากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง Data logger โมเดล ML27 จากการหาความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบ ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง พบว่า ความสัมพันธ์ที่เป็นตัวแทนของความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบ ในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง ที่มีค่า MSE ต่ำที่สุด มีค่า r สูง คือ แบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ชนิดความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบพหุนามกำลังสอง (Second-order polynomial regression) ซึ่งให้ค่า MSE เท่ากับ 3.05 และค่า r เท่ากับ 0.9611 สมการแสดงดังตารางที่ 20 ค่า

ของความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้นี้ รวมถึงอุณหภูมิและเวลาจะเป็นตัวแปรเข้าเพื่อใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป

ตารางที่ 20 สมการแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบในรูปของฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้ง

ชนิดสมการ	สมการ	ประสิทธิภาพของ แบบจำลอง	
		MSE	r
Linear regression	$RH = 52.914 - 0.553X_1 - 2.38 \times 10^{-2}X_2$	8.36	0.8907
Non-linear regression	$RH = 153.655 - 3.489X_1 - 0.201X_2 + 1.6978 \times 10^{-2}X_1X_2 + 2.136 \times 10^{-2}X_1^2 + 3.601 \times 10^{-4}X_2^2$	3.05	0.9611

หมายเหตุ RH = ความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบ

X_1 = อุณหภูมิในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบ มีค่าตั้งแต่ 50-80 องศาเซลเซียส

X_2 = เวลาที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบ มีค่าตั้งแต่ 10 ถึง 180 นาที

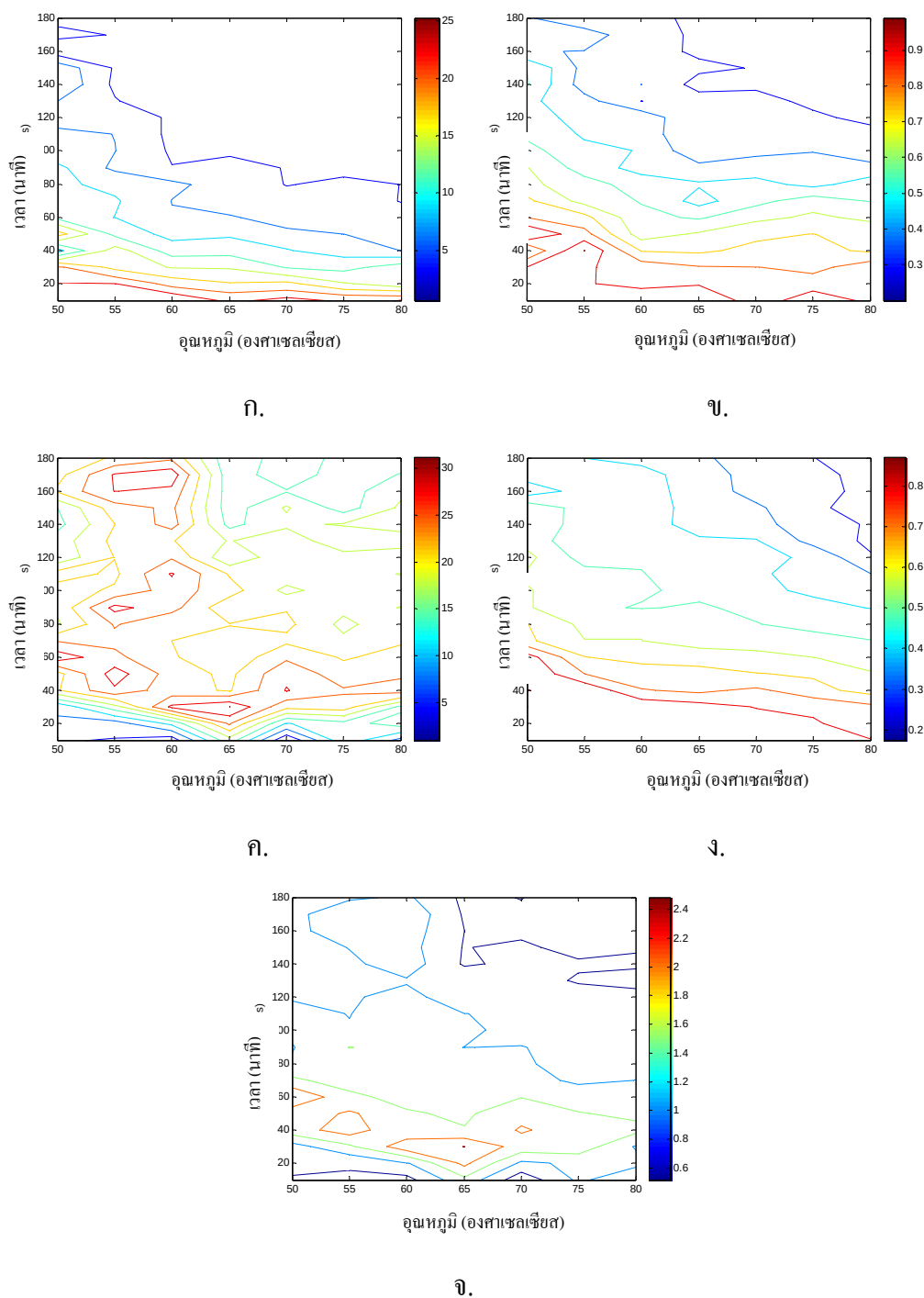
จากการศึกษาที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมเป็น ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสเค็ม โดยกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบมีคุณสมบัติดังตารางที่ 8

เมื่อสร้างพื้นที่ตอบสนองจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นโดยกำหนดให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป มีความใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบดังตารางที่ 8 และมีความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป (ข้าวเกรียบดิบ) ที่เหมาะสมตาม มอก.701/2530 และ มพข. 701/2546 คือ ไม่เกิน 12% พื้นที่ตอบสนองแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นของคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบสำเร็จรูป แสดงดังภาพที่ 33 เมื่อนำพื้นที่ตอบสนองทั้งหมดมาซ้อนทับกัน สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบ คือ ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 59.4-69.3 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้ง 55-79 นาที ดังภาพที่ 34 และจากการศึกษาข้างต้น เมื่อได้อุณหภูมิ

และเวลาในการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่เหมาะสมแล้วสามารถหาช่วงของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบได้จากแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ชนิดความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบพหุนกำลังสอง (Second-order polynomial regression) ที่ทำการศึกษามาแล้วข้างต้น คือ 10.11-17.36% แสดงในตารางที่ 21 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะนำมาสร้างตู้อบแห้งอัตโนมัติที่สามารถปรับอุณหภูมิ และเวลาในการอบแห้งได้ โดยการนำข้อมูลต่างๆ มาประมวลผลเพื่อให้ตู้อบแห้งสามารถที่จะปิดเครื่องโดยอัตโนมัติ เมื่อได้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

ตารางที่ 21 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบแห้งที่ได้จากแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ชนิดความถดถอยแบบโพลิโนเมียลแบบพหุนกำลังสอง (Second-order polynomial regression)

ชนิดสมการ	สมการ	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	RH (%)
Non-linear regression	$RH = 153.655 - 3.489X_1 - 0.201X_2$ $+ 1.6978 \times 10^{-2}X_1X_2$ $+ 2.136 \times 10^{-2}X_1^2 + 3.601 \times 10^{-4}X_2^2$	59.4-69.3	55-79	10.11-17.36



ภาพที่ 33 แผนภาพ Contour plot ของคุณลักษณะต่างๆ

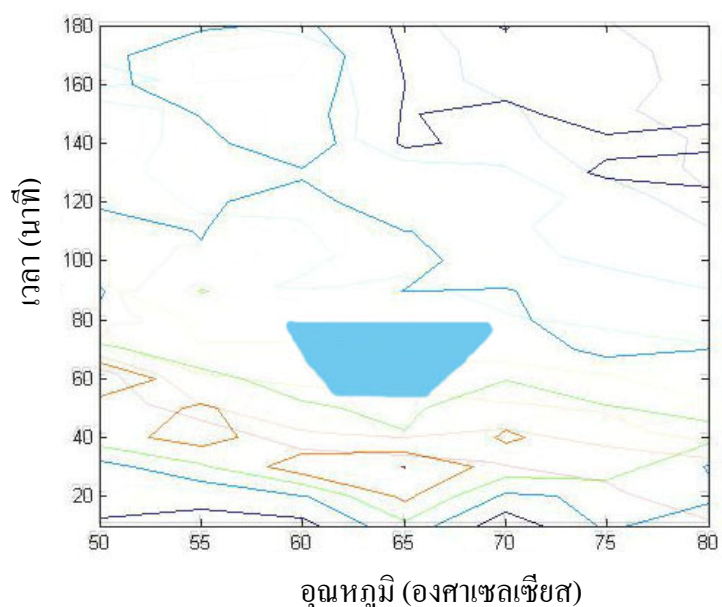
ก. ความชื้น

ข. ค่า a_w

ค. ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก

ง. ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด

จ. พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง



ภาพที่ 34 สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบ

จากภาพที่ 34 แสดงให้เห็นถึงสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ทำการทดลองยืนยัน (Confirm test) เพื่อยืนยันผลการทดลอง โดยผลิตข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา แล้วอบแห้งที่สภาวะต่อไปนี้

- อุณหภูมิในการอบแห้ง 64 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 76 นาที

วัดคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบแห้งด้วยสภาวะที่กำหนด ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่า a_w ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล ค่าสี L^* ค่าสี a^* และค่าสี b^* จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่าของคุณลักษณะต่างๆ ที่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ต้นแบบดังตารางที่ 8 ผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่ทำการทดลองยืนยันอยู่ในช่วงของผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่กำหนดทุกคุณลักษณะ ดังแสดงในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ผลการเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ต้นแบบกับผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดลองยืนยัน

คุณลักษณะ	ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ	ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่ 64°C นาน 76 นาที
ปริมาณความชื้น (%)	8.35% -12.00%	9.63±0.61
ค่า a_w	0.395-0.500	0.419±0.01
ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกล		
- ค่าแรงสูงสุด (Maximum Force) (N)	15.03-20.35	15.93±0.11
- ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) (mm.)	0.41-0.62	0.51±0.04
- พลังงานที่ใช้ในการทำลาย ตัวอย่าง (Work) (kgf.mm.)	0.72-1.33	0.75±0.05
ค่าสี L*	41.05-43.17	41.58±0.38
ค่าสี a*	9.26-10.00	9.41±0.10
ค่าสี b*	15.00-16.08	15.33±0.10

ความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดจากเครื่อง Data Logger โมเดล ML27 ณ เวลาในการอบแห้งประมาณ 76 นาที และอุณหภูมิในการอบแห้ง 64 องศาเซลเซียส เท่ากับ 12.13% แต่ถ้าคำนวณจากสมการในตารางที่ 20 แล้วจะได้ความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 12.91% ความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการวัดจากเครื่องวัดมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากความชื้นสัมพัทธ์เริ่มต้นในตู้อบแห้ง และความชื้นของข้าวเกรียบเริ่มต้น อย่างไรก็ตามในการนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานจริง ไม่จำเป็นต้องทำการคำนวณหาความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากการเก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาที จากเครื่อง Data Logger โมเดล ML27

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโครงข่ายใยประสาทเทียม เพื่อการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจากกระบวนการอบแห้ง โดยใช้ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปรสกะเพรา ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้ ลักษณะเป็นวงรีสีน้ำตาล มีใบกะเพรากระจายทั่วทั้งแผ่นอย่างสม่ำเสมอ โดยความหนาของชิ้นข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป มีขนาดประมาณ 1-1.5 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร มีความชื้นเริ่มต้นโดยประมาณคือ 41.21% ค่า a_w คือ 0.98 ค่าสี L^* (ความสว่าง) คือ 39.64 ค่าสี a^* (สีแดง) คือ 7.40 และค่าสี b^* (สีเหลือง) คือ 11.44

เมื่อเริ่มต้นกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบโดยภาพรวมแล้วจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 40 นาทีแรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ปรับขึ้นลงเล็กน้อย และอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบแห้ง จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในระหว่างกระบวนการอบแห้ง

เมื่ออบข้าวเกรียบที่อุณหภูมิสูงคงที่ ที่ระดับ 50-80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้นปริมาณความชื้นของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปมีแนวโน้มลดลง โดยข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่อบด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีความชื้นลดลงเร็วที่สุด โดยข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่ยังมีความชื้นมาก คือ ตั้งแต่ 10.33-28.51% จะมีลักษณะที่ยังขึ้นอยู่ และเมื่อทดลองหักข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจะยังยืดหยุ่นไม่ขาดจากกัน และเมื่ออบนานขึ้นข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจะเริ่มแห้ง เมื่อทดลองหักจะกรอบ แตกออกจากกัน ไม่มีลักษณะยืดหยุ่นเหมือนในตอนแรก ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปในช่วงนี้จะเป็นช่วงที่แห้งได้ที่แล้ว จะมีความชื้นอยู่ประมาณ 5.72-11.27% เมื่ออบแห้งนานขึ้นและอุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นมากๆ ข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปจะแห้งเร็วขึ้นและเริ่มมีรอยแตกภายใน นั่นแสดงให้เห็นว่าข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปมีความชื้นที่ต่ำมากเกินไป เมื่อนำไปทอดข้าวเกรียบสำเร็จรูปจะไม่พองตัวเท่าที่ควร จะมีความชื้นอยู่ประมาณ 0.83-3.76%

ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปมีแนวโน้มที่ลดลง ทุกๆ อุณหภูมิของกระบวนการอบแห้ง โดยจะมีค่าตั้งแต่ 0.939-0.184 การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มของค่า a_w ที่ลดลงมากที่สุด โดยมีค่า a_w ต่ำที่สุด คือ 0.184 ที่เวลา 170 นาที

ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป โดยค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างแตกหัก (Maximum Force) มีหน่วยเป็น นิวตัน (N) จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 20-40 นาที่แรกของการอบแห้ง หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงไปตามตลอดระยะเวลาการอบแห้ง ยกเว้นที่อุณหภูมิ 55 และ 60 องศาเซลเซียส ที่มีแนวโน้มของกราฟที่ขึ้นลงไม่แน่นอน ระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุด (Distance) มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.) พบว่า แนวโน้มของระยะทางที่ทำให้เกิดแรงสูงสุดนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงทุกๆ อุณหภูมิ จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง และพลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่าง (Work) มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง ต่อ มิลลิเมตร (Kilograms Force per Millimetre, kgf.mm.) มีค่าสูงขึ้นในช่วง 0- 60 นาที่ของการอบแห้ง และหลังจากนั้นจะลดต่ำลง ในช่วงแรกของการอบแห้งข้าวเกรียบมีความชื้นสูง มีความยืดหยุ่น พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่างจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น หลังจากอบนานขึ้น ข้าวเกรียบจะเปลี่ยนสภาพจากที่ยืดหยุ่นจะเริ่มแข็งขึ้น และจะใช้พลังงานในการทำลายตัวอย่างสูงที่สุด ในช่วง 30-60 นาที่ จากนั้นจะเริ่มเปราะ และแตกได้ง่าย เกิดรอยแตกภายในชิ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นในตัวอย่างลดลง จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการทำลายตัวอย่างลดลง

ค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ค่าสี L^* ซึ่งอธิบายถึงความสว่างของผลิตภัณฑ์ จะอยู่ในช่วง 36.28-46.41 ส่วนค่า a^* ใช้กำหนดความเป็นสีแดงหรือสีเขียว จะอยู่ในช่วง 5.72-10.76 และค่า b^* ใช้กำหนดความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินจะอยู่ในช่วง 8.94-18.11 จากการทดลองพบว่าเวลา และอุณหภูมิในกระบวนการอบแห้ง มีอิทธิพลต่อค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) สำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป พบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำนายจากคุณลักษณะรวมทั้งหมดเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในกระบวนการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ลดเวลาในการคำนวณลงได้ เนื่องจากสามารถที่จะทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปทั้ง 3 คุณลักษณะออกมาได้ภายในเวลาเดียวกัน จึงสามารถที่จะประหยัดเวลาในการทำนายค่าลงได้ โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นซ่อน 2 ชั้น และแต่ละชั้นซ่อนมีจำนวนหน่วยซ่อน 15 นิวรอน

เมื่อสร้างแบบจำลองความถดถอยด้วยข้อมูลชุดเดียวกับการใช้ในการสร้างแบบจำลองของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแล้วพบว่า ทุกคุณลักษณะพิจารณาเลือกแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear regression) ชนิดความถดถอยแบบพหุนามอันดับสอง (Second-order polynomial regression) เพราะมีค่า MSE ต่ำกว่าแบบจำลองความถดถอยเชิงเส้นตรง (Linear

regression) ชนิดความถดถอยเชิงเส้นตรงแบบพหุ (Multiple Linear Regression) รวมถึงมีค่า r ที่สูงกว่าด้วย

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมดสามารถที่จะทำนายผลของคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปได้ดีกว่าแบบจำลองความถดถอย ในทุกคุณลักษณะ ดังนั้นจึงพิจารณาให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ทำนายคุณลักษณะรวมทั้งหมดเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายคุณลักษณะของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปสำหรับกระบวนการอบแห้ง

สภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ต้นแบบและมีความชื้นไม่เกิน 12% คือ ที่อุณหภูมิในการอบแห้ง 59.4-69.3 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้ง 55-79 นาที โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในตู้อบระหว่างกระบวนการอบแห้งอยู่ในช่วง 10.11-17.36%

ข้อเสนอแนะ

การสุ่มเลือกข้อมูลสำหรับฝึกฝน ควรสุ่มเลือกข้อมูลให้ครอบคลุมในทุกๆช่วงอุณหภูมิ และเวลา เพื่อการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถทำนายได้ครอบคลุมทุกอุณหภูมิ และเวลาที่ต้องการ

สำหรับคุณลักษณะของค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการทำตัวอย่าง ที่มีค่า MSE ที่ค่อนข้างสูง เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจแก้ปัญหาได้ด้วยการสร้างแบบจำลองให้ที่ใช้ข้อมูลในการฝึกฝนมากขึ้น จำนวนหน่วยซ่อน หรือจำนวนชั้นซ่อน เพิ่มขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กัลยา วาณิชยปัญญา. 2546. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. ครั้งที่ 6. บริษัท
ธรรมสาร จำกัด, กรุงเทพฯ.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2521. **เกลือ: คุณสมบัติและการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร**. ภาควิชา
เทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เกรียงศักดิ์ นิติพงษ์สกุล. 2523. **ศึกษาคุณสมบัติบางอย่างของแป้งชนิดต่างๆ ในการทำข้าว
เกรียบ**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กรมวิทยาศาสตร์. 2522. **การตรวจสอบคุณภาพและกรรมวิธีการผลิตกึ่งแห้ง**. ข้าวกรม
วิทยาศาสตร์. กรมวิทยาศาสตร์, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- คำนึ่ง อุดม. 2530. **พริกไทย**. สำนักพิมพ์ฐานเกษตรกรรม, กรุงเทพฯ.
- เครือข่ายข้อมูลวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว. 2546. **เวอร์เตอร์แอคทีวิตีกับการควบคุมอายุการเก็บ
รักษาผลิตภัณฑ์อาหาร**. เวอร์เตอร์แอคทีวิตีกับการควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์
อาหาร. แหล่งที่มา: <http://www.phtnet.org/article/view-article.asp?aID=12>, 1 ตุลาคม
2550.
- งามจิตร จารุพันธ์. 2529. **คู่มือประกอบอาหารนานาชาติ**. พุทธอุปถัมภ์การพิมพ์. กรุงเทพฯ.
- นันทวัน เทอดไทย. 2548. **เอกสารการสอนวิชาการสร้างแบบจำลองเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์**.
ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
กรุงเทพฯ.
- ณรงค์ นิยมวิทย์. 2526. **วิทยาศาสตร์การประกอบอาหาร**. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นฤดม บุญ-หลง. 2528. การพัฒนาผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเพื่อเป็นอาหารและอาหารสัตว์:
ข้าวเกรียบ., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นันทวัน เทอดไทย. 2548. เอกสารประกอบการสอน รหัสวิชา 054575 การสร้างตัวแบบจำลอง
เพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิรมล สุรัสวดี. 2527. ข้าวเกรียบ. รายงานวิชาการอาหารจากธัญพืชและพืชหัว.
ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 51 น.

นิธิยา รัตนปนนท์. 2529. วิทยาศาสตร์การอาหารของไขมันและน้ำมัน. ภาควิชาวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

นุช ผลนาค. 2545. ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพอาหารขบเคี้ยวจากกระบวนการทอด. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ผักชี. แหล่งที่มา: <http://www.skn.ac.th/skl/skn422/ma/ma10.htm>, 10 มกราคม 2549.

พ่องพรรณ แสงสิงแก้ว. 2513. การทดลองและการปรับปรุงการทำข้าวเกรียบปลาหมึกและปลา
ราคาถูก. รายงานผลการทดลอง แผนกอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง, กรุงเทพฯ.
24 น.

ประเสริฐ สายสิทธิ์. 2524. ผลิตภัณฑ์ประมงและหลักการถนอม. โรงพิมพ์คุรุสภา, พระนคร.

เพลินใจ ดังคณะกุล. 2546. “การทำข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์คุณภาพ”. อาหาร.
2 (เมษายน-มิถุนายน 2546): 90-91.

พรรณี วงศ์ไกรศรีทอง. 2530. การผลิตข้าวเกรียบปลาโดยใช้เครื่องรีดแผ่น. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิศมัย หาญมงคลพิพัฒน์. 2550. **หลักสูตรที่ 1**. ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2549. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร**. ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร. 2533. **Snack Food**. เอกสารประกอบการจัดนิทรรศการ. คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 8 น. (โรเนียว)

วิจิต วัฒนาวิบูล. 2528. **เกลือ: เครื่องปรุงแร่ธรรมชาติมีคุณค่ามหาศาล**. หมอชาวบ้าน 6(72) : 40-42.

_____. 2530. **ผักชีโรยหน้าจริงหรือ?**. หมอชาวบ้าน 9(99): 40-41.

รวีพิมพ์ จวีสุข. 2547. **เอกสารการสอนวิชาเครือข่ายหน่วยประสาทเทียมและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร**. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

รองรัตน์ รัตนธรรมวัฒน์. 2546. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากแป้งเผือก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สิริลักษณ์ พรหมประสิทธิ์. 2544. **แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งผลไม้แบบถาดหมุน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุดาทิพย์ แซ่ตัน. 2550. **การลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนสารพิษอะฟลาทอกซินในถั่วลิสงดิบ ด้วยวิธีการคัดเลือกคุณภาพถั่วลิสงและโครงข่ายประสาทเทียม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุรางค์ ลาเกลี้ยง. 2534. การปรับปรุงคุณภาพและกรรมวิธีการผลิตข้าวเกรียบอยุธยา.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2530. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมข้าว
เกรียบ. มอก. 701-2530.

_____. 2546. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนข้าวเกรียบ. มพช.107/2546.

สมภพ จรุงธรรมโชติ. 2546. การทำนายการกระจายอุณหภูมิบนชิ้นงานเนื่องจากการนำความร้อนโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมยศ ตั้งเจริญจิตกุล. 2547. การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายระดับน้ำ
แม่น้ำปิง ณ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เสาวณีย์ เสือวรศิริกุล. 2550. รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการทุนอุดหนุนงานวิจัย
มก. ปีงบประมาณ 2546 โครงการวิจัยรหัส ส-ข (อก) 17.46 การหาสภาวะที่เหมาะสมใน
การผลิตข้าวเกรียบด้วยการคำนวณแบบละมุน (Process Optimization for Crispy
Product using Soft Computing). สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่ง
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อัมรินทร์ ศรวณีย์. 2548. การทำนายความชอบของเป็ยร์โดยใช้แบบจำลองความถดถอยและ
แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรพิน ภูมิภมร. 2533. ระบบชีวภาพที่สำคัญต่อเทคโนโลยีชีวภาพ, เล่มที่ 5 เทคโนโลยีของ
แป้ง: เคมีของแป้งและเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์จากแป้งบางชนิดที่ผลิตในประเทศไทย.
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2532. **ข้าวสาลี : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ

_____. 2549. **เบเกอรี่เทคโนโลยีเบื้องต้น**. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

A.O.A.C. 2000. **Official Methods of Analysis of AOAC International**. 17th ed.
Gaithersburg, Maryland

Block, Z. 1964. **Frying**, pp. 295-300. In M.A. Joyslyn and J.L. Heid (eds.). Food Processing Operations, their Management, Machines, Materials and Methods, vol.3. The AVI Publishing Co., Inc., Westport, Connecticut.

Brown , P. and I.D. Morton. 1969. **Fats and Fatty Foods**, pp. 193-194. In W.B. Adam (ed.). Food Industries Manual. 20th ed., Chemical Publishing Co., Inc., London. 509 p.

Chen, X.D., W. Pirini, M. Ozilgen. 2001. The reaction engineering approach to modeling drying of thin layer of pulped Kiwifruit flesh under conditions of small Biot numbers. **Chemical Engineering and Processing**. 40: 311- 320.

Chinnaswamy, R. and M.A. Hanna. 1988. Relationship between amylase content and Extrusion-expansion properties of corn starches. **Cereal Chemistry**. 65(2): 138-143.

Demuth, H. and M. Beale. 2002. **Neural Network Toolbox for Use with MATLAB for User's Guide**. The Math Works, Inc., The United States. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

- Farkas, I., P. Reményi and A. Biró. 2000. A neural network topology for modeling grain drying. **Computers and Electronics in Agriculture**. 26: 147- 158.
- _____. 2000. Modelling aspects of grain drying with a neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**. 29: 99 -113.
- Feldberg, C. 1969. **Extruded Starch-based Snacks**. Cereal Science. Today 14 : 212-214.
- Feustal, J.C., M.C. Juilly and W.O. Karrington. 1963. **Processing of frozen French fried potatoes and other frozen potato products**. USDA/ARS Report 74 (8) : 224.
- Fausett, L. 1994. **Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications**. Prentice Hall. Inc., USA.
- Fox, B.A. and A.G. Cameron. 1970. **Food Science : A Chemical Approach**. Hodder and Stoughton, London. 380 p.
- Gershenfeld, Neil. 1999. **The Nature of Mathematical Modeling**. 1 ed. Cambridge University Press, United Kingdom.
- Gutcho, M. 1973. **Prepared Snack Food**. Noyes Data Cooperation, NewJersey. 289 p.
- Cited* Lakleang Surang. 1991. Quality and Process Improvements of Cassava Cracker. M.S. Thesis, Kasetsart University.
- Hernández – Pérez, J.A., Garcia – Alvarado M.A., Trystram G., Heyd B. 2004. Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. 5: 57 -64.

Hui, Y.H. 1996. Bailey's **Industrial Oil and Fat Products Vol.2 Edible Oil and Fat Products Oil and Oil Seed**. 5th ed. A Wiley inter science publication.

Joslyn, M.A. and J.L. Hied. 1964. **Food Processing Operation. Vol. 3**. The AVI Publishing Co., Inc., Westport, Connecticut.

Knight, J.W. 1969. **The Starch Industry**. Pergamon Press, Oxford, London. 190 p.

Kulkarni A.D. 2001. Neural Networks Fundamentals, pp. 105-148. *In* Vincent J., Bernard G. and Michelle V., eds. **Computer Vision and Fuzzy-Neurals Systems**. Prentice Hall PRT, New Jersey.

Li, C.F. and B.S. Luh. 1980. **Rice snack food, pp. 690-711**. *In* B.S. Luh (ed.). Rice Production and Utilization. The AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut. 415p.

Lowe, B. 1966. **Experimental Cookery**. John Wiley & Sons, Inc., New York. 373p.

Maskan, M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering**. 44: 71-78.

Maskan A., Sevim Kaya, Medeni Maskan. 2002. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). **Journal of Food Engineering**. 54: 81- 88.

Matz, S.A. 1984. **Snack Food Technology**. The AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut. 415p.

_____. 1991. **The Chemistry and Technology of Cereal as Food and Feed**. 2th ed. An AVI Book Published, New York.

- Moreira G.R., M.E. Castell-Perez and M.A. Berrufet. 1999. **Deep – Fat Frying: Fundamentals and Applications**. Aspen Publishers, Inc., Gaithersburg, Maryland.
- Pylar, E.J. 1973. **Baking Science and Technology. Vol.II.**, Siebel Publishing Company, Chicago, Illinois. 1240p.
- Roman, G. N., Rotstein, E., & Urbicain, M. J. 1979. Kinetics of water vapour desorption from apples. **Journal of Food Science**. 44:193-197.
- Rozis, Jean – François. 1997. **Drying Foodstuffs**. Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands.
- Rywotycki R. 2002. The effect of fat temperature on heat energy consumption during frying of food. **Journal of Food Engineering**. 54: 257- 261.
- Seigel, A. 1974. **Development, acceptability and nutrition evaluation of new high protein rice—base food for Thai children**. Ph.D. Dissertation, Kansas State University, Kansas.
- Whistler, R.L., J.N. Bemiller and E.F. Paschall. 1984. **Starch : Chemistry and Technology**. Vol.I, Academic Press, New York. 718p.
- Williams, J.M. 1968. **The Chemical Evidence for The Structure of Starch, p. 102**. In J.A. Radley (ed.). *Starch and Its Derivatives*. 4th ed., Chapman and Hall Ltd., London.
- Yusheng, Z. and K. P. Poulsen. 1988. Diffusion in potato drying. **Journal of Food Engineering**. 7: 249-262.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความแตกต่างของค่าสีในระบบ L^* , a^* และ b^* ของข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูป

ตารางผนวกที่ ก1 ความแตกต่างของค่าสีในระบบ L*, a* และ b* ของข้าวเกรียบกุ้งสำเร็จรูป ณ เวลา 0-180 นาที

เวลา (นาที)	ค่าสี		
	L*	a*	b*
0	39.64 ^{bcd}	7.40 ^{cde}	11.44 ^c
10	38.77 ^d	7.11 ^c	11.08 ^c
20	38.87 ^d	7.09 ^c	11.20 ^c
30	39.43 ^{cd}	7.15 ^{de}	11.89 ^{bc}
40	41.14 ^{ab}	8.17 ^{abcd}	13.67 ^a
50	40.89 ^{abc}	7.72 ^{bcde}	13.44 ^{ab}
60	40.67 ^{abc}	7.71 ^{bcde}	13.01 ^{ab}
70	41.33 ^a	8.36 ^{abc}	14.39 ^a
80	42.02 ^a	8.72 ^{ab}	14.69 ^a
90	40.89 ^{abc}	8.03 ^{abcde}	13.52 ^a
100	41.55 ^a	8.61 ^{ab}	14.27 ^a
110	41.10 ^{abc}	8.06 ^{abcde}	13.59 ^a
120	41.92 ^a	8.83 ^a	14.53 ^a
130	41.84 ^a	8.58 ^{ab}	14.09 ^a
140	42.05 ^a	8.66 ^{ab}	14.62 ^a
150	42.11 ^a	9.02 ^a	14.69 ^a
160	41.98 ^a	8.71 ^{ab}	14.38 ^a
170	41.77 ^a	8.64 ^{ab}	14.36 ^a
180	41.74 ^a	8.91 ^a	14.43 ^a

หมายเหตุ ^{a-c} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก2 ความแตกต่างของค่าสีในระบบ L*, a* และ b* ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูป ณ อุณหภูมิของกระบวนการอบแห้ง 50-80 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าสี		
	L*	a*	b*
50	39.58 ^c	7.86 ^{cd}	13.11 ^d
55	41.31 ^b	8.50 ^{ab}	13.78 ^{bc}
60	42.91 ^a	7.68 ^d	14.76 ^a
65	41.75 ^b	8.82 ^a	14.31 ^{ab}
70	41.70 ^b	8.34 ^{abc}	13.80 ^{bc}
75	39.81 ^c	7.98 ^{bcd}	12.68 ^d
80	40.20 ^c	8.13 ^{bcd}	12.34 ^d

หมายเหตุ ^{a-d} หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวตั้งเดียวกัน มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายใยประสาทเทียม

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม
สำหรับการทำนายแบบที่ใช้ความชันของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็น
ข้อมูลออก

IW {1,1} Input weights (a_{ij})				
$a_{1,1} = 3.5642$	$a_{2,1} = 7.6782$	$a_{3,1} = -2.1033$		
$a_{1,2} = -1.6330$	$a_{2,2} = -8.6820$	$a_{3,2} = 1.6208$		
$a_{1,3} = -6.7764$	$a_{2,3} = -4.2527$	$a_{3,3} = 0.9043$		
$a_{1,4} = -5.2109$	$a_{2,4} = 1.6853$	$a_{3,4} = 5.4800$		
$a_{1,5} = 6.8981$	$a_{2,5} = -0.9415$	$a_{3,5} = -3.3731$		
$a_{1,6} = 3.4284$	$a_{2,6} = -3.0230$	$a_{3,6} = -6.3773$		
$a_{1,7} = -6.7356$	$a_{2,7} = -2.7579$	$a_{3,7} = 2.9644$		
$a_{1,8} = 5.3688$	$a_{2,8} = 3.1472$	$a_{3,8} = 4.8357$		
$a_{1,9} = -1.1864$	$a_{2,9} = -7.9110$	$a_{3,9} = 3.5959$		
$a_{1,10} = -6.2973$	$a_{2,10} = -1.9679$	$a_{3,10} = -4.1275$		
$a_{1,11} = 5.0722$	$a_{2,11} = 3.7200$	$a_{3,11} = -4.8614$		
$a_{1,12} = 5.7878$	$a_{2,12} = -4.9942$	$a_{3,12} = 2.8530$		
$a_{1,13} = 3.5313$	$a_{2,13} = 4.2353$	$a_{3,13} = 5.8077$		
$a_{1,14} = 4.2631$	$a_{2,14} = -5.812$	$a_{3,14} = -4.1116$		
$a_{1,15} = -0.2126$	$a_{2,15} = 5.0061$	$a_{3,15} = 6.3927$		
$a_{1,16} = 4.3666$	$a_{2,16} = -6.6757$	$a_{3,16} = 2.8954$		
$a_{1,17} = -5.7059$	$a_{2,17} = -1.493$	$a_{3,17} = 5.0164$		
$a_{1,18} = -1.3046$	$a_{2,18} = 5.5413$	$a_{3,18} = 5.9363$		
$a_{1,19} = 0.2836$	$a_{2,19} = 7.7492$	$a_{3,19} = -4.0035$		
$a_{1,20} = -7.4189$	$a_{2,20} = -0.4613$	$a_{3,20} = 2.1310$		
B {1} Bias weights จาก Input ไปยังหน่วยซ่อนของชั้นซ่อนที่ 1 (b_j)				
$b_1 = 0.0626$	$b_2 = 0.7423$	$b_3 = 0.16891$	$b_4 = 0.2053$	$b_5 = -0.0237$
$b_6 = 0.8853$	$b_7 = -0.3070$	$b_8 = -0.6006$	$b_9 = -0.8038$	$b_{10} = 0.3042$
$b_{11} = 0.2119$	$b_{12} = 0.6222$	$b_{13} = -0.0765$	$b_{14} = -0.8126$	$b_{15} = -0.7946$
$b_{16} = 0.7491$	$b_{17} = -0.8785$	$b_{18} = 0.6945$	$b_{19} = -0.0918$	$b_{20} = -0.5036$

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

LW{2,1} Last weight ไปยัง Output (b_{jl})				
$b_{1,1} = -6.4148$	$b_{2,1} = 5.4122$	$b_{3,1} = 5.4250$	$b_{4,1} = 5.6108$	$b_{5,1} = -4.7012$
$b_{6,1} = -4.2070$	$b_{7,1} = 2.4862$	$b_{8,1} = -1.5376$	$b_{9,1} = -0.0535$	$b_{10,1} = 0.1533$
$b_{11,1} = 0.8864$	$b_{12,1} = 0.29974$	$b_{13,1} = 2.6812$	$b_{14,1} = 1.7374$	$b_{15,1} = -2.7227$
$b_{16,1} = 3.2481$	$b_{17,1} = -5.3079$	$b_{18,1} = -5.0193$	$b_{19,1} = 8.0398$	$b_{20,1} = -7.5309$

B{2} Bias weights จากหน่วยซ่อนของชั้นที่ 2 ไปยัง Output (d_l)
$d_1 = 0.9772$

หมายเหตุ เมื่อกำหนดให้ $i = 1, 2$ และ $3 \leq j = 1, 2, \dots, 20 \quad l = 1$

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม
สำหรับการทำนายแบบที่ใช้ค่า a_w ของข้าวเกรียบกึ่งสำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

IW{1,1} Input weights (a_{ij})				
$a_{1,1} = 2.2223$	$a_{2,1} = -5.8986$	$a_{3,1} = 5.4734$		
$a_{1,2} = 5.6287$	$a_{2,2} = 1.5457$	$a_{3,2} = -4.9912$		
$a_{1,3} = 3.4083$	$a_{2,3} = -5.4437$	$a_{3,3} = 5.1664$		
$a_{1,4} = 4.8119$	$a_{2,4} = -4.3941$	$a_{3,4} = -4.6919$		
$a_{1,5} = 4.2500$	$a_{2,5} = -6.5952$	$a_{3,5} = -3.2630$		
$a_{1,6} = -1.6000$	$a_{2,6} = -6.8608$	$a_{3,6} = -4.8969$		
$a_{1,7} = 2.8182$	$a_{2,7} = -7.5058$	$a_{3,7} = -3.4873$		
$a_{1,8} = -5.6221$	$a_{2,8} = 5.8723$	$a_{3,8} = -1.7401$		
$a_{1,9} = 4.5775$	$a_{2,9} = -5.9010$	$a_{3,9} = -3.6932$		
$a_{1,10} = -4.2001$	$a_{2,10} = 6.3733$	$a_{3,10} = -3.6118$		
$a_{1,11} = 3.9614$	$a_{2,11} = -2.5795$	$a_{3,11} = 6.1860$		
$a_{1,12} = 3.1646$	$a_{2,12} = 7.5675$	$a_{3,12} = -3.0686$		
$a_{1,13} = -4.4439$	$a_{2,13} = 7.5178$	$a_{3,13} = 0.1495$		
$a_{1,14} = -5.0194$	$a_{2,14} = -4.4950$	$a_{3,14} = -4.3959$		
$a_{1,15} = -2.5822$	$a_{2,15} = -5.0219$	$a_{3,15} = -5.8948$		
$a_{1,16} = 5.8650$	$a_{2,16} = -2.8336$	$a_{3,16} = -4.2764$		
$a_{1,17} = 4.6460$	$a_{2,17} = -5.9194$	$a_{3,17} = 3.5844$		
$a_{1,18} = -4.2369$	$a_{2,18} = -2.7053$	$a_{3,18} = 5.9592$		
$a_{1,19} = 4.7790$	$a_{2,19} = -6.0101$	$a_{3,19} = -3.2912$		
$a_{1,20} = 2.2784$	$a_{2,20} = 4.5371$	$a_{3,20} = 6.2787$		
B{1} Bias weights จาก Input ไปยังหน่วยซ่อนของชั้นซ่อนที่ 1 (b_j)				
$b_1 = -8.7105$	$b_2 = -6.4783$	$b_3 = -7.0258$	$b_4 = -5.9505$	$b_5 = -5.5593$
$b_6 = 2.4076$	$b_7 = -4.1212$	$b_8 = 3.0728$	$b_9 = -2.2304$	$b_{10} = 1.5793$
$b_{11} = -0.1186$	$b_{12} = 2.5896$	$b_{13} = -0.6476$	$b_{14} = -3.5711$	$b_{15} = -4.4529$
$b_{16} = 3.9274$	$b_{17} = 4.1030$	$b_{18} = -6.5396$	$b_{19} = 5.7469$	$b_{20} = 8.3625$

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

LW{2,1} Last weight ไปยังหน่วยซ้อนของชั้นซ้อนที่ 2 (b_{jk})				
$b_{1,1}=0.9878$	$b_{2,1}=0.6982$	$b_{3,1}=1.4791$	$b_{4,1}=-2.1221$	$b_{5,1}=-1.8914$
$b_{6,1}=-2.3293$	$b_{7,1}=1.3940$	$b_{8,1}=-1.8497$	$b_{9,1}=-0.26581$	$b_{10,1}=-1.5304$
$b_{11,1}=-0.2132$	$b_{12,1}=1.0963$	$b_{13,1}=0.9006$	$b_{14,1}=-1.7179$	$b_{15,1}=1.2342$
$b_{16,1}=1.3182$	$b_{17,1}=-1.2036$	$b_{18,1}=2.1165$	$b_{19,1}=1.1076$	$b_{20,1}=1.3975$
$b_{1,2}=1.4596$	$b_{2,2}=-1.6311$	$b_{3,2}=0.5564$	$b_{4,2}=-1.5961$	$b_{5,2}=-0.1967$
$b_{6,2}=-1.4494$	$b_{7,2}=-1.4382$	$b_{8,2}=-1.3430$	$b_{9,2}=-1.7043$	$b_{10,2}=-1.6977$
$b_{11,2}=-1.8136$	$b_{12,2}=-1.9467$	$b_{13,2}=1.7130$	$b_{14,2}=0.88329$	$b_{15,2}=0.6208$
$b_{16,2}=-1.9528$	$b_{17,2}=1.2177$	$b_{18,2}=1.4991$	$b_{19,2}=-1.8600$	$b_{20,2}=-0.8276$
$b_{1,3}=-0.1138$	$b_{2,3}=1.5019$	$b_{3,3}=-1.0819$	$b_{4,3}=-0.5029$	$b_{5,3}=2.0625$
$b_{6,3}=-0.0286$	$b_{7,3}=-2.4286$	$b_{8,3}=-0.4824$	$b_{9,3}=-0.7023$	$b_{10,3}=1.8103$
$b_{11,3}=0.34881$	$b_{12,3}=0.57615$	$b_{13,3}=-0.1253$	$b_{14,3}=2.2321$	$b_{15,3}=1.7343$
$b_{16,3}=1.6591$	$b_{17,3}=2.4276$	$b_{18,3}=1.1095$	$b_{19,3}=-2.2228$	$b_{20,3}=1.0900$
$b_{1,4}=-0.0200$	$b_{2,4}=2.3550$	$b_{3,4}=0.8069$	$b_{4,4}=1.5888$	$b_{5,4}=-0.5434$
$b_{6,4}=-2.3147$	$b_{7,4}=-0.6259$	$b_{8,4}=0.3029$	$b_{9,4}=-1.2579$	$b_{10,4}=-1.8352$
$b_{11,4}=-0.6402$	$b_{12,4}=2.2906$	$b_{13,4}=-1.8596$	$b_{14,4}=-1.651$	$b_{15,4}=-0.6305$
$b_{16,4}=0.7110$	$b_{17,4}=-1.8611$	$b_{18,4}=-0.9757$	$b_{19,4}=1.9721$	$b_{20,4}=-1.2069$
$b_{1,5}=-1.1334$	$b_{2,5}=1.1458$	$b_{3,5}=-0.7574$	$b_{4,5}=1.9765$	$b_{5,5}=-1.3188$
$b_{6,5}=-1.4540$	$b_{7,5}=-0.6747$	$b_{8,5}=-1.2340$	$b_{9,5}=2.2665$	$b_{10,5}=2.0527$
$b_{11,5}=1.5619$	$b_{12,5}=-0.5472$	$b_{13,5}=-0.0862$	$b_{14,5}=-2.4377$	$b_{15,5}=-1.0337$
$b_{16,5}=-1.7152$	$b_{17,5}=0.9966$	$b_{18,5}=1.7568$	$b_{19,5}=1.4077$	$b_{20,5}=1.1375$
$b_{1,6}=-2.3193$	$b_{2,6}=1.4894$	$b_{3,6}=2.3147$	$b_{4,6}=-2.5220$	$b_{5,6}=-0.7692$
$b_{6,6}=-0.9092$	$b_{7,6}=-0.0844$	$b_{8,6}=1.5015$	$b_{9,6}=0.6841$	$b_{10,6}=0.0778$
$b_{11,6}=1.5595$	$b_{12,6}=1.2231$	$b_{13,6}=2.3538$	$b_{14,6}=-0.1101$	$b_{15,6}=-0.6830$
$b_{16,6}=0.1553$	$b_{17,6}=-1.071$	$b_{18,6}=2.4859$	$b_{19,6}=0.4367$	$b_{20,6}=1.1641$
$b_{1,7}=-1.2662$	$b_{2,7}=-1.3989$	$b_{3,7}=-0.0657$	$b_{4,7}=1.211$	$b_{5,7}=1.2952$
$b_{6,7}=2.1294$	$b_{7,7}=2.5024$	$b_{8,7}=-0.5977$	$b_{9,7}=2.0166$	$b_{10,7}=2.4714$
$b_{11,7}=-0.6241$	$b_{12,7}=0.9842$	$b_{13,7}=-0.7049$	$b_{14,7}=-2.1645$	$b_{15,7}=1.1021$

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

LW{2,1} Last weight ไปยังหน่วยซ้อนของชั้นซ้อนที่ 2 (b_{jk}) (ต่อ)				
$b_{16,7} = -1.4992$	$b_{17,7} = 0.7847$	$b_{18,7} = -1.0655$	$b_{19,7} = 0.9884$	$b_{20,7} = 1.2435$
$b_{1,8} = -1.4874$	$b_{2,8} = -1.4425$	$b_{3,8} = -1.9390$	$b_{4,8} = 1.6498$	$b_{5,8} = 0.7150$
$b_{6,8} = -0.8830$	$b_{7,8} = -0.7487$	$b_{8,8} = -2.2235$	$b_{9,8} = 0.6716$	$b_{10,8} = -1.7991$
$b_{11,8} = -1.1720$	$b_{12,8} = 2.2685$	$b_{13,8} = -0.8131$	$b_{14,8} = 0.7113$	$b_{15,8} = -1.5722$
$b_{16,8} = 0.2278$	$b_{17,8} = -0.1718$	$b_{18,8} = 2.3612$	$b_{19,8} = 2.2146$	$b_{20,8} = 0.5799$
$b_{1,9} = 1.9001$	$b_{2,9} = -1.0787$	$b_{3,9} = 0.7919$	$b_{4,9} = 1.0414$	$b_{5,9} = 2.0035$
$b_{6,9} = -1.1313$	$b_{7,9} = -1.1267$	$b_{8,9} = 0.3895$	$b_{9,9} = 1.3594$	$b_{10,9} = -2.0578$
$b_{11,9} = -0.7155$	$b_{12,9} = -1.3494$	$b_{13,9} = 1.2431$	$b_{14,9} = 2.0604$	$b_{15,9} = 1.4292$
$b_{16,9} = -2.0125$	$b_{17,9} = 1.9261$	$b_{18,9} = -0.2699$	$b_{19,9} = 0.2293$	$b_{20,9} = 2.2313$
$b_{1,10} = -2.1274$	$b_{2,10} = 1.2073$	$b_{3,10} = 0.0840$	$b_{4,10} = 2.5700$	$b_{5,10} = 1.8794$
$b_{6,10} = -0.3784$	$b_{7,10} = 0.4793$	$b_{8,10} = 0.3306$	$b_{9,10} = -0.3669$	$b_{10,10} = -0.6767$
$b_{11,10} = 2.6417$	$b_{12,10} = 0.5268$	$b_{13,10} = -1.1448$	$b_{14,10} = -0.2388$	$b_{15,10} = -0.1907$
$b_{16,10} = 0.4946$	$b_{17,10} = -1.4585$	$b_{18,10} = -2.7884$	$b_{19,10} = 1.5654$	$b_{20,10} = -1.9631$
$b_{1,11} = -2.5428$	$b_{2,11} = 2.496$	$b_{3,11} = -1.4551$	$b_{4,11} = 0.8171$	$b_{5,11} = -0.1569$
$b_{6,11} = 1.7893$	$b_{7,11} = 0.1238$	$b_{8,11} = -1.5642$	$b_{9,11} = 2.5145$	$b_{10,11} = -0.4557$
$b_{11,11} = -0.1055$	$b_{12,11} = 2.3599$	$b_{13,11} = -1.6836$	$b_{14,11} = 0.1927$	$b_{15,11} = 1.1617$
$b_{16,11} = -0.4384$	$b_{17,11} = 0.8370$	$b_{18,11} = -1.0876$	$b_{19,11} = 0.5767$	$b_{20,11} = -1.5505$
$b_{1,12} = -0.6378$	$b_{2,12} = 0.6712$	$b_{3,12} = 1.1014$	$b_{4,12} = 1.1861$	$b_{5,12} = 0.6356$
$b_{6,12} = -1.5444$	$b_{7,12} = -1.6475$	$b_{8,12} = -2.0195$	$b_{9,12} = -1.9777$	$b_{10,12} = -0.4826$
$b_{11,12} = -0.6445$	$b_{12,12} = -1.1734$	$b_{13,12} = 0.9339$	$b_{14,12} = -2.122$	$b_{15,12} = 2.4223$
$b_{16,12} = -1.5348$	$b_{17,12} = -0.8209$	$b_{18,12} = 0.9392$	$b_{19,12} = 2.3916$	$b_{20,12} = 1.563$
$b_{1,13} = 1.1012$	$b_{2,13} = 0.2545$	$b_{3,13} = -2.3935$	$b_{4,13} = -0.8594$	$b_{5,13} = -2.4493$
$b_{6,13} = 0.0453$	$b_{7,13} = -0.0754$	$b_{8,13} = 2.4017$	$b_{9,13} = 0.1523$	$b_{10,13} = -0.4379$
$b_{11,13} = 1.4667$	$b_{12,13} = 0.0813$	$b_{13,13} = -1.3086$	$b_{14,13} = -0.0339$	$b_{15,13} = -0.7622$
$b_{16,13} = -2.4175$	$b_{17,13} = -0.1288$	$b_{18,13} = -0.0396$	$b_{19,13} = -2.5043$	$b_{20,13} = -2.4479$
$b_{1,14} = 2.1384$	$b_{2,14} = 1.9116$	$b_{3,14} = 2.5491$	$b_{4,14} = 2.1092$	$b_{5,14} = 0.2317$
$b_{6,14} = -0.2623$	$b_{7,14} = -0.0216$	$b_{8,14} = -1.3216$	$b_{9,14} = 0.2507$	$b_{10,14} = -0.6758$

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

LW{2,1} Last weight ไปยังหน่วยซ้อนของชั้นซ้อนที่ 2 (b_{jk}) (ต่อ)				
$b_{11,14} = -0.6747$	$b_{12,14} = 0.7487$	$b_{13,14} = -0.2321$	$b_{14,14} = -0.4528$	$b_{15,14} = 1.2678$
$b_{16,14} = -2.3354$	$b_{17,14} = -0.1715$	$b_{18,14} = -2.2877$	$b_{19,14} = 2.6659$	$b_{20,14} = 0.2114$
$b_{1,15} = 0.52172$	$b_{2,15} = 1.6808$	$b_{3,15} = -1.6265$	$b_{4,15} = -0.8499$	$b_{5,15} = -0.2463$
$b_{6,15} = -0.9704$	$b_{7,15} = 1.9094$	$b_{8,15} = -1.6459$	$b_{9,15} = -1.1999$	$b_{10,15} = 2.2663$
$b_{11,15} = 2.2272$	$b_{12,15} = -0.5510$	$b_{13,15} = 1.9122$	$b_{14,15} = -1.1558$	$b_{15,15} = 0.8327$
$b_{16,15} = -1.0569$	$b_{17,15} = 1.1457$	$b_{18,15} = -1.6926$	$b_{19,15} = -1.6428$	$b_{20,15} = -1.7239$
$b_{1,16} = -1.6034$	$b_{2,16} = 0.7860$	$b_{3,16} = -1.5827$	$b_{4,16} = -2.0574$	$b_{5,16} = 1.6957$
$b_{6,16} = -0.5600$	$b_{7,16} = 1.4300$	$b_{8,16} = -2.1053$	$b_{9,16} = -0.6033$	$b_{10,16} = 0.7947$
$b_{11,16} = -1.4785$	$b_{12,16} = -0.0625$	$b_{13,16} = 1.7817$	$b_{14,16} = -0.9823$	$b_{15,16} = 0.8469$
$b_{16,16} = 2.0740$	$b_{17,16} = -1.2145$	$b_{18,16} = 2.2305$	$b_{19,16} = 1.9264$	$b_{20,16} = 0.4646$
$b_{1,17} = -0.9037$	$b_{2,17} = 0.84294$	$b_{3,17} = 0.6814$	$b_{4,17} = 1.0768$	$b_{5,17} = 1.7511$
$b_{6,17} = 1.9053$	$b_{7,17} = 1.7639$	$b_{8,17} = 0.5233$	$b_{9,17} = -2.1461$	$b_{10,17} = 2.2769$
$b_{11,17} = -0.6491$	$b_{12,17} = 1.2348$	$b_{13,17} = 0.9861$	$b_{14,17} = 1.2515$	$b_{15,17} = -2.4275$
$b_{16,17} = 2.3700$	$b_{17,17} = 1.0708$	$b_{18,17} = -0.6596$	$b_{19,17} = 0.8161$	$b_{20,17} = -1.0242$
$b_{1,18} = -1.2809$	$b_{2,18} = 1.5406$	$b_{3,18} = -2.4012$	$b_{4,18} = 2.2015$	$b_{5,18} = -0.1333$
$b_{6,18} = 1.2552$	$b_{7,18} = 0.5273$	$b_{8,18} = 0.2226$	$b_{9,18} = 0.2152$	$b_{10,18} = -1.6192$
$b_{11,18} = 2.0057$	$b_{12,18} = -1.796$	$b_{13,18} = 1.2285$	$b_{14,18} = -1.9372$	$b_{15,18} = 0.74062$
$b_{16,18} = 0.2648$	$b_{17,18} = 1.7546$	$b_{18,18} = -1.7324$	$b_{19,18} = -0.1810$	$b_{20,18} = -1.9637$
$b_{1,19} = -1.9542$	$b_{2,19} = 1.8703$	$b_{3,19} = -0.6534$	$b_{4,19} = -1.3642$	$b_{5,19} = 1.1406$
$b_{6,19} = 1.5256$	$b_{7,19} = 0.2613$	$b_{8,19} = -1.6067$	$b_{9,19} = 1.3372$	$b_{10,19} = 0.9884$
$b_{11,19} = 0.06327$	$b_{12,19} = -1.8165$	$b_{13,19} = 1.8863$	$b_{14,19} = -1.6819$	$b_{15,19} = 1.7699$
$b_{16,19} = 1.942$	$b_{17,19} = -0.3538$	$b_{18,19} = -1.929$	$b_{19,19} = -1.7955$	$b_{20,19} = 0.0269$
$b_{1,20} = -0.7825$	$b_{2,20} = -0.0992$	$b_{3,20} = -1.7071$	$b_{4,20} = -0.6349$	$b_{5,20} = 1.184$
$b_{6,20} = -0.3233$	$b_{7,20} = 0.84935$	$b_{8,20} = 1.0398$	$b_{9,20} = -2.6921$	$b_{10,20} = -0.9558$
$b_{11,20} = -3.1097$	$b_{12,20} = -0.9796$	$b_{13,20} = -0.7427$	$b_{14,20} = 1.6768$	$b_{15,20} = 0.8597$
$b_{16,20} = 1.4540$	$b_{17,20} = -0.5708$	$b_{18,20} = 1.0675$	$b_{19,20} = -0.3002$	$b_{20,20} = 2.9157$

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียม
สำหรับการทำนายแบบที่ใช้ค่าเนื้อสัมผัสโดยวิธีทางกลของข้าวเกรียบกึ่ง
สำเร็จรูปเป็นข้อมูลออก

IW{1,1} Input weights (a_{ij})				
$a_{1,1} = -2.3724$	$a_{2,1} = 3.0071$	$a_{3,1} = -1.0328$	$a_{4,1} = 2.9878$	$a_{5,1} = 1.149$
$a_{1,2} = 0.7395$	$a_{2,2} = -1.9307$	$a_{3,2} = -0.9084$	$a_{4,2} = 1.9988$	$a_{5,2} = 4.1098$
$a_{1,3} = -4.1031$	$a_{2,3} = -2.2743$	$a_{3,3} = 0.8488$	$a_{4,3} = 1.7373$	$a_{5,3} = 0.4885$
$a_{1,4} = -1.1761$	$a_{2,4} = 3.2469$	$a_{3,4} = -3.377$	$a_{4,4} = -1.3667$	$a_{5,4} = -0.8874$
$a_{1,5} = 0.9434$	$a_{2,5} = -1.9209$	$a_{3,5} = -3.3148$	$a_{4,5} = -2.3968$	$a_{5,5} = -2.1617$
$a_{1,6} = 2.1106$	$a_{2,6} = 2.9566$	$a_{3,6} = -0.4015$	$a_{4,6} = -3.3398$	$a_{5,6} = 1.2142$
$a_{1,7} = 1.4022$	$a_{2,7} = 2.9723$	$a_{3,7} = 2.6919$	$a_{4,7} = -2.248$	$a_{5,7} = 1.6984$
$a_{1,8} = -3.1437$	$a_{2,8} = -2.0264$	$a_{3,8} = 3.2821$	$a_{4,8} = -0.5861$	$a_{5,8} = -0.9381$
$a_{1,9} = -0.3315$	$a_{2,9} = -1.8936$	$a_{3,9} = -1.711$	$a_{4,9} = 2.5858$	$a_{5,9} = -3.5603$
$a_{1,10} = -0.5177$	$a_{2,10} = -4.0074$	$a_{3,10} = -3.0235$	$a_{4,10} = -0.0867$	$a_{5,10} = -0.7133$
$a_{1,11} = -1.0553$	$a_{2,11} = -3.0319$	$a_{3,11} = 2.6813$	$a_{4,11} = 2.272$	$a_{5,11} = 1.8242$
$a_{1,12} = -3.2432$	$a_{2,12} = 1.3184$	$a_{3,12} = -2.4542$	$a_{4,12} = -0.3673$	$a_{5,12} = 2.7515$
$a_{1,13} = 1.5685$	$a_{2,13} = -2.7604$	$a_{3,13} = 1.3023$	$a_{4,13} = -0.3808$	$a_{5,13} = 3.7502$
$a_{1,14} = 1.4402$	$a_{2,14} = 2.486$	$a_{3,14} = 3.3754$	$a_{4,14} = -0.3564$	$a_{5,14} = 2.4922$
$a_{1,15} = 2.5278$	$a_{2,15} = -3.6232$	$a_{3,15} = 1.8325$	$a_{4,15} = -0.9753$	$a_{5,15} = -1.4694$
$a_{1,16} = -0.1696$	$a_{2,16} = -2.5836$	$a_{3,16} = 2.9067$	$a_{4,16} = 3.1518$	$a_{5,16} = 0.9480$
$a_{1,17} = 0.3154$	$a_{2,17} = 2.8431$	$a_{3,17} = -2.8188$	$a_{4,17} = -2.8438$	$a_{5,17} = 1.3303$
$a_{1,18} = -3.0032$	$a_{2,18} = -0.4771$	$a_{3,18} = -2.8767$	$a_{4,18} = -1.6056$	$a_{5,18} = -2.4259$
$a_{1,19} = -0.3561$	$a_{2,19} = -1.1569$	$a_{3,19} = 2.3055$	$a_{4,19} = -3.2608$	$a_{5,19} = 2.9279$
$a_{1,20} = 3.0747$	$a_{2,20} = -2.646$	$a_{3,20} = -0.9946$	$a_{4,20} = 2.7513$	$a_{5,20} = 0.9856$

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

B{1} Bias weights จาก Input ไปยังหน่วยซ่อนของชั้นซ่อนที่ 1 (b_j)				
$b_1 = 5.0976$	$b_2 = -4.561$	$b_3 = 4.0244$	$b_4 = 3.4878$	$b_5 = -2.9512$
$b_6 = -2.4146$	$b_7 = -1.8781$	$b_8 = 1.3415$	$b_9 = 0.8048$	$b_{10} = 0.2682$
$b_{11} = -0.2682$	$b_{12} = -0.8048$	$b_{13} = 1.3415$	$b_{14} = 1.8781$	$b_{15} = 2.4146$
$b_{16} = -2.9512$	$b_{17} = 3.4878$	$b_{18} = -4.0244$	$b_{19} = -4.561$	$b_{20} = 5.0976$
LW{2,1} Last weight ไปยัง Output (b_{jl})				
$b_{1,1} = 0.2635$	$b_{2,1} = 0.8631$	$b_{3,1} = -0.2161$	$b_{4,1} = -0.2056$	$b_{5,1} = 0.6751$
$b_{6,1} = 0.1893$	$b_{7,1} = 0.02262$	$b_{8,1} = -0.6281$	$b_{9,1} = 0.61328$	$b_{10,1} = -0.7707$
$b_{11,1} = -0.7199$	$b_{12,1} = 0.3479$	$b_{13,1} = -0.8822$	$b_{14,1} = -0.4764$	$b_{15,1} = 0.1421$
$b_{16,1} = 0.5010$	$b_{17,1} = 0.2685$	$b_{18,1} = 0.8909$	$b_{19,1} = -0.4928$	$b_{20,1} = 0.4653$
$b_{1,2} = -0.5311$	$b_{2,2} = -0.3296$	$b_{3,2} = 0.2546$	$b_{4,2} = -0.1727$	$b_{5,2} = -0.2567$
$b_{6,2} = 0.1314$	$b_{7,2} = 0.5528$	$b_{8,2} = 0.4012$	$b_{9,2} = 0.4071$	$b_{10,2} = 0.3297$
$b_{11,2} = 0.1335$	$b_{12,2} = 0.9988$	$b_{13,2} = -0.2793$	$b_{14,2} = 0.1946$	$b_{15,2} = 0.4017$
$b_{16,2} = 0.4799$	$b_{17,2} = 0.6060$	$b_{18,2} = 0.8318$	$b_{19,2} = 0.7469$	$b_{20,2} = -0.1555$
$b_{1,3} = 0.0975$	$b_{2,3} = 0.3110$	$b_{3,3} = 0.3981$	$b_{4,3} = 0.31043$	$b_{5,3} = -0.1494$
$b_{6,3} = 0.4330$	$b_{7,3} = -0.0213$	$b_{8,3} = 0.9654$	$b_{9,3} = -0.0300$	$b_{10,3} = -0.2692$
$b_{11,3} = 0.6460$	$b_{12,3} = 0.9232$	$b_{13,3} = 0.09702$	$b_{14,3} = -0.9014$	$b_{15,3} = 0.9245$
$b_{16,3} = -0.1362$	$b_{17,3} = -0.8322$	$b_{18,3} = 0.2039$	$b_{19,3} = 0.0268$	$b_{20,3} = 0.9227$
B{2} Bias weights จากหน่วยซ่อนของชั้นที่ 2 ไปยัง Output (d_l)				
$d_1 = -0.8558$	$d_2 = 0.1068$	$d_3 = -0.4160$		

หมายเหตุ เมื่อกำหนดให้ $i = 1, 2$ และ 3 $j = 1, 2, \dots, 20$ $l = 3$

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างที่เหมาะสมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ
ที่ทำนายจากคุณลักษณะทั้งหมด

IW{1,1} Input weights (a_{ij})			
$a_{1,1} = 1.6948$	$a_{2,1} = -2.2043$	$a_{3,1} = 0.0729$	$a_{4,1} = -1.7762$
$a_{5,1} = 0.0633$	$a_{6,1} = -2.3216$	$a_{7,1} = 0.8430$	
$a_{1,2} = -0.4923$	$a_{2,2} = -0.6471$	$a_{3,2} = -0.3785$	$a_{4,2} = 3.4415$
$a_{5,2} = -0.3124$	$a_{6,2} = 0.6119$	$a_{7,2} = 1.9687$	
$a_{1,3} = -1.5872$	$a_{2,3} = 1.833$	$a_{3,3} = 0.1329$	$a_{4,3} = -1.12$
$a_{5,3} = 2.0454$	$a_{6,3} = -2.3313$	$a_{7,3} = -0.4753$	
$a_{1,4} = 0.7410$	$a_{2,4} = -2.042$	$a_{3,4} = -0.8111$	$a_{4,4} = -0.4490$
$a_{5,4} = -0.1978$	$a_{6,4} = 2.7231$	$a_{7,4} = -1.9906$	
$a_{1,5} = 2.4172$	$a_{2,5} = -2.3601$	$a_{3,5} = 0.7586$	$a_{4,5} = -1.7621$
$a_{5,5} = 0.09218$	$a_{6,5} = 1.2054$	$a_{7,5} = -0.6640$	
$a_{1,6} = 0.6572$	$a_{2,6} = 1.6865$	$a_{3,6} = 1.7835$	$a_{4,6} = 0.2195$
$a_{5,6} = -1.4252$	$a_{6,6} = 1.7885$	$a_{7,6} = 2.2935$	
$a_{1,7} = -1.4774$	$a_{2,7} = -1.3674$	$a_{3,7} = 2.0366$	$a_{4,7} = -2.2582$
$a_{5,7} = 0.4463$	$a_{6,7} = -1.8563$	$a_{7,7} = -0.2252$	
$a_{1,8} = 2.3587$	$a_{2,8} = -0.8692$	$a_{3,8} = 0.2471$	$a_{4,8} = -0.5392$
$a_{5,8} = 0.81$	$a_{6,8} = -0.2173$	$a_{7,8} = 3.1019$	
$a_{1,9} = -2.2403$	$a_{2,9} = 0.8449$	$a_{3,9} = 2.0722$	$a_{4,9} = -1.8782$
$a_{5,9} = 0.7063$	$a_{6,9} = -0.6919$	$a_{7,9} = -1.5696$	
$a_{1,10} = 2.2843$	$a_{2,10} = 2.8495$	$a_{3,10} = 0.6990$	$a_{4,10} = 0.4217$
$a_{5,10} = 0.62585$	$a_{6,10} = -1.5506$	$a_{7,10} = -0.442$	
$a_{1,11} = -1.1841$	$a_{2,11} = 0.7330$	$a_{3,11} = -1.9307$	$a_{4,11} = -1.9529$
$a_{5,11} = 1.0686$	$a_{6,11} = -1.8624$	$a_{7,11} = 1.7043$	
$a_{1,12} = -1.4804$	$a_{2,12} = -1.7776$	$a_{3,12} = -1.5656$	$a_{4,12} = 0.7099$
$a_{5,12} = -1.6576$	$a_{6,12} = -0.5833$	$a_{7,12} = 2.3668$	
$a_{1,13} = 2.7874$	$a_{2,13} = 0.4493$	$a_{3,13} = -0.1898$	$a_{4,13} = -0.6288$
$a_{5,13} = 1.983$	$a_{6,13} = -2.1483$	$a_{7,13} = -0.2127$	

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

IW{1,1} Input weights (a_{ij}) (ต่อ)			
$a_{1,14} = 0.7247$	$a_{2,14} = 1.086$	$a_{3,14} = 0.66793$	$a_{4,14} = -1.0209$
$a_{5,14} = 2.9229$	$a_{6,14} = -2.1025$	$a_{7,14} = -0.9158$	
$a_{1,15} = -2.4935$	$a_{2,15} = -1.0304$	$a_{3,15} = -2.0201$	$a_{4,15} = -1.3185$
$a_{5,15} = 0.8977$	$a_{6,15} = -0.6617$	$a_{7,15} = -1.6289$	

LW{2,1} Last weight ไปยังหน่วยซ่อนของชั้นซ่อนที่ 2 (b_{jk})				
$b_{1,1} = -1.2958$	$b_{2,1} = 0.7744$	$b_{3,1} = 1.4365$	$b_{4,1} = 0.2656$	$b_{5,1} = 1.2687$
$b_{6,1} = 0.1687$	$b_{7,1} = -0.9316$	$b_{8,1} = 3.2551$	$b_{9,1} = -0.7019$	$b_{10,1} = -1.2187$
$b_{11,1} = 2.1489$	$b_{12,1} = 3.4013$	$b_{13,1} = -0.6839$	$b_{14,1} = 2.1135$	$b_{15,1} = -2.0937$
$b_{1,2} = 2.1483$	$b_{2,2} = 2.3697$	$b_{3,2} = -2.3015$	$b_{4,2} = 1.6911$	$b_{5,2} = 2.2589$
$b_{6,2} = 0.6638$	$b_{7,2} = 0.32434$	$b_{8,2} = 0.8985$	$b_{9,2} = 1.4445$	$b_{10,2} = -2.0364$
$b_{11,2} = 1.0790$	$b_{12,2} = 2.4579$	$b_{13,2} = 0.5492$	$b_{14,2} = -2.4932$	$b_{15,2} = -0.4448$
$b_{1,3} = -2.1272$	$b_{2,3} = -1.0623$	$b_{3,3} = -2.217$	$b_{4,3} = -1.2757$	$b_{5,3} = -2.2483$
$b_{6,3} = -1.7863$	$b_{7,3} = 1.1900$	$b_{8,3} = -2.0487$	$b_{9,3} = -0.5753$	$b_{10,3} = 1.2184$
$b_{11,3} = -2.4751$	$b_{12,3} = 2.3998$	$b_{13,3} = -1.3306$	$b_{14,3} = 1.149$	$b_{15,3} = -1.4666$
$b_{1,4} = -1.5059$	$b_{2,4} = 1.5825$	$b_{3,4} = 0.1411$	$b_{4,4} = -0.8127$	$b_{5,4} = 2.2753$
$b_{6,4} = -0.2912$	$b_{7,4} = 2.8822$	$b_{8,4} = -1.4603$	$b_{9,4} = 2.3383$	$b_{10,4} = 0.7728$
$b_{11,4} = -1.2840$	$b_{12,4} = 1.9046$	$b_{13,4} = 1.9712$	$b_{14,4} = 2.7181$	$b_{15,4} = 1.1087$
$b_{1,5} = -2.8358$	$b_{2,5} = -2.0711$	$b_{3,5} = 0.8832$	$b_{4,5} = 1.0485$	$b_{5,5} = -0.45842$
$b_{6,5} = -0.5364$	$b_{7,5} = -0.0840$	$b_{8,5} = -2.1100$	$b_{9,5} = -0.5445$	$b_{10,5} = -1.7919$
$b_{11,5} = -1.9444$	$b_{12,5} = -2.6974$	$b_{13,5} = -2.5436$	$b_{14,5} = -0.9861$	$b_{15,5} = 1.9552$
$b_{1,6} = 3.0579$	$b_{2,6} = 0.73469$	$b_{3,6} = -1.6409$	$b_{4,6} = -1.8643$	$b_{5,6} = -0.27274$
$b_{6,6} = 2.5168$	$b_{7,6} = -3.0749$	$b_{8,6} = -1.3707$	$b_{9,6} = -0.7580$	$b_{10,6} = -0.2229$
$b_{11,6} = -1.8264$	$b_{12,6} = -1.2797$	$b_{13,6} = -1.6463$	$b_{14,6} = -1.0619$	$b_{15,6} = -1.3271$
$b_{1,7} = -2.6364$	$b_{2,7} = 0.8123$	$b_{3,7} = -2.3727$	$b_{4,7} = -2.0142$	$b_{5,7} = 0.7739$
$b_{6,7} = -0.6518$	$b_{7,7} = 1.8570$	$b_{8,7} = 1.8227$	$b_{9,7} = -2.7135$	$b_{10,7} = -1.5431$
$b_{11,7} = -2.6724$	$b_{12,7} = 1.4657$	$b_{13,7} = -0.0864$	$b_{14,7} = 0.3903$	$b_{15,7} = -0.8436$

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

LW{2,1} Last weight ไปยังหน่วยซ้อนของชั้นซ้อนที่ 2 (b_{jk}) (ต่อ)				
$b_{1,8}=2.1747$	$b_{2,8}=1.6009$	$b_{3,8}=-1.3624$	$b_{4,8}=0.2615$	$b_{5,8}=1.2601$
$b_{6,8}=-1.6057$	$b_{7,8}=-0.79349$	$b_{8,8}=1.0798$	$b_{9,8}=2.5055$	$b_{10,8}=-2.5772$
$b_{11,8}=-2.3952$	$b_{12,8}=-2.0539$	$b_{13,8}=2.3343$	$b_{14,8}=1.1868$	$b_{15,8}=0.2947$
$b_{1,9}=-1.8747$	$b_{2,9}=-0.9329$	$b_{3,9}=1.9165$	$b_{4,9}=-2.4669$	$b_{5,9}=2.5405$
$b_{6,9}=1.6217$	$b_{7,9}=-1.0455$	$b_{8,9}=0.5271$	$b_{9,9}=2.1600$	$b_{10,9}=-1.9681$
$b_{11,9}=-0.5462$	$b_{12,9}=2.2302$	$b_{13,9}=-2.2131$	$b_{14,9}=-1.0005$	$b_{15,9}=-0.8302$
$b_{1,10}=-1.7984$	$b_{2,10}=-0.9232$	$b_{3,10}=2.1995$	$b_{4,10}=-2.0669$	$b_{5,10}=2.6093$
$b_{6,10}=-0.4722$	$b_{7,10}=2.0214$	$b_{8,10}=-2.8083$	$b_{9,10}=-0.2322$	$b_{10,10}=0.3592$
$b_{11,10}=-1.6253$	$b_{12,10}=-0.2514$	$b_{13,10}=-0.3407$	$b_{14,10}=1.9375$	$b_{15,10}=2.4574$
$b_{1,11}=-1.8269$	$b_{2,11}=-1.3405$	$b_{3,11}=0.8247$	$b_{4,11}=0.1913$	$b_{5,11}=-2.6159$
$b_{6,11}=-0.6212$	$b_{7,11}=-2.187$	$b_{8,11}=1.8804$	$b_{9,11}=0.3343$	$b_{10,11}=2.1338$
$b_{11,11}=-2.1073$	$b_{12,11}=2.6499$	$b_{13,11}=-1.5856$	$b_{14,11}=1.694$	$b_{15,11}=-1.4445$
$b_{1,12}=2.0444$	$b_{2,12}=3.1103$	$b_{3,12}=2.7609$	$b_{4,12}=-0.5305$	$b_{5,12}=-0.8764$
$b_{6,12}=1.5946$	$b_{7,12}=-0.9309$	$b_{8,12}=-1.9943$	$b_{9,12}=-0.0487$	$b_{10,12}=2.9606$
$b_{11,12}=-0.4908$	$b_{12,12}=-0.6348$	$b_{13,12}=2.2716$	$b_{14,12}=-0.1002$	$b_{15,12}=-0.7097$
$b_{1,13}=0.4548$	$b_{2,13}=1.5391$	$b_{3,13}=3.5071$	$b_{4,13}=-0.7027$	$b_{5,13}=1.1874$
$b_{6,13}=0.7961$	$b_{7,13}=1.0609$	$b_{8,13}=-0.0373$	$b_{9,13}=3.7362$	$b_{10,13}=1.5118$
$b_{11,13}=-1.6480$	$b_{12,13}=2.3458$	$b_{13,13}=0.0339$	$b_{14,13}=-0.5134$	$b_{15,13}=-1.3153$
$b_{1,14}=0.7732$	$b_{2,14}=0.9658$	$b_{3,14}=2.0913$	$b_{4,14}=1.5561$	$b_{5,14}=-2.2095$
$b_{6,14}=-1.9584$	$b_{7,14}=-2.182$	$b_{8,14}=-2.2008$	$b_{9,14}=-2.2214$	$b_{10,14}=-1.2468$
$b_{11,14}=1.6611$	$b_{12,14}=-2.1083$	$b_{13,14}=1.2571$	$b_{14,14}=-1.6838$	$b_{15,14}=-0.4909$
$b_{1,15}=2.3590$	$b_{2,15}=-2.2063$	$b_{3,15}=2.4396$	$b_{4,15}=-1.9405$	$b_{5,15}=0.7042$
$b_{6,15}=-2.3339$	$b_{7,15}=-1.1405$	$b_{8,15}=0.9342$	$b_{9,15}=-1.5186$	$b_{10,15}=0.1862$
$b_{11,15}=-2.9375$	$b_{12,15}=0.7334$	$b_{13,15}=-1.7530$	$b_{14,15}=0.4762$	$b_{15,15}=-1.3869$

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

B{2} Bias weights จากหน่วยซ่อนของชั้นที่ 1 ไปยังหน่วยซ่อนของชั้นซ่อนที่ 2 (c_k)				
$c_1 = -0.5995$	$c_2 = -7.1796$	$c_3 = 8.7237$	$c_4 = -4.2537$	$c_5 = 8.7959$
$c_6 = 4.0599$	$c_7 = 4.6852$	$c_8 = -0.9553$	$c_9 = 0.4619$	$c_{10} = -1.4911$
$c_{11} = 0.5728$	$c_{12} = -2.2962$	$c_{13} = -3.5825$	$c_{14} = 6.8735$	$c_{15} = 7.0461$
LW{3,2} Last weight ไปยัง Output (c_{kl})				
$c_{1,1} = 0.28445$	$c_{2,1} = -0.9519$	$c_{3,1} = -0.5729$	$c_{4,1} = 0.1666$	$c_{5,1} = 0.5367$
$c_{6,1} = 0.57059$	$c_{7,1} = -0.7238$	$c_{8,1} = -0.5704$	$c_{9,1} = 0.2393$	$c_{10,1} = 0.3539$
$c_{11,1} = -0.6641$	$c_{12,1} = -0.1848$	$c_{13,1} = 0.5266$	$c_{14,1} = -0.5767$	$c_{15,1} = 0.3978$
$c_{1,2} = -0.4178$	$c_{2,2} = 0.5292$	$c_{3,2} = 0.5755$	$c_{4,2} = -0.5878$	$c_{5,2} = -0.2212$
$c_{6,2} = -0.1294$	$c_{7,2} = -0.3520$	$c_{8,2} = -0.2291$	$c_{9,2} = -0.8887$	$c_{10,2} = -0.5600$
$c_{11,2} = 0.2289$	$c_{12,2} = -0.5750$	$c_{13,2} = 0.4027$	$c_{14,2} = 0.5323$	$c_{15,2} = -0.9662$
$c_{1,3} = 0.9318$	$c_{2,3} = -0.1175$	$c_{3,3} = 0.6384$	$c_{4,3} = 0.4110$	$c_{5,3} = -0.9915$
$c_{6,3} = 0.4208$	$c_{7,3} = 0.5777$	$c_{8,3} = 0.8654$	$c_{9,3} = -0.3229$	$c_{10,3} = 0.3257$
$c_{11,3} = 0.2731$	$c_{12,3} = 0.2550$	$c_{13,3} = 0.6359$	$c_{14,3} = 0.8279$	$c_{15,3} = 0.117$
$c_{1,4} = -0.1888$	$c_{2,4} = -0.8102$	$c_{3,4} = -0.7032$	$c_{4,4} = 0.9949$	$c_{5,4} = -0.1411$
$c_{6,4} = 0.9015$	$c_{7,4} = -0.4245$	$c_{8,4} = 0.9670$	$c_{9,4} = -0.5205$	$c_{10,4} = -0.7612$
$c_{11,4} = 0.5387$	$c_{12,4} = 0.6637$	$c_{13,4} = -0.6244$	$c_{14,4} = -0.5382$	$c_{15,4} = 0.2124$
$c_{1,5} = -0.5804$	$c_{2,5} = -0.9932$	$c_{3,5} = 0.2725$	$c_{4,5} = 0.647$	$c_{5,5} = -0.3447$
$c_{6,5} = 0.4145$	$c_{7,5} = 0.5956$	$c_{8,5} = 0.5024$	$c_{9,5} = 0.0685$	$c_{10,5} = 0.7074$
$c_{11,5} = 0.0917$	$c_{12,5} = 0.5253$	$c_{13,5} = -0.6062$	$c_{14,5} = -0.3058$	$c_{15,5} = -0.0998$
B{3} Bias weights จากหน่วยซ่อนของชั้นที่ 2 ไปยัง Output (d_l)				
$e_1 = -0.9391$	$e_2 = 0.9783$	$e_3 = -0.9179$	$e_4 = -0.9047$	$e_5 = -0.7719$

หมายเหตุ เมื่อกำหนดให้ $i = 1, 2, 3, \dots, 8$ $k = 1, 2, \dots, 15$
 $j = 1, 2, \dots, 15$ $l = 5$

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาว กัทลี จันทรเจนนอบ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2546
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-