



การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

วิทยานิพนธ์
ของ
มนตรี มนตรีพิลา

พหุ ประจันตัง สีวะ

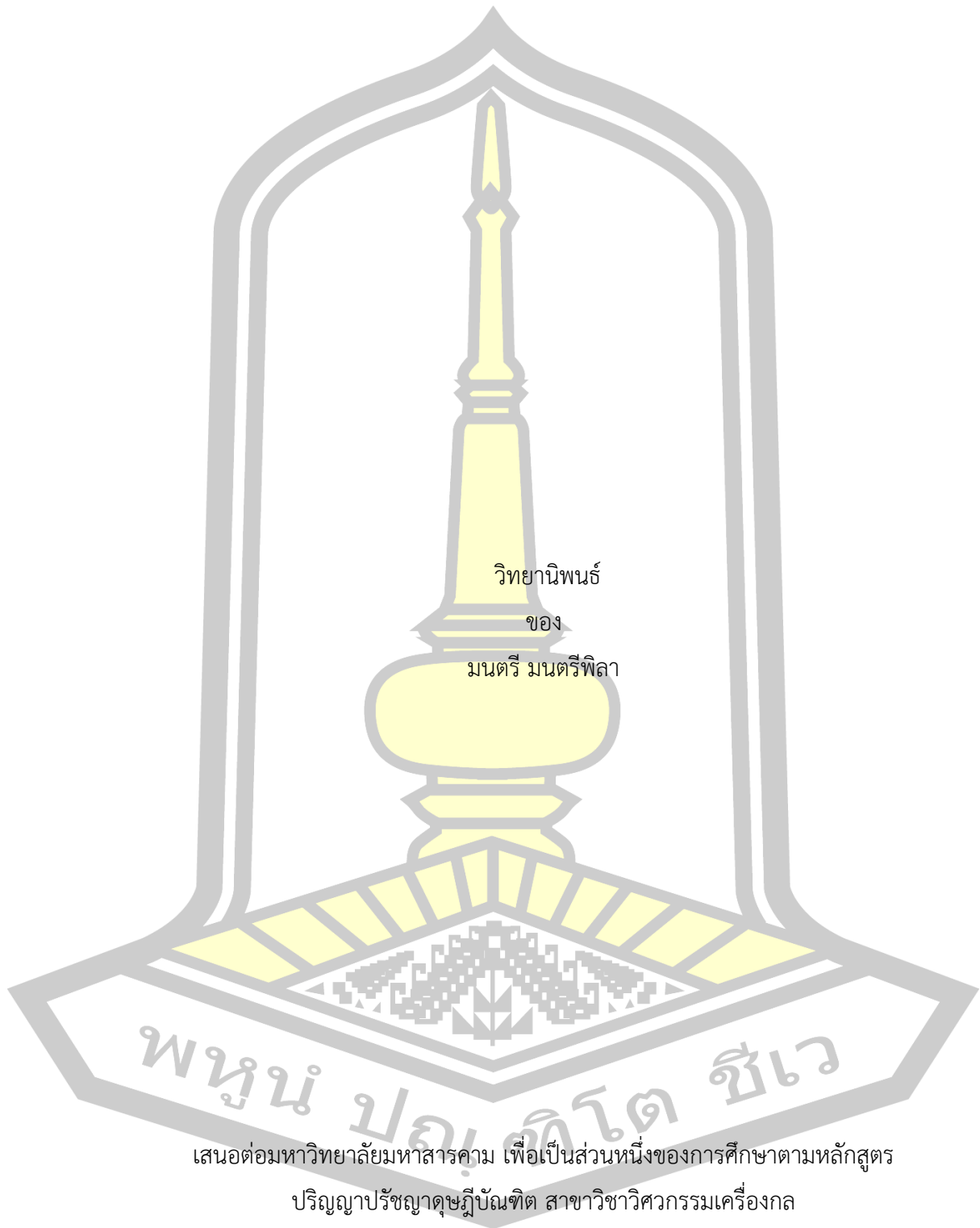
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กุมภาพันธ์ 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน



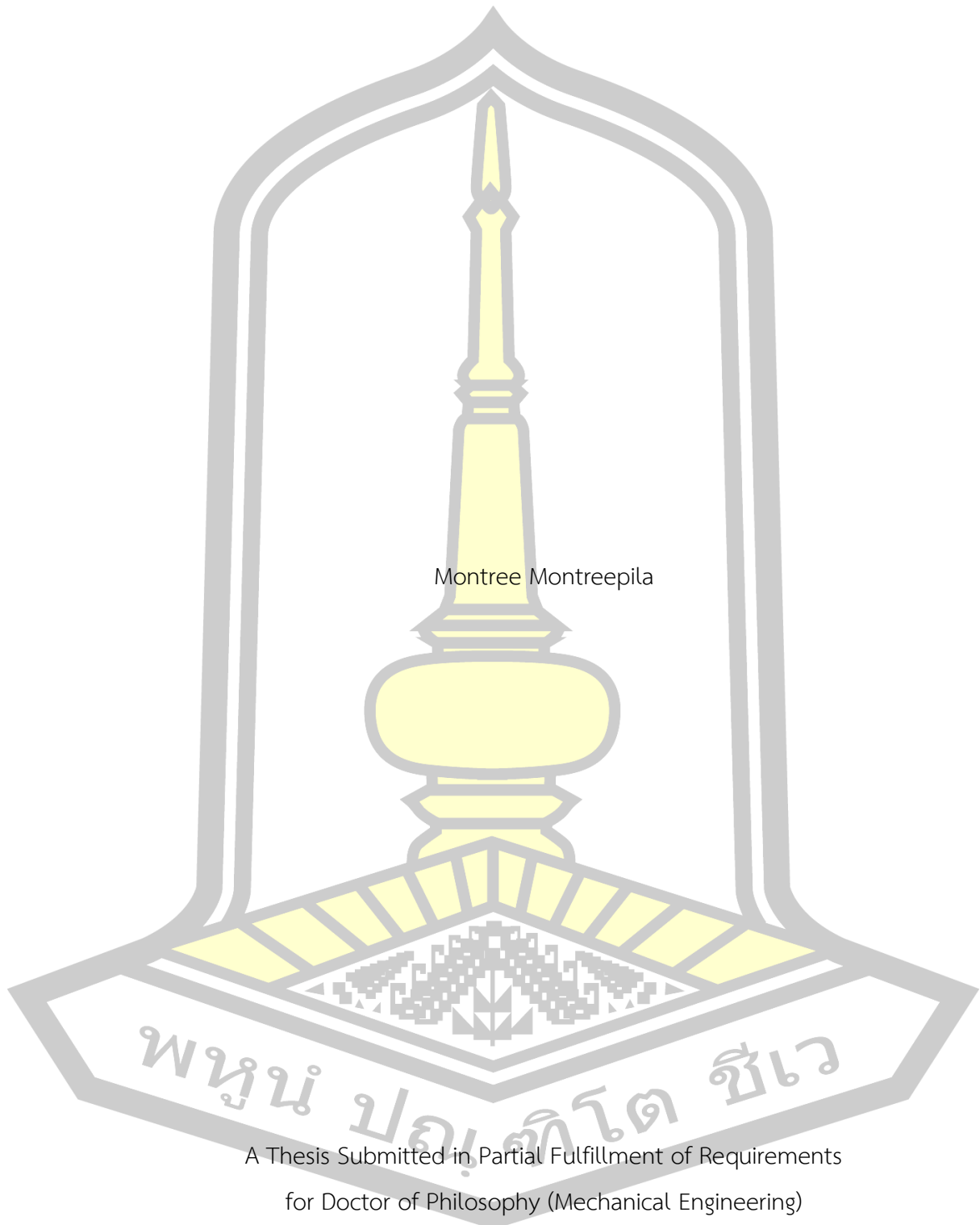
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กุมภาพันธ์ 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Drying of Konjac Corm Using Fluidization Technique



Montree Montreepila

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

February 2019

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายมนตรี มนต์รีพิลา แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ณ์ฐพล ภูมิสะอาด)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. ละมุล วิเศษ)

กรรมการ

(รศ. ดร. บพิศ บุปผาโชติ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. จักรมาส เลหาหวนิช)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

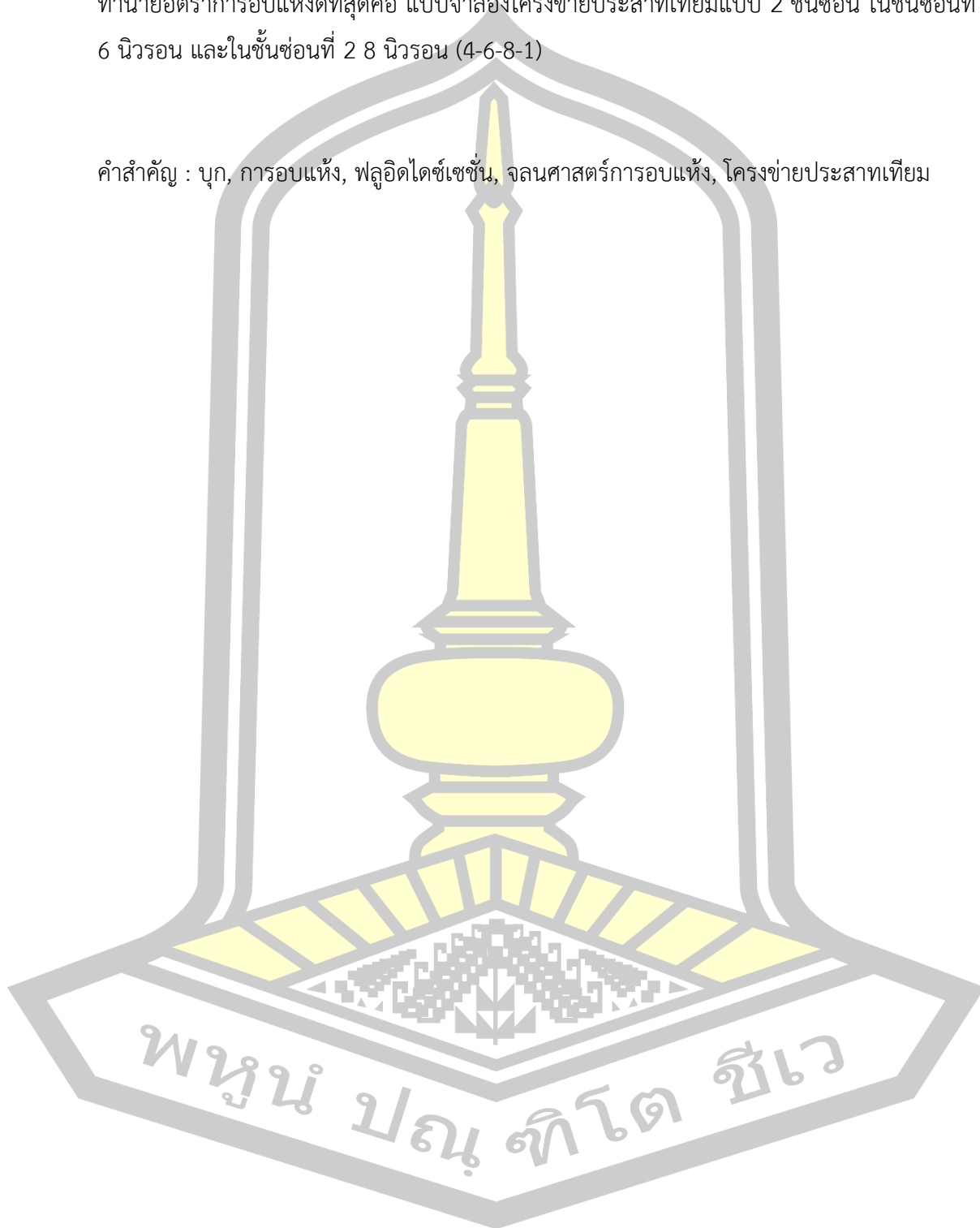
ชื่อเรื่อง	การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน		
ผู้วิจัย	มนตรี มนตรีพิลา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล ภูมิสะอาด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ละมุล วิเศษ		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

บุกเป็นพืชพื้นเมืองที่พบมากในภาคเหนือของไทย บุกเนื้อทรายหรือบุกไข่ เป็นบุกพันธุ์พื้นเมืองที่มีแพร่หลายและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร หัวบุกประกอบด้วยกลูโคแมนแนนในปริมาณสูง จึงส่งผลทำให้บุกเนื้อทรายกลายเป็นสินค้าเชิงพาณิชย์ที่มีมูลค่าสูง กระบวนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนเนื่องจากเกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลขึ้นพร้อมกัน อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้งจะส่งผลต่อคุณภาพของบุก การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน เป็นวิธีการอบแห้งที่มีอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดเซชัน ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทางทฤษฎีและกึ่งทฤษฎี ได้แก่ แบบจำลอง Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic เพื่อทำนายผลอัตราส่วนความชื้นในการอบแห้ง ตลอดจนวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ด้านสีและการหดตัว และหาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำนายอัตราส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง โดยทดลองที่อุณหภูมิ 3 ระดับ (50 60 และ 70 องศาเซลเซียส) ความสูงเบต 2 ระดับ (30 และ 60 มิลลิเมตร) และความหนาชั้นผลิตภัณฑ์ 3 ระดับ (6 10 และ 15 มิลลิเมตร) ผลการทดลองพบว่าแบบจำลอง Modified Page สามารถทำนายผลการอบแห้งได้เหมาะสมที่สุด โดยสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด ค่า R^2 ที่มากที่สุด ให้ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าผลรวมความคลาดเคลื่อน (SSE) และ Chi-square (χ^2) ที่น้อยที่สุด สัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ลดขนาดของผลิตภัณฑ์และความสูงเบต จะส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งลดลง นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าสีเหลืองและอัตราการหดตัวต่ำสำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการอบแห้งบุกเป็นโครงสร้างแบบ 2 ชั้นซ่อน (ชั้นซ่อน 1 และชั้นซ่อน 2) และจำนวนนิวรอน 10 นิวรอน (2 4 6 8 10) แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ดีที่สุด คือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นซ่อน ในชั้นซ่อน

ที่ 1 8 นิเวรอน และในชั้นช่อนที่ 2 8 นิเวรอน (4-8-8-1) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่
ทำนายอัตราการอบแห้งที่ดีที่สุดคือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 2 ชั้นช่อน ในชั้นช่อนที่ 1
6 นิเวรอน และในชั้นช่อนที่ 2 8 นิเวรอน (4-6-8-1)

คำสำคัญ : บุก, การอบแห้ง, ฟลูอิดไดซ์เซชัน, จลนศาสตร์การอบแห้ง, โครงข่ายประสาทเทียม



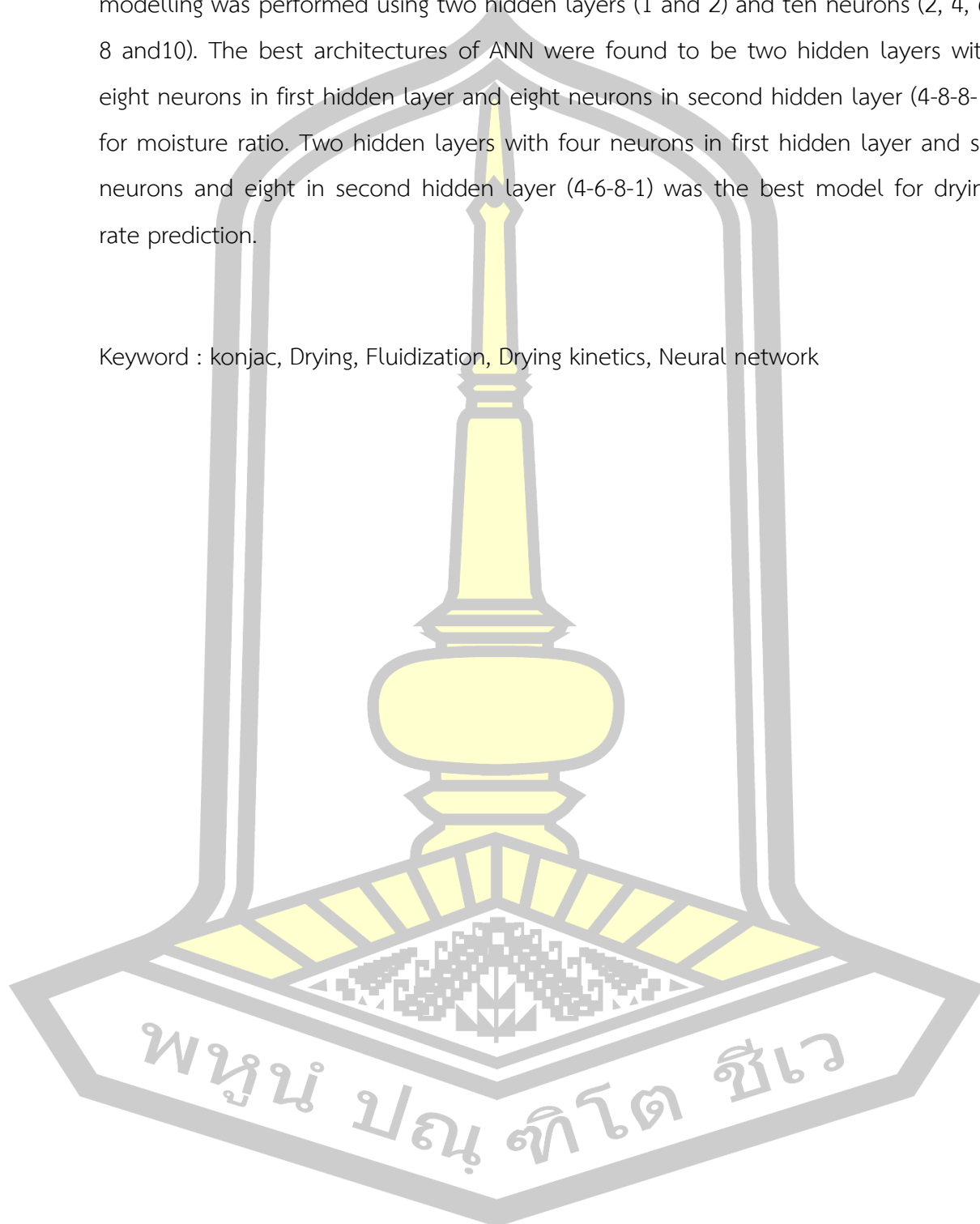
TITLE	Drying of Konjac Corm Using Fluidization Technique		
AUTHOR	Montree Montreepila		
ADVISORS	Assistant Professor Nattapol Poomsa-ad , Ph.D. Assistant Professor Lamul Wiset , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

Konjac is an indigenous crop found in Thailand, mostly in the northern part of Thailand. A widespread and valuable species that is used in the food industry is Buk Nuea Sai or Buk Khai which has high glucomannan content in its corms. Then, this variety is becoming valuable commercial species. Drying is a complicated process involving simultaneous, coupled heat and mass transfer. Quality of product is depended drying temperature and drying time. In fluidized bed drying, drying time is shortened due to intensive heat and mass transfer. The objectives of this study were to investigate the drying kinetics of konjac in a fluidized bed dryer, to find the mathematical model using theoretical and semi-theoretical models, namely Newton Page, Modified Page, Henderson and Pabis and Logarithmic Model, to investigate the konjac physical's quality including color and shrinkage and to develop various empirical models from the experimental data and predict the models using artificial neural network (ANN). The experiments work was conducted under three different temperatures (50, 60 and 70 °C), two bed depth (30 and 60 mm) three different sizes (6, 10 and 15 mm). Modified Page's model gave a better prediction of moisture ratio with a maximum coefficient of determination (R^2) and minimum of root mean square error (RMSE), sum square error (SSE) and Chi-square (χ^2). The effective diffusion coefficient was enhanced by drying temperature. Moisture ratio and drying time were decreased when temperature increased, bed depth and sample size decreased. Moreover, the higher drying temperature had the lower yellowness and shrinkage.

Artificial neural network model was fitted in drying experimental data and ANN modelling was performed using two hidden layers (1 and 2) and ten neurons (2, 4, 6, 8 and 10). The best architectures of ANN were found to be two hidden layers with eight neurons in first hidden layer and eight neurons in second hidden layer (4-8-8-1) for moisture ratio. Two hidden layers with four neurons in first hidden layer and six neurons and eight in second hidden layer (4-6-8-1) was the best model for drying rate prediction.

Keyword : konjac, Drying, Fluidization, Drying kinetics, Neural network



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล ภูมิสะอาด ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลมูล วิเศษ กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งด้านวิชาการ และการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาเอกเพื่อนร่วมห้องวิจัยพลังงานความร้อนที่ช่วยเหลือ ทั้งด้านวิชาการ และการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงาน สาขาวิชาเชื่อมโลหะ วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด ที่ช่วยเหลือด้านการสร้างเครื่องมือทดลอง และการทดลอง

มนตรี มนตรีพิลา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 สถานที่ดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	4
2.1 ลักษณะทั่วไปของbuk.....	4
2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	4
2.3 การปลูกbukในประเทศไทย.....	5
2.4 สารกลูโคแมนแนน.....	6
2.5 การใช้ประโยชน์จากbuk.....	7
2.6 การอบแห้ง.....	8
2.7 สมการอบแห้ง.....	14

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	45
3.1 วัตถุประสงค์.....	45
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	46
3.4 จลนศาสตร์ของการอบแห้งบุง ประกอบด้วย.....	47
3.5 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง.....	50
3.6 การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งหัวบุงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม.....	51
บทที่ 4 ผลการวิจัย และการอภิปราย	55
4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุง	55
4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล.....	74
4.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ.....	76
4.4 การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุงด้วยโครงข่ายประสาทเทียม	85
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	92
5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหัวบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	93
5.3 แบบจำลองโครงข่ายประสาทของการอบแห้งบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน.....	93
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	93
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก การทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี.....	101
ภาคผนวก ข ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	111
ประวัติผู้เขียน.....	156

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 สมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี.....	23
ตาราง 2.2 สมการการอบแห้งเอมไพริคเคิล.....	24
ตาราง 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดลองของ Kaleta	24
ตาราง 2.4 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ (coc) จากการทดลองของ Kaleta.....	25
ตาราง 3.1 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนความชื้น	49
ตาราง 3.2 แบบจำลองโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม	53
ตาราง 4.1 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Newton	63
ตาราง 4.2 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Page.....	64
ตาราง 4.3 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Modified Page.....	65
ตาราง 4.4 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Handerson and Pabis..	66
ตาราง 4.5 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Logarithmic	67
ตาราง 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity: D_{eff})	74
ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสีหัวบุงสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	76
ตาราง 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าการหดของหัวบุงสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	82
ตาราง 4.9 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้น (MR) การอบแห้งหัวบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	86
ตาราง 4.10 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง (DR) การอบแห้งหัวบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	87
ตาราง 4.11 แสดงผลโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งหัวบุงสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน	89
ตาราง ก 1 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page ความสูงเบด 30 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 6 มม.	102

ตาราง ก 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page ความสูงเบด 30 มม. ความหนาผลิตรัณฑ์ 10 มม.	103
ตาราง ก 3 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page ความสูงเบด 30 มม. ความหนาผลิตรัณฑ์ 15 มม.	104
ตาราง ก 4 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page ความสูงเบด 60 มม. ความหนาผลิตรัณฑ์ 6 มม.	105
ตาราง ก 5 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page ความสูงเบด 60 มม. ความหนาผลิตรัณฑ์ 10 มม.	107
ตาราง ก 6 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page ความสูงเบด 60 มม. ความหนาผลิตรัณฑ์ 15 มม.	108



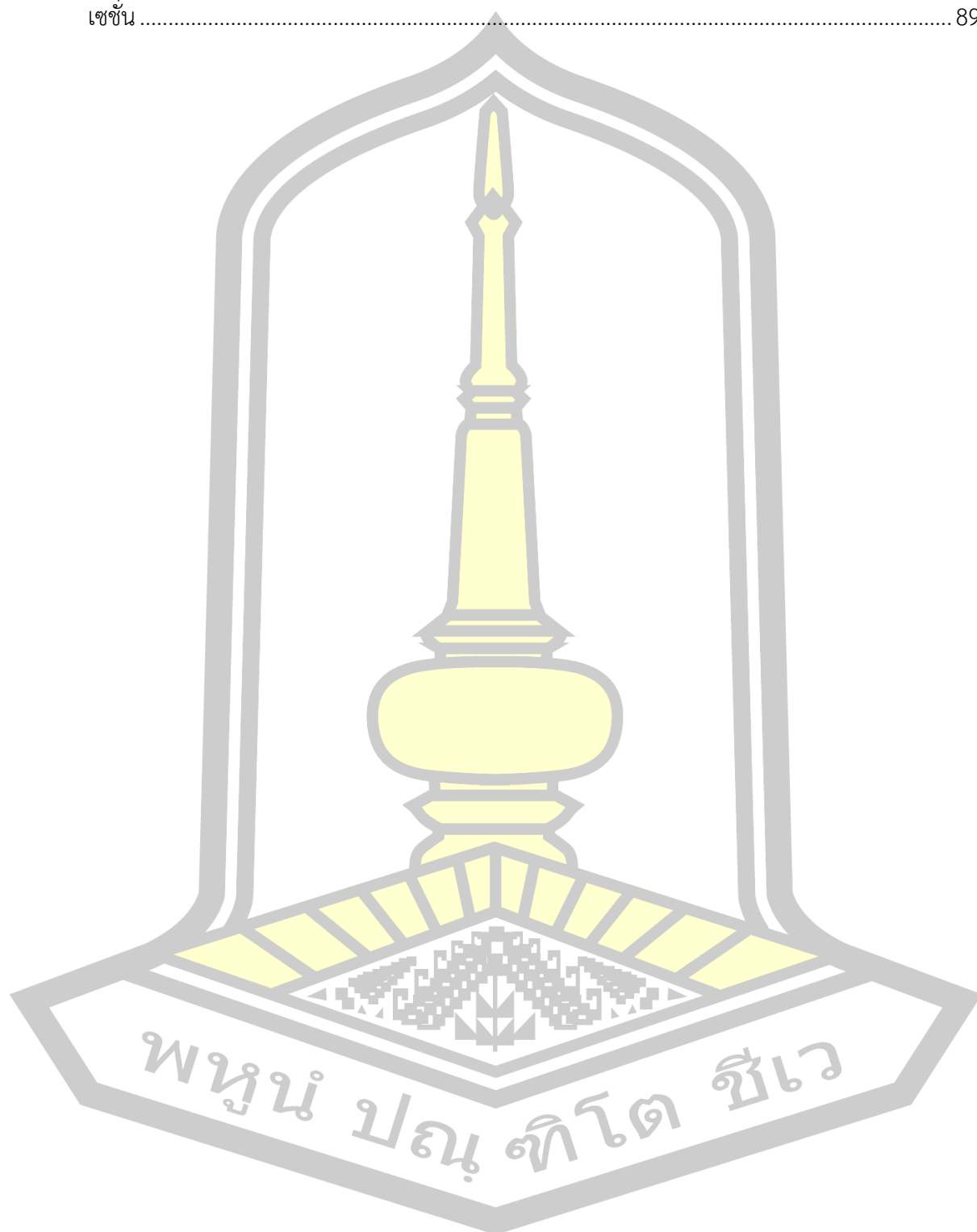
สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 ลักษณะของบุงกพันธุ์เนื้อ	5
ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสารกลูโคแมนแนน	7
ภาพประกอบ 2.3 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการอบแห้ง	9
ภาพประกอบ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้ง	9
ภาพประกอบ 2.5 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [2]	12
ภาพประกอบ 2.6 เซลประสาท (Biological Neural Network)	27
ภาพประกอบ 2.7 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม	28
ภาพประกอบ 2.8 (ก) นิวรอน 1 อินพุตเดียวโดยไม่มีไบแอส (ข) นิวรอน 1 อินพุตเดียวมีไบแอส	28
ภาพประกอบ 2.9 นิวรอนที่มีหลายอินพุต	29
ภาพประกอบ 2.10 นิวรอนที่มีอินพุต R อินพุต [1]	29
ภาพประกอบ 2.11 (ก) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hard Limit ผ่านจุดกำเนิด (ข) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hard Limit ไม่ผ่านจุดกำเนิด	30
ภาพประกอบ 2.12 (ก) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น ผ่านจุดกำเนิด (ข) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น ไม่ผ่านจุดกำเนิด	31
ภาพประกอบ 2.13 (ก) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log - Sigmoid ผ่านจุดกำเนิด (ข) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log - Sigmoid ไม่ผ่านจุดกำเนิด	31
ภาพประกอบ 2.14 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Tan Sigmoid	32
ภาพประกอบ 2.15 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม	32
ภาพประกอบ 2.16 ขั้นตอนการแพร่ค้ำย้อนกลับ	35
ภาพประกอบ 2.17 โครงข่ายประสาทเทียม Multilayer Feedforward แบบ 2 ชั้น	35
ภาพประกอบ 2.18 ตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้ของค่าผิดพลาด	38
ภาพประกอบ 3.1 เครื่องอบแห้งหับบุงกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน [0.2]	46

ภาพประกอบ 3.3 โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 1 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะหัวบุกจากการอบแห้ง.....	52
ภาพประกอบ 3.4 โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะหัวบุกจากการอบแห้ง [0.5]	52
ภาพประกอบ 4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบุกที่ ความสูงเบต 30 มม. (a) ความหนาบุก 6 มม. (b) ความหนาบุก 10 มม. (c) ความหนาบุก 15 มม. 57	
ภาพประกอบ 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบุกที่ ความสูงเบต 60 มม. (a) ความหนาบุก 6 มม. (b) ความหนาบุก 10 มม. (c) ความหนาบุก 15 มม. 58	
ภาพประกอบ 4.3 อิทธิพลของความหนาของผลิตภัณฑ์ที่มีต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน ความชื้นการอบแห้งบุกสดที่อุณหภูมิ (a) 50 °C (b) 60 °C และ (c) 70 °C	60
ภาพประกอบ 4.4 อิทธิพลของความสูงของเบตของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนความชื้นการอบแห้งหัวบุกสด.....	62
ภาพประกอบ 4.5 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน การทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบต 30 มม. ความ หนาบุก 6 มม.....	68
ภาพประกอบ 4.6 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลองที่ความสูง เบต 30 มม. ความหนาบุก 6 มม.....	68
ภาพประกอบ 4.7 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบต 30 มม. ความ หนาบุก 10 มม.....	69
ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Pageแบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูง เบต 30 มม. ความหนาบุก 10 มม.....	69
ภาพประกอบ 4.9 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบต 30 มม. ความ หนาบุก 15 มม.....	70

ภาพประกอบ 4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Pageแบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 15 มม.....	70
ภาพประกอบ 4.11 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 6 มม.	71
ภาพประกอบ 4.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Pageแบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 6 มม.....	71
ภาพประกอบ 4.13 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 10 มม.....	72
ภาพประกอบ 4.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Pageแบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 10 มม.....	72
ภาพประกอบ 4.15 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 15 มม.....	73
ภาพประกอบ 4.16 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันจากการทำนายตามสมการของ Modified Pageแบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 15 มม.....	73
ภาพประกอบ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) กับอุณหภูมิด้วยสมการ Arrhenius (a) ที่ความสูงเบด 30 มม. (b) ที่ความสูงเบด 60 มม.	75
ภาพประกอบ 4.18 แผนภูมิแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ที่มีผลต่อค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) ค่าสีเหลือง (b^*).....	79
ภาพประกอบ 4.19 สีและการหดตัวหลังการอบแห้ง ที่ความสูงเบด 30 มิลลิเมตร	81
ภาพประกอบ 4.20 แผนภูมิแสดงอิทธิพลร่วม ความสูงเบด อุณหภูมิและขนาดของบुकอบแห้งที่มีผลต่อค่าการหดตัว	84

ภาพประกอบ 4.21 ลักษณะโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมการอบแห้งหีบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์
เซชัน..... 89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

บุก (*Amorphophallus* spp.) หรือมันเท้าช้างจัดอยู่ในวงศ์ Araceae [1] เป็นพืชพื้นเมืองที่พบในพื้นที่ที่เป็นเนินเขาในเขตร้อนภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เช่นจีน, ญี่ปุ่น, พม่าอินโดนีเซีย และไทย โดยขึ้นอยู่ตามชายป่า และอาจพบตามพื้นที่ทำนา ขึ้นได้ในสภาพดินทุกชนิด แต่จะเจริญเติบโตได้ดี ให้หัวขนาดใหญ่ได้ในดินร่วนซุย น้ำไม่ขัง และดินที่มีอิวมัส หรืออินทรีย์วัตถุสูง มีอยู่ประมาณ 150 สายพันธุ์ [2] ที่พบในบริเวณที่เป็นภูเขาหรือที่ราบสูงของเขตร้อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ส่วนใหญ่ในประเทศไทยและอินโดนีเซีย [3] มีสายพันธุ์ที่พบในประเทศไทยมีประมาณอยู่ 46 สายพันธุ์ [4] ส่วนใหญ่อยู่ทางตอนเหนือของประเทศ. เป็นสายพันธุ์ที่แพร่หลายและมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงที่นำมาใช้อุตสาหกรรมอาหารคือ "บุกเนื้อทราย" หรือ "บุกไข่" (*Amorphophallus muelleri*) ซึ่งในหัวบุกประกอบด้วยมี กลูโคแมนแนน (*Glucoman*) ปริมาณสูง [5] ซึ่งคุณสมบัติของกลูโคแมนแนนมีสรรพคุณในการบำบัดรักษาโรคที่สำคัญหลายชนิด [6] โดยลดระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวาน ลดระดับโคเลสเตอรอลในเลือดที่เป็นสาเหตุของโรคไขมันในเลือดสูง และโรคเส้นเลือดหัวใจอุดตัน [7] และที่สำคัญคือ ใช้เป็นอาหารเสริมในการควบคุมน้ำหนักและบุกเนื้อทรายหรือบุกไข่เป็นสายพันธุ์พื้นเมืองที่พบในประเทศไทย ส่วนใหญ่อยู่ทางตอนเหนือของประเทศแถวจังหวัดเชียงใหม่, เชียงราย, ลำปางและแม่ฮ่องสอนและทางภาคตะวันตกของประเทศไทยเช่น จังหวัดกาญจนบุรีและจังหวัดตาก มีความทนทานต่อโรคที่เกิดจากดินขยายพันธุ์ง่ายและอัตราการเจริญเติบโตได้ดี [8]

เนื่องจากแปรรูปกลูโคแมนแนนจากหัวบุก (KGM) เชิงพาณิชย์นั้นจะแปรรูปโดยการผลิตเป็นแป้งบุก [9] [10] และในกระบวนการผลิตแป้งบุกถือว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของสารกลูโคแมนแนนที่ได้ โดยเฉพาะอุณหภูมิความร้อนและระยะเวลาการอบแห้งจะส่งผลต่อคุณภาพด้านสี การหดตัว และปริมาณกลูโคแมนแนน [11] การพัฒนากระบวนการอบแห้งที่เหมาะสมในก่อนการแปรรูปบุก จะช่วยให้สามารถผลิตแป้งบุกที่มีคุณภาพดีและนำไปสู่การผลิตสารกลูโคแมนแนนที่มีคุณภาพและความบริสุทธิ์สูงขึ้น

การอบแห้งเป็นกระบวนการถนอมอาหารที่เก่าแก่และมีประสิทธิภาพมากที่สุดในวงการอุตสาหกรรมอาหารในการลดการเน่าเสียและการเสื่อมสภาพ [12] โดยอาศัยหลักการลดความชื้นภายในของวัสดุ ซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน การลด

ความชื้นที่มีอยู่ในผลผลิตทางการเกษตรจะช่วยให้รักษาคุณภาพได้ระยะเวลายาวนานขึ้น [13] การพัฒนาวิธีการทำแห้งที่ใช้เทคนิคและหลักวิชาทางวิศวกรรมสามารถควบคุมอัตราเร็วของการทำแห้งได้ ทำให้สามารถผลิตวัสดุแห้งได้เร็วขึ้นและมีคุณภาพดี ความชื้นต่ำตามที่ต้องการ โดยอาศัยหลักการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในชิ้นวัสดุให้น้ำหรือความชื้นกลายเป็นไอระเหยออกไปจากผิวหน้าของวัสดุ ความร้อนที่ส่งเข้าไปอาจจะเป็นการนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) หรือการแผ่รังสี (Radiation) นอกจากนี้การอบแห้งยังทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และ โภชนาการ เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการลดความชื้นด้วย โดยเฉพาะวัสดุที่มีความไวต่อความร้อน เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารและชีวผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ทำให้สี คุณค่าทางอาหารรสชาติ และโครงสร้างมีการสูญเสียเกิดขึ้น

การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันเป็นเทคนิคที่มักใช้ในการอุตสาหกรรมผลิตอาหาร เนื่องจากมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่ากระบวนการอบแห้งที่ใช้อากาศร้อนโดยทั่วไป เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลที่ผิวหน้าวัสดุสูงมาก [14] จึงใช้เวลาในการอบแห้งน้อยทำให้มีอัตราการอบแห้งสูงมาก [15]

งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อทำการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคแบบฟลูอิดไดซ์เซชัน สำหรับการศึกษาสภาวะการอบแห้งด้วยแบบจำลองแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของบุก ผลการศึกษาที่ได้นำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมทางด้านอาหารให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งใช้เป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาประเทศและแข่งขันกับนานาชาติได้

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

1.2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

1.2.3 เพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมประสาทเทียมของการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันภายใต้อุณหภูมิ ขนาดของวัสดุในการอบแห้งและความสูงของเบตที่แตกต่างกันมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของบุก

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

1.4.1 ทราบถึงผลการอบแห้งบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของบุง

1.4.2 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของบุงที่อบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

1.4.3 สามารถนำวิธีการอบแห้งบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาผลของอุณหภูมิของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันที่อุณหภูมิความร้อน 50 -70 องศาเซลเซียส และความสูงของเบต 30 และ 60 มิลลิเมตร คุณภาพของบุง ได้แก่ สมบัติด้านสี สมบัติด้านการหดตัว

1.5.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันเพื่อทำนายความชื้น และอุณหภูมิของบุงหลังการอบแห้ง

1.5.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการอบแห้งหัวบุงด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันระหว่างอุณหภูมิ เวลา และความเร็วของอากาศด้วยวิธีโคร่งข่ายใยประสาทเทียม

1.6 สถานที่ดำเนินการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม

พูน ปณ ทิโต ชีเว

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ลักษณะทั่วไปของบุก

บุกไซ่หรือบุกเนื้อทราย (*Amorphophallus muelleri*) เป็นพืชล้มลุกในสกุล *Amorphophallus* วงศ์ *Araceae* [16] จะพบได้ในพื้นที่ที่เป็นภูเขาในเขตร้อนภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เช่นจีน, ญี่ปุ่น, พม่าอินโดนีเซียและไทย [8] บุกไซ่หรือบุกเนื้อทราย มีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามชนิด ลักษณะ และถิ่นกำเนิด บุกที่มีไซ่ (ตาก) บุกต่าง บุกกลาย /เหนื่อ บุกรอ บุคคนโท /ใต้ เคอมีตี/กะเหรี่ยงแม่ฮ่องสอน พะตุ /กะเหรี่ยงกาญจนบุรี เบอก /มอญ วาอุ /พม่า [4] สำหรับชื่ออังกฤษเรียกกันหลายแบบ ได้แก่ Elephant Foot Yam, Elephant Yam, Konjac, Suran, Sweet Yam, Elephant Bread, Telinga Potato เป็นต้น [17] มีวงจรชีวิตแตกต่างจากพืชอื่น คือ มีช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นต่างกับที่เจริญเติบโตเป็นดอก บุกไซ่ที่ขึ้นอยู่ตามธรรมชาติจะเริ่มงอกจากหัวใต้ดินในช่วงต้นฤดูฝนประมาณเดือนพฤษภาคมและจะเจริญเติบโตตลอดฤดูฝนเมื่อเข้าฤดูแล้งประมาณเดือนตุลาคมต้นบุกจะเหี่ยวเฉาและแห้งตาย แล้วจะพักตัวเพื่อเจริญเติบโตต่อไปในฤดูใหม่เป็นวัฏจักรเช่นนี้ตลอดไป บุกส่วนใหญ่มีช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นเพียงอย่างเดียวยาวนาน 4 - 6 ปี จึงเข้าสู่ช่วงของการออกดอก บุกบางชนิดมีดอกเพียงปีเดียวแต่สามารถมีดอกติดต่อกันได้หลายปี แล้วจึงกลับมามีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นอีกครั้งหนึ่ง บุกที่มีดอกส่วนใหญ่จะไม่มีมีการเจริญเติบโตทางลำต้น [4]

2.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

หัวหรือลำต้น ใต้ดินของบุกไซ่ มีลักษณะกลมแบน ผิวเรียบหรือขรุขระเล็กน้อย สีขาวอมเหลืองหรือชมพู เมื่อแห้งจะมีสีน้ำตาล เนื้อในแน่นละเอียดคล้ายเม็ดทราย ขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 35 กิโลกรัม หัวที่ออกดอกแล้วจะติดผล จะไม่งอกต้นใหม่ แต่ถ้าไม่ติดผลเมื่อดอกยุบตัวจะแห้งและงอกต้นอ่อนขึ้นมาแทน

ลำต้นเทียมหรือก้านใบจะมีผิวเรียบเกลี้ยงสูงประมาณ 5 ถึง 180 เซนติเมตร สีและลายของลำต้นจะแตกต่างกันไปบุกไซ่จะมีลักษณะที่แตกต่างจากบุกชนิดอื่นคือ หัวบนใบ (Leaf bulb) จะเกิดอยู่ที่ปลายสุดของลำต้นกึ่งกลางแฉกที่แยกเป็น 3 ใบ จะมีปุ่มสีเขียวใส เมื่อต้นยังอ่อนและพัฒนาเป็นปมสีน้ำตาล ลักษณะค่อนข้างกลมแบน ขนาดใหญ่

ใบ ต้นที่เกิดจากหัวบวมใบ ที่ปลายสุดของต้น แยกออกเป็น 3 ก้านใบ แต่ละก้านจะมี 1 ถึง 2 ใบ แต่ปกติจะมี 2 ใบ (ใบจริง) บนต้นจึงมี 6 ใบ (3 คู่ใบ) รูปร่างคล้ายใบหอก มีสีเขียว สีเขียวอมชมพูหรืออมม่วง ใบขนาดกว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร หูใบกว้าง 0.2 ถึง 3 เซนติเมตร เชื่อมต่อกัน ปลายใบแหลมขอบใบเรียบ จนถึงบิดงอเป็นคลื่น สีขอบใบอาจมีสีเขียวอ่อน เขียวเข้ม เขียวอมชมพู หรือสีชมพู

ดอกก้านช่อดอกทรงกระบอก ยาว 5 ถึง 45 เซนติเมตร มีกาบเลี้ยงหุ้มโคนก้าน 3 กาบ และมีกาบหุ้มช่อดอกขนาดใหญ่ค่อนข้างหนา รูปร่างคล้ายแจกัน 1 กาบ ยาว 15 - 35 เซนติเมตร กว้าง 10 - 30 เซนติเมตร มีสีแตกต่างกันหลายลักษณะ เช่นด้านนอกมีสีขาวนวล ขาวอมเขียว ด้านในมีสีชมพู เหลือง ช่อดอกทรงกระบอกประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนโคนเป็นช่อดอกตัวเมียมีสีเหลือง เข้ม ยาวประมาณ 3-5 เซนติเมตร เหนือขึ้นมาเป็นช่อดอกตัวผู้มีสีเหลืองอ่อน ยาวประมาณ 5 - 15 เซนติเมตร ระยะดอกบานเมื่อกลิ่นเหม็น (24 - 26 ชั่วโมง) ช่วงออกดอกประมาณเดือน มีนาคม- พฤษภาคม

ผล มีสีเขียวอ่อน เขียวอมม่วง กว้างประมาณ 1 เซนติเมตร ยาว 1 - 1.3 เซนติเมตร เมื่ออายุผล 7 - 8 เดือน จะเริ่มสุก โดยมีสีผลที่ปลายช่อ (ช่อผลคล้ายฝักข้างโพด) ซึ่งสุกก่อนจะเปลี่ยนแปลงเป็นสีเหลืองแล้วเป็นสีส้มอมแดงหรือ สีแดง ภายในมีเมล็ด 2 - 4 เมล็ด และจะสมบูรณ์เพียง 1 - 2 เมล็ด การสุกหมดทั้งช่ออาจใช้เวลานานถึง 2 เดือน



ภาพประกอบ 2.1 ลักษณะของบุกพันธุ์เนื้อ

2.3 การปลูกบุกในประเทศไทย

จากการศึกษารวบรวมพันธุ์บุกทั่วประเทศไทย พบว่ามีอยู่ประมาณ 30 - 40 ชนิด ตั้งแต่บริเวณชายฝั่งทะเล ที่ราบลุ่มภาคกลางไป จนถึงภูเขาสูงเหนือระดับน้ำทะเล 800 - 900 เมตร [18] บุกเกือบทุกชนิดในประเทศไทยเป็นพืชป่าที่ยังไม่มีการศึกษาพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์และมีเพียงไม่กี่

ชนิดที่รับประทานได้ในแต่ละภาคของประเทศไทยรู้จักวิธีนำมาทำเป็นอาหารทั้งในรูปอาหารคาวและอาหารหวาน บางชนิดนำเอาต้น ใบมาหั่นต้มรวมกับรำข้าวและปลายข้าวเพื่อใช้เลี้ยงสุกร ด้านการเพาะปลูกบุกพบมีอยู่เพียง 2 ชนิด ที่ชาวบ้านปลูกไว้บริโภคชนิดแรกคือ บุกหูช้างหรือบุกโคราช (*A. koratensis* Gagnep.) ปลูกในท้องที่จังหวัดนครราชสีมาบุรีรัมย์ สุโขทัย เพชรบุรี อีกชนิดคือบุกต่างหรือบุกเปียหรือบุกหลวง (*A. kerrii* N.E. Br.) นำเฉพาะเนื้อหัวไปปรุงเป็นอาหาร มีลักษณะคล้ายบุกโคราช ต่างกันที่ลำต้น บุกเปียจะมีผิวขรุขระเล็กน้อยและไม่มีหัวย่อย พบปลูกเพียงบางหมู่บ้านที่อำเภอตาบะระยะ จังหวัดสระแก้ว อำเภอพบพระ จังหวัดตาก และที่ อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย เรียกว่า บุกหวาน และบุกที่ใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรมในประเทศไทยคือบุกเนื้อทราย (*A. onchophyllus* Prain) ซึ่งชาวบ้านมักเรียกบุกไข่ เนื่องจากมีหัวขึ้นอยู่บนใบสามารถนำไปใช้ผลิตผงบุกหรือกลูโคแมนแนน ซึ่งเป็นเส้นใยอาหารที่มีประโยชน์ [19] พบในหลายจังหวัดตามแนวชายแดนด้านตะวันตก ตั้งแต่ตอนใต้ของจังหวัดแม่ฮ่องสอน จนถึงภาคใต้แถบจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยพบมากในจังหวัดแม่ฮ่องสอนเชียงใหม่ ตาก กาญจนบุรี และระนอง

ปัจจุบันมีบริษัทเอกชนผลิตบุกออกมาในรูปของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสุขภาพ อาหารลดความอ้วน ทำให้บุกเป็นที่สนใจของคนทั่วไป โดยมีแหล่งรับซื้อใหญ่ คือ บริษัท สหผลผลิตพืช จำกัด อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี และบริษัทสยามคอนยัคจำกัด อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน [20]

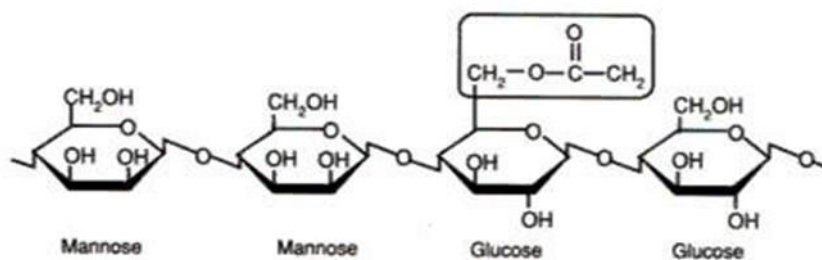
2.4 สารกลูโคแมนแนน

หัวบุกและก้านใบมีสารที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ สารแมนแนน 2 ชนิด คือ แมนแนน A และ แมนแนน B เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างโมเลกุลบางช่วงเป็นน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) แต่มีน้อยกว่าน้ำตาลแมนโนส (Mannose) โดยแมนแนน A มีน้ำตาลแมนโนส 10 - 13 หน่วย และในแมนแนน B มี 38 - 40 หน่วย จึงมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า เรียกมันแมนแนนที่ได้จากหัวบุกว่า วัจนคอนยัค (Konjacmannan) แต่เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีแตกต่างจากวัจนกาแลคโตสที่ได้จากน้ำตาลกลูโคส (Glucose) และแมนโนส จึงเรียกชื่อใหม่ว่า กลูโคแมนแนน เป็นสารวัจนที่มีคุณสมบัติพิเศษคือเมื่อรับประทานเข้าไปในร่างกายแล้วจะไม่ย่อยและดูดซึม แต่จะทำหน้าที่เป็นใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ในการทำความสะอาดลำไส้ แตกต่างจากวัจนกาแลคโตสที่ได้จากเมล็ดพืช หรือวัจนคาราจีแนน ที่ได้จากสาหร่ายทะเลซึ่งเป็นแป้งอัมัยโลสและอัมัยโลเปคตินที่มีสูตรโครงสร้างประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส [21]

นอกจากการศึกษาองค์ประกอบน้ำตาลแล้ว [22] ได้ศึกษาพันธะเชื่อมต่อของกลูโคแมนแนน พบว่าน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบนี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะชนิดเบต้าดี (β -D-Type) จากนั้นนำ

กลูโคแมนแนนบริสุทธิ์ตรวจด้วยเครื่องดูดซับแสงอินฟราเรด (Infrared absorption) และพบว่าดูดซับแสงอินฟราเรดที่ 870 เดซิเซนติเมตร และที่ 890 เดซิเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของ พันธะเบต้า - กลูโคซิดิก (β - glucosidic) และพันธะเบต้า-แมนโนซิดิก (β -mannosidic) ทำให้รู้ว่ากลูโคแมนแนน ประกอบด้วยน้ำตาลดี - กลูโคสและน้ำตาลดี - แมนโนส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4 - ไกลโคซิดิก [23] การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของแป้งบุก โดยการย่อยแป้งบุกด้วยกรดซัลฟิวริกและเอนไซม์เซลลูเลส แล้วนำไปแยกส่วน [22]

[24] ได้สรุปว่า กลูโคแมนแนนเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยแมนโนสและกลูโคสในอัตราส่วน 3: 2 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4- ไกลโคซิดิก มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 และมีหมู่ไฮดรอกซิลกระจายอยู่ทั่วไปบนสายโมเลกุลของกลูโคแมนแนน ซึ่งมีผลต่อการละลายน้ำ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 เมื่อนำแป้งชนิดนี้มาละลายน้ำจะได้สารละลายข้นหนืด และสามารถเกิดเจลได้เมื่อใช้ร่วมกับสารละลายต่างหรือสารไฮโดรคอลลอยด์บางชนิด เช่น แชนแทนกัม และคาราจีแนน เป็นต้น



ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของสารกลูโคแมนแนน

2.5 การใช้ประโยชน์จากบุก

จากคุณสมบัติของผงบุก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง [20] คือ

2.5.1 ควบคุมน้ำหนักตัวและลดความอ้วน เนื่องจากร่างกายไม่สามารถย่อยสลายกลูโคแมนแนนได้จึงไม่ให้พลังงานแก่ร่างกาย สามารถคงอยู่ในกระเพาะอาหารได้นาน ทำให้อิ่มเร็วและนาน ไม่หิวบ่อย อีกทั้งกลูโคแมนแนนสามารถจับกับไขมัน คาร์โบไฮเดรต น้ำตาลที่มากเกินไปมารวมเป็นโมเลกุลใหญ่ ทำให้เอนไซม์ในระบบย่อยอาหารไม่สามารถย่อยได้ง่าย และดูดซึมเข้าระบบร่างกายได้อย่างปกติ

2.5.2 ลดไขมันอุดตันในเส้นเลือด กลูโคแมนแนนจะทำปฏิกิริยาเชิงชีวเคมีกับไขมันและคอเลสเตอรอล มีผลในการป้องกันการดูดซึมกลับเข้าไปในเส้นเลือด ลดปริมาณไขมันส่วนเกินที่ร่างกายไม่ต้องการ

2.5.3 ลดการเกิดเบาหวาน กลูโคแมนแนนสามารถจับรวมกับโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสกลายเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เอนไซม์ในลำไส้ไม่สามารถย่อยได้ และขับถ่ายออกมาพร้อมกับกากอาหาร

2.5.4 ลดการเกิดมะเร็งลำไส้ สารกลูโคแมนแนนทำหน้าที่ยับยั้งป้องกันแบคทีเรียและไวรัสไม่ให้ทำปฏิกิริยากับน้ำดีที่จะก่อให้เกิดสารพิษ และช่วยดูดซับสารพิษ โลหะหนัก และอนุมูลอิสระต่าง ๆ ที่ตกค้างอยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ และขับถ่ายออกมาจากร่างกาย อีกทั้งยังช่วยลดความเข้มข้นของความเป็นกรดต่างจากเศษอาหารให้เจือจางลงด้วย ซึ่งเป็นการลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้เป็นอันมาก

2.5.5 ลดอาการท้องผูก กลูโคแมนแนนสามารถละลายน้ำได้ แต่ร่างกายไม่สามารถย่อยได้จึงยังคงความเป็นเมือกข้นจะห่อหุ้มกากอาหาร เพิ่มความชุ่มชื้น เพิ่มน้ำหนักให้กากอาหารส่งผลดีต่อการทำงานของลำไส้ ทำให้ขับถ่ายได้ดีขึ้น ช่วยให้ขับถ่ายได้สะดวก

2.5.6 เพื่อเพิ่มเส้นใยอาหารในผลิตภัณฑ์แปรรูปจากเนื้อสัตว์ที่มีไขมันเป็นองค์ประกอบสูงทำให้สามารถลดปริมาณส่วนผสมที่เป็นไขมันลงได้แต่ยังคงได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัส ทั้งทางด้านเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และกลิ่นรส เช่น ไส้กรอกไขมันต่ำ ไส้กรอกเทียม หมู/ไก่ ยอ

2.5.7 เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ยังคงรักษาความรู้สึกทางปาก (mouth feel) ของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการให้ความร้อนหลายครั้งได้ เช่น ผลิตภัณฑ์แปรรูปจากแป้ง ผลิตภัณฑ์พาสต้า (Pasta products)

2.5.8 เพื่อเป็นสารที่ทำให้เกิดความข้นหนืดและเกิดเจล เช่น เยลลีเสริมใยอาหาร แยม

2.5.9 ผลิตเป็นฟิล์มที่รับประทานได้ใช้ห่อหุ้มอาหาร เช่น ผักและผลไม้ ขนบั้งกรอบ กล้วยกวน หรือไส้กรอก

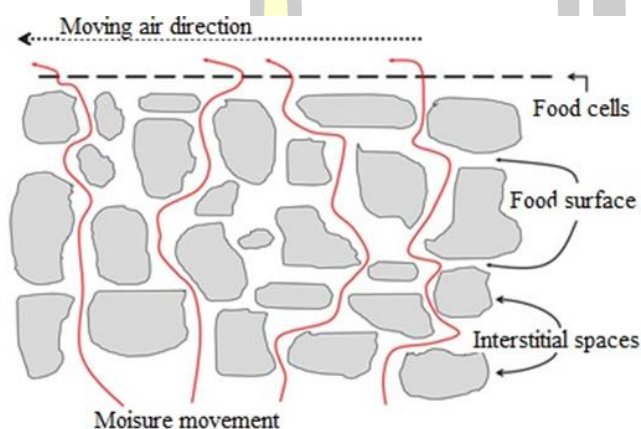
2.6 การอบแห้ง

การอบแห้ง คือการกำจัดความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ในวัสดุให้ลดลงจนมีความชื้นอยู่ในปริมาณที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา หรือการทำแห้ง (Dehydration) ซึ่งเป็นการกำจัดความชื้นหรือน้ำออกจากวัสดุจนกระทั่งวัสดุนั้นไม่มีความชื้น หรือเข้าใกล้มวลแห้ง [25]

2.6.1 หลักการอบแห้ง

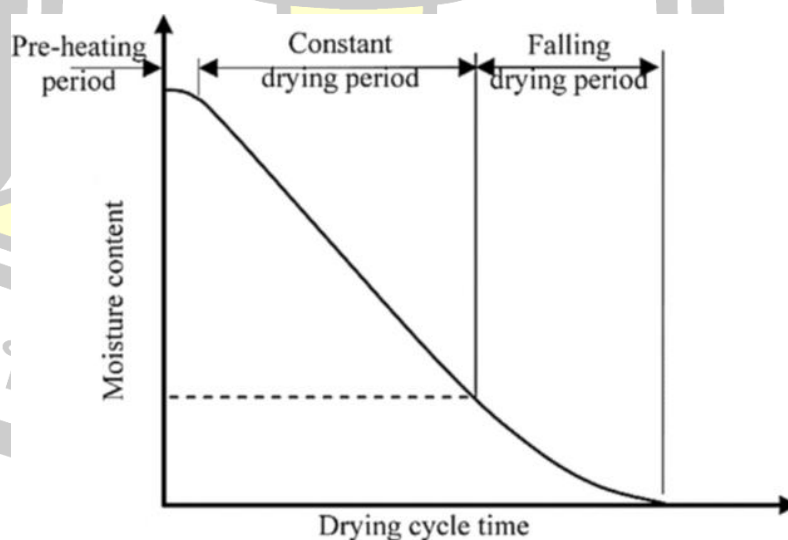
เมื่ออากาศหรือลมร้อนพัดผ่านผิวหน้าของผลิตภัณฑ์อาหารที่เปียก ความร้อนจะถูก

ถ่ายเทไปยังผิวของผลิตภัณฑ์ และน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอ น้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนที่เคลื่อนที่ สภาวะดังกล่าวจะทำให้ความดันที่ ผิวหน้าของอาหารต่ำกว่าความดันไอด้านในของอาหาร เป็นผลให้เกิดความแตกต่างของความดันไอ ของอาหารขึ้น อาหารชั้นด้านในจะมีความดันไอสองและค้อยๆ ลดต่ำลงเมื่อชั้นของอาหารเข้าใกล้ อากาศแห้ง ความแตกต่างนี้ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากอาหาร น้ำจะเคลื่อนที่ไปยังผิวหน้าด้วย กลไกดังต่อไปนี้ ดังภาพประกอบ 2.3



ภาพประกอบ 2.3 การเคลื่อนที่ของความชื้นระหว่างการอบแห้ง

การอบแห้งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง [26] ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4



ภาพประกอบ 2.4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุตลอดกระบวนการอบแห้ง

ช่วงที่ 1 ช่วงนี้เป็นช่วงสภาวะที่ผิวของวัสดุเข้าสู่สมดุลกับอากาศเกิดขึ้นเมื่อเริ่มทำการอบแห้ง ความร้อนจากลมร้อนจะถ่ายเทสู่ผิววัสดุจนถึงค่าๆ หนึ่งซึ่งมีความสมดุลระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

ช่วงที่ 2 ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying period) ช่วงนี้ผิววัสดุยังคงชุ่มไปด้วยน้ำซึ่งจะถูกน้ำออกจากผิววัสดุด้วยการระเหยซึ่งอัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวของการอบแห้ง อัตราการถ่ายเทมวลมีความสมดุลกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุอบแห้งคงที่

ช่วงที่ 3 ช่วงนี้เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying period) เนื่องจากปริมาณความชื้นภายในเนื้อวัสดุเคลื่อนที่มาสู่ผิวด้านนอกลดลง อัตราการอบแห้งเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุที่จุดนี้เรียกว่าความชื้นวิกฤต เมื่อกระบวนการอบแห้งดำเนินต่อไป อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุจะเพิ่มขึ้นจนเข้าใกล้อุณหภูมิของลมร้อนอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ

2.6.2 ความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้งความชื้นสามารถแสดงได้ 2 แบบ คือ

2.6.2.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (2.1)$$

2.6.2.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{w-d}{d} \quad (2.2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (ร้อยละมาตรฐานเปียก)

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

w คือ มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)

d คือ มวลวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

สำหรับความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในทางการค้า โดยทั่ว ๆ ไปจะอ้างอิงในรูปของร้อยละส่วนความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น เนื่องจากมวลแห้งของวัสดุมีค่าเกือบจะคงที่ในระหว่างการอบแห้ง

2.6.3 วิธีการอบแห้ง

วิธีการอบแห้งมีด้วยกันหลายวิธี แต่ทุก ๆ วิธีล้วนต้องอาศัยการถ่ายโอนความร้อนไปยังวัสดุเพื่อลดความชื้น ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนนั้นมีด้วยกัน 3 วิธีคือ

2.6.3.1 การนำความร้อน (Heat conduction) เป็นการถ่ายโอนความร้อนที่ต้องอาศัยตัวกลางที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ดังนั้นความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกส่งผ่านไปยังวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำโดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การอบแห้งที่อาศัยการนำความร้อนได้แก่ การอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุน (Drum drying) เป็นต้น

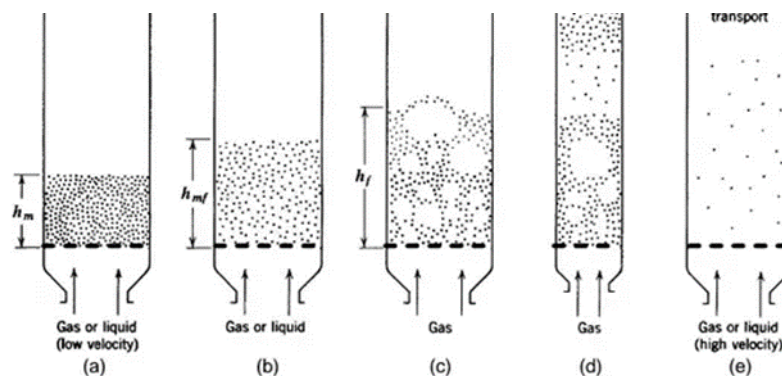
2.6.3.2 การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายโอนความร้อนที่ต้องอาศัยตัวกลางที่มีลักษณะเป็นของไหล พาความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การอบแห้งที่อาศัยการพาความร้อนได้แก่ การอบแห้งด้วยการพาอากาศร้อน (Hot air convective drying) การอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed drying) เป็นต้น

2.6.3.3 การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายโอนความร้อนที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ความร้อนจะถ่ายโอนจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) การอบแห้งที่อาศัยการแผ่รังสี ได้แก่ การอบแห้งด้วยรังสีดวงอาทิตย์ (Solar drying) การอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared radiative drying) เป็นต้น

2.6.4 ฟลูอิดไอเซชัน

ฟลูอิดไอเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็ง ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นสัมผัสกับของไหลซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งที่มีความเร็วสูงพอที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และประพุดิตัวคล้ายของไหล เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับแล้วให้ของไหล ไหลผ่านเม็ดของแข็งกลุ่มนั้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อของไหลมีความเร็วค่าหนึ่ง จะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวแล้วลอยขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกันของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้ จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพุดิตัวในลักษณะนี้ว่าฟลูอิดไดซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไอเซชัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.5

พูน ปณ ทิโต ชิว



ภาพประกอบ 2.5 พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดซ์เซนซ์ [2]

ฟลูอิดไดซ์เบด ที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบด เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างช้า ๆ เราเรียกเบดนี้ว่าเบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังภาพประกอบ 2.5 (b) ฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะของเบดจะแตกต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดแข็งเหมือนเดิมแต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวเองขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวเองในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนหลังคาของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีบางส่วนของเม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นไปตามภายในเบด จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างซุกซมวุ่นวายเบด ชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดวุ่นวาย หรือเรียกสั้น ๆ ว่า เบดวุ่นวาย ดังภาพประกอบ 2.5 (d)

2.6.5 ลักษณะทั่วไปของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด เป็นวิธีการอบแห้งที่มีประสิทธิภาพสูง [15] เนื่องจากวัสดุที่จะอบแห้งมีการเคลื่อนที่ภายในกระแสลมร้อน ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนและมวล ความชื้นระหว่างกระแสลมร้อนและเนื้อวัสดุ สามารถสรุปข้อดีของการใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด ดังนี้

1) ความสามารถในการอบแห้งสูง [27] เนื่องจากการอบแห้งด้วยวิธีนี้อนุภาคของแข็งจะลอยตัวอย่างอิสระอยู่ในอากาศร้อนตลอดเวลา จึงทำให้การสัมผัสกันระหว่างอากาศร้อนกับอนุภาคเหล่านั้นเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง ส่งผลให้เครื่องอบแห้งชนิดนี้มีความสามารถในการอบแห้งสูง

2) อุณหภูมิภายในเบดจะสม่ำเสมอหรือเท่ากันทุกจุด [27] ถึงแม้อุณหภูมิจะสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ดังนั้นจึงป้องกันอนุภาคได้รับความร้อนสูงเกินไปเฉพาะแห่งของอนุภาคได้ดี โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ความร้อนสูงในการอบแห้ง

3) สามารถใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงกว่าวิธีการอื่น ทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง

4) สามารถควบคุมโดยใช้ระบบอัตโนมัติและทำงานแบบต่อเนื่องได้

5) เนื่องด้วยความสามารถในการอบแห้งสูงทำให้ขนาดของเครื่องอบแห้งเล็กกว่าเครื่องอบแห้งแบบอื่น จึงไม่ต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง

6) การปฏิบัติงานและการบำรุงรักษาเครื่องอบแห้งชนิดนี้ไม่ยุ่งยาก เพราะไม่มีส่วนเคลื่อนที่ถึงแม้ว่าการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมีข้อดีหลายประการ แต่ไม่สามารถจะใช้การอบแห้งด้วยวิธีนี้ก็วัสดุทุกประเภท ยังมีปัจจัยทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุที่เป็นตัวกำหนด ได้แก่

- เป็นอนุภาคที่มีขนาดไม่ใหญ่และไม่เล็กจนเกินไป
- มีขนาดแต่ละอนุภาคไม่แตกต่างกันมากนัก
- ไม่เกาะติดกันง่ายเกินไปหรือเป็นเมือกที่ผิว
- ไม่เปราะบางหรือแตกหักง่าย

2.6.6 ลักษณะของเครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เบดและการทำงาน

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยทั่วไปจะมีลักษณะห้องอบเป็นทรงกระบอกหรือมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม [28] ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญหลายอย่าง เช่น หอทดลอง ส่วนป้อนวัสดุผงความร้อน เครื่องเป่าอากาศ และแผ่นกระจายอากาศร้อน เป็นต้น

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดสามารถทำงานได้ทั้งแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) ขึ้นกับการออกแบบและยังสามารถติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแบบอัตโนมัติเพิ่มเติมได้ในอนาคต สิ่งสำคัญในการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบนี้ คือ ต้องควบคุมให้ความเร็วของลมร้อนที่ผ่านขึ้นจากด้านล่างของหอทดลองมีค่าพอเหมาะ โดยมีความเร็วพอที่จะทำให้อนุภาคของแข็งภายในหอทเกิดการลอยตัวอย่างอิสระ (Fluidize) ได้ แต่ความเร็วของลมร้อนต้องไม่ต่ำเกินไป จนอนุภาคไม่สามารถเคลื่อนที่ลอยตัวอย่างอิสระได้ และต้องไม่เร็วเกินไปจนกระทั่งอนุภาคลอยหลุดออกไปพร้อมกับลมร้อนทางด้านบนของหอทดลอง ความเร็วลมร้อนที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับตัวและเคลื่อนที่ภายในหอทดลอง เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (Minimum Fluidization Velocity) ส่วนความเร็วสุดท้ายที่มากเกินไปจนทำให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกไปนอกหอทดลอง เรียกว่า ความเร็วสุดท้ายของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (Terminal Velocity)

ดังนั้นในการทำงานต้องควบคุมให้ลมร้อนมีความเร็วพอเหมาะ โดยอยู่ในช่วงความเร็วต่ำกับความเร็วสุดท้าย ในทางปฏิบัติมักจะทำการทดลองหาความเร็วต่ำสุดก่อน และการใช้งานจะควบคุมความเร็วลมร้อนให้มีค่าประมาณ 1.5 - 10 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ แต่ต้องไม่เกินความเร็วสุดท้าย

2.7 สมการอบแห้ง

ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยส่วนใหญ่จะพบอยู่ในช่วงการอบแห้งลดความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ การถ่ายเทความร้อนและมวลมิได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่เกิดภายในเนื้อของวัสดุด้วย การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิววัสดุไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุในขณะนั้น อุณหภูมิของวัสดุมีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงนี้ มีสมการที่ใช้อธิบายการอบแห้ง ดังนี้

2.7.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical Drying Equation)

ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ [29]

- 1) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (Surface force)
- 2) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Liquid diffusion)
- 3) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ (Surface diffusion)
- 4) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (Vapor diffusion)
- 5) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal diffusion)
- 6) การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (Hydrodynamic flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม เนื่องจากแบบจำลองของ Luikov มีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปรและพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงยังไม่มี การนำแบบจำลองไปใช้เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความเข้มข้นของความชื้น อัตราการถ่ายเทมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นของความชื้น และสามารถเขียนได้ว่า [29]

$$\dot{m} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.3)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการถ่ายเทมวล; kg/hr

A คือ พื้นที่การถ่ายเทมวล; m²

x คือ ระยะทาง; m

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น; m²/hr

C คือ ความเข้มข้นของความชื้น; kg/m³

เมื่อพิจารณาอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าและออกจากปริมาตรบังคับ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรบังคับ โดยเริ่มที่แกน x ก่อน จะเขียนอัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับได้ว่า

$$\dot{m}_{w|x} = AD \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.4)$$

และเขียนอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับได้ว่า

$$\dot{m}_{w|x+dx} = -AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial (AD \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} \right] dx \quad (2.5)$$

และอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลในปริมาตรบังคับ

$$\left[A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) \right] dx \quad (2.6)$$

เมื่อ t คือ เวลา; hr

จากกฎทรงมวลจะได้ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของมวลเข้าปริมาตรบังคับย่อมเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรบังคับบวกกับอัตราการเคลื่อนที่ของมวลออกจากปริมาตรบังคับ ดังนั้น

$$-AD \frac{\partial C}{\partial x} = A \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) dx - AD \frac{\partial C}{\partial x} - \left[\frac{\partial (AD \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} \right] dx \quad (2.7)$$

หรือ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(D\frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} \quad (2.8)$$

ถ้าหารสมการ (2.8) ด้วยความหนาแน่นของวัสดุ จะได้ว่า

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(D\frac{\partial M}{\partial x})}{\partial x} \quad (2.9)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

ถ้าพิจารณาการถ่ายเทมวลในทิศทาง X, Y, Z ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน จะได้ว่า

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(D\frac{\partial M}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(D\frac{\partial M}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(D\frac{\partial M}{\partial z})}{\partial z} \quad (2.10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขึ้นอยู่กับความชื้นของวัสดุ อย่างไรก็ตามเราอาจสมมุติได้ว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าคงที่ในช่วงความชื้นของวัสดุที่ไม่กว้างมากนัก ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อการแก้สมการ สมการ (2.10) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

หากกำหนดภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตสำหรับวัตถุรูปทรงเหลี่ยม ซึ่งมีความกว้าง l_x ความยาว l_y และความหนา l_z ดังนี้

$$M(x, y, z, 0) = M_{in} \quad (2.12)$$

$$M(0, y, z, t) = M(x, 0, z, t) = M(x, y, 0, t) = M_{eq} \quad (2.13)$$

$$M(l_x, y, z, t) = M(x, l_y, z, t) = M(x, y, l_z, t) = M_{eq} \quad (2.14)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

โดยที่ M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

และกำหนด สภาวะเริ่มต้น

$$MR = \frac{(M - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (2.15)$$

แทนค่า MR จากสมการ (2.35) ลงในสมการ (2.31) จะได้

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 MR}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 MR}{\partial z^2} \right) \quad (2.16)$$

จะสามารถหาคำตอบโดยวิธีแยกตัวแปร โดยสมมุติว่า

$$MR(x, y, z, t) = MR_x(x, t) MR_y(y, t) MR_z(z, t) \quad (2.17)$$

แทนค่า MR จากสมการ (2.17) ลงในสมการ (2.16) จะได้ว่า

$$\frac{1}{MR_x} \left(D \frac{\partial^2 MR_x}{\partial x^2} + \frac{\partial MR_x}{\partial t} \right) + \frac{1}{MR_y} \left(D \frac{\partial^2 MR_y}{\partial y^2} + \frac{\partial MR_y}{\partial t} \right) + \frac{1}{MR_z} \left(D \frac{\partial^2 MR_z}{\partial z^2} + \frac{\partial MR_z}{\partial t} \right)$$

สมการนี้จะสอดคล้องกับกับสมการ (2.16) ก็ต่อเมื่อทุก ๆ เทอมทางด้านซ้ายของสมการมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นสามารถแยกออกได้สามสมการดังนี้

$$\frac{\partial MR_x}{\partial t} = \frac{\partial^2 MR_x}{\partial x^2} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial MR_y}{\partial t} = \frac{\partial^2 MR_y}{\partial y^2} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial MR_z}{\partial t} = \frac{\partial^2 MR_z}{\partial z^2} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\bar{x} = \frac{x}{l_x} \quad (2.21)$$

$$\theta = \frac{Dt}{l_x^2} \quad (2.22)$$

พหุคูณ ปณ ทัต ชีเว

แทนค่า \bar{X} และ θ ลงในสมการ (2.18) จะได้

$$\frac{\partial MR_x}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 MR_x}{\partial \bar{x}^2} \quad (2.23)$$

โดยมีภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตดังนี้

$$MR_x(\bar{x}, 0) = 1 \quad (2.24)$$

$$MR_x(0, \theta) = 0 \quad (2.25)$$

$$MR_x(1, \theta) = 0 \quad (2.26)$$

โดยใช้วิธีแยกตัวแปร สมมติว่า

$$MR_x(\bar{x}, \theta) = X(\bar{x})T(\theta) \quad (2.27)$$

แทนค่า x MR ลงในสมการ (2.43) จะได้

$$\left(\frac{1}{T}\right) \frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial \bar{x}^2} \quad (2.28)$$

เนื่องจากเทอมทางซ้ายเป็นฟังก์ชันของ θ และเทอมทางขวาเป็นฟังก์ชันของ X และทั้ง θ และ \bar{x} ต่างก็เป็นตัวแปรอิสระ ดังนั้นเทอมทางซ้ายและทางขวาจะต้องมีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในที่นี้สมมติให้เท่ากับ $-c^2$ เมื่อ c เป็นเลขจริง จากสมการ (2.28) จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} + c^2 T = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial^2 X}{\partial \bar{x}^2} + c^2 X = 0 \quad (2.30)$$

จะสามารถหาคำตอบของสมการ (2.29) และ (2.30) ได้ว่า

$$T = Ce^{-c^2\theta} \quad (2.31)$$

$$X = a\sin(c\bar{x}) + b\cos(c\bar{x}) \quad (2.32)$$

แทนค่า x และ T ลงในสมการ (2.47) จะได้

$$MR_x = [a\sin(c\bar{x}) + b\cos(c\bar{x})] ce^{-c^2\theta}$$

หรือ

$$MR_x = [A\sin(c\bar{x}) + B\cos(c\bar{x})] e^{-c^2\theta} \quad (2.33)$$

จากภาวะขอบเขต $MR_x(0, \theta) = 0$ จะได้ว่า $B^{-c^2\theta} = 0$ ซึ่ง B จะต้องเท่ากับศูนย์จากภาวะขอบเขต $MR_x(1, \theta) = 0$ จะได้ว่า $A\sin ce^{-c^2\theta} = 0$ เนื่องจากสมการจะต้องมีคำตอบดังนั้น A จะต้องไม่เท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$\sin c = 0$$

$$c = n\pi$$

(2.34)

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$

แทนค่า $c = n\pi$ และ $B = 0$ ลงในสมการ (2.33) จะได้

$$(MR_x)_n = A_n \sin(n\pi\bar{x}) e^{-n^2\pi^2\theta}$$

$$MR_x = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\pi\bar{x}) e^{-n^2\pi^2\theta} \quad (2.35)$$

จากภาวะเริ่มต้น $MR_x(\bar{x}, 0) = 1$ จะได้ว่า

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\pi\bar{x}) = 1 \quad (2.36)$$

คูณสมการ (2.35) ด้วย $A_n \sin(n\pi\bar{x})$ แล้วอินทิเกรตจาก 0 ถึง 1 จะได้

$$\sum_{n=1}^{\infty} A_n \int_0^1 \sin(n\pi\bar{x}) \sin(m\pi\bar{x}) d\bar{x} = \int_0^1 \sin(m\pi\bar{x}) d\bar{x} \quad (2.37)$$

เทอมในอินทิเกรตด้านซ้ายของสมการ (2.37) จะเท่ากับศูนย์ เมื่อ $m \neq n$ ดังนั้น

$$A_n \int_0^1 \sin(n\pi\bar{x}) d\bar{x} = \int_0^1 \sin(n\pi\bar{x}) d\bar{x} \quad (2.38)$$

$$A_n \left(\frac{1}{2}\right) = \left(\frac{1}{n\pi}\right) (1 - \cos n\pi)$$

$$A_n = \left(\frac{2}{n\pi}\right) (1 - \cos n\pi) \quad (2.39)$$

แทนค่า A_n ลงในสมการ (2.34) จะได้

$$MR_x = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{n\pi}\right) (1 - \cos n\pi) \sin(n\pi\bar{x}) e^{-n^2\pi^2\theta} \quad (2.40)$$

จะเห็นว่าเมื่อ $n = 2, 4, 6, \dots$ จะทำให้เทอม $(1 - \cos n\pi)$ เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะเหลือเทอมที่ n เป็นเลขคี่เท่านั้น ซึ่งค่า $n = 1, 3, 5, \dots$ จะทำให้เทอม $(1 - \cos n\pi) = 2$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.40) ใหม่ได้ว่า

$$MR_x = \left(\frac{4}{\pi}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)}\right] \sin[(2p+1)\pi\bar{x}] \exp[-(2p+1)^2\pi^2\theta] \quad (2.41)$$

โดยการอินทิเกรตสมการ (2.40) เทียบกับ \bar{x} จาก 0 ถึง 1 จะได้ค่าเฉลี่ยของ MR_x ที่เวลาใด ๆ

$$\overline{MR}_x(\theta) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2}\right] \exp[-(2p+1)^2\pi^2\theta] \quad (2.42)$$

แทนค่า $\theta = \frac{Dt}{l_x^2}$ ลงในสมการ (2.40) จะได้

$$\overline{MR}_x(t) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2}\right] \exp\left[-(2p+1)^2\pi^2 \frac{Dt}{l_x^2}\right] \quad (2.43)$$

สมการ (2.41) คือคำตอบของสมการ (2.18) ซึ่งหมายถึงการแพร่ของความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมาก (Infinite slab) ในทำนองเดียวกันจะหาคำตอบของสมการ (2.19) และ (2.20) ได้ว่า

$$\overline{MR}_y(t) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2}\right] \exp\left[-(2p+1)^2\pi^2\frac{Dt}{l_y^2}\right] \quad (2.44)$$

$$\overline{MR}_z(t) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2}\right] \exp\left[-(2p+1)^2\pi^2\frac{Dt}{l_z^2}\right] \quad (2.45)$$

เมื่อ \overline{MR}_y และ \overline{MR}_z คืออัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของวัสดุแผ่นแบนซึ่งกว้างและยาวมากในอีกสองทิศทางที่เหลือ

ถ้าอินทิเกรตสมการ (2.17) เทียบกับ x, y และ z เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ จะได้ว่า

$$\overline{MR} = \overline{MR}_x \overline{MR}_y \overline{MR}_z \quad (2.46)$$

แทนค่า $\overline{MR}_x, \overline{MR}_y$ และ \overline{MR}_z จากสมการ (2.43), (2.44) และ (2.45) ในสมการ (2.46) และคิดเพียงเทอมแรกเทอมเดียวจะได้ว่า (เทอมท้าย ๆ จะมีค่าน้อยลงเรื่อย ๆ)

$$\overline{MR} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left[-\pi^2 Dt \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2}\right)\right] \quad (2.47)$$

ถ้า $l_x = l_y = l_z = l$ ซึ่งเป็นกรณีของวัตถุทรงลูกบาศก์ จะสามารถเขียนสมการ (2.65) ใหม่ได้ว่า

$$\overline{MR} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \exp\left[-3\pi^2\frac{Dt}{l^2}\right] \quad (2.48)$$

เนื่องจากสมการ (2.47) และ (2.48) มีเพียงเทอมเดียว ในกรณีของวัสดุทรงลูกบาศก์และคิดเพียงสามเทอมแรกจะได้ว่า

$$\overline{MR} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \left[\exp\left(-\frac{3\pi^2 Dt}{L^2}\right) + \frac{3}{9} \left(-\frac{11\pi^2 Dt}{L^2}\right) + \frac{3}{25} \left(-\frac{27\pi^2 Dt}{L^2}\right) \right] \quad (2.49)$$

จากสมการ (2.49) จะเห็นว่าแต่ละสมการประกอบด้วยจำนวนเทอมที่ไม่มีที่สิ้นสุด และเทอมท้าย ๆ จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ดังนั้นเราอาจตัดเทอมท้ายๆออกไปได้ โดยคงไว้เฉพาะเทอมแรก หรือสองสามเทอมแรกเท่านั้น ซึ่งคำตอบที่ได้อาจไม่ผิดไปมากนัก โดยเฉพาะเมื่อเวลาอบแห้งมีค่ามาก อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะใช้เพียงเทอมแรกและจัดรูปใหม่คือ

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \exp\left[-3\pi^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{l^2}\right] \quad (2.50)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (cm^2/min)

t คือ เวลาใดๆ (min)

จากสมการที่ (2.50) แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการอบแห้งก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของความดันไอน้ำภายในและภายนอกของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง โดย Arrhenius ได้สร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิกับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นไว้ดังนี้ คือ

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{\text{abs}}}\right) \quad (2.51)$$

เมื่อ D_0 คือ Arrhenius factor, m^2/s

E_a คือ พลังงานการกระตุ้น, kJ/mol

R ค่าคงตัวของก๊าซ มีค่าเท่ากับ $8.314 \times 10^{-3} \text{ kJ}/\text{mol}\cdot\text{K}$

2.7.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-Theoretical Modeling)

สำหรับสมการการอบแห้งทางกึ่งทฤษฎีนั้น สามารถสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะที่คงจะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุกับค่าความชื้นสมดุลของวัสดุ ซึ่งคล้ายกับกฎการเย็นตัวของ Newton สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dM}{dt} \propto -(M - M_{\text{eq}}) \quad (2.52)$$

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{\text{eq}}) \quad (2.53)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่การอบแห้ง; h^{-1}

รูปสมการที่ (2.51) ใหม่จะได้

$$\frac{dM}{(M-M_{eq})} = -kdt \quad (2.54)$$

กำหนดสถานะเริ่มต้น $M(0) = M_{in}$ หมายความว่าที่เวลาการอบแห้งเท่ากับศูนย์ ความชื้นของวัสดุจะมีค่าเท่ากับความชื้นเริ่มต้น

$$\int_{M_{in}}^M \frac{dM}{(M-M_{eq})} = -k \int dt \quad (2.55)$$

$$\ln(M - M_{eq}) - \ln(M_{in} - M_{eq}) = -kdt \quad (2.56)$$

$$\ln \frac{(M-M_{eq})}{(M_{in}-M_{eq})} = -kt \quad (2.57)$$

$$\ln MR = -kt \quad (2.58)$$

จัดรูปสมการ (2.58) ใหม่ให้อยู่ในรูป MR จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$MR = \exp(-kt) \quad (2.59)$$

ค่าคงที่ของการอบแห้งเป็นคุณสมบัติของแต่ละวัสดุ ดังนั้นสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีจึงสามารถใช้ทำนายการอบแห้งได้ถูกต้องเฉพาะที่สภาวะการอบแห้งและวัสดุชนิดเดียวกันกับที่ทำการศึกษาจากการทดลองเท่านั้น สำหรับสมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีที่ได้รับความนิยมสามารถแสดงได้ดังตาราง 2.1 ดังต่อไปนี้

ตาราง 2.1 สมการการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎี

สมการการอบแห้งกึ่งทฤษฎี	รูปแบบ	อ้างอิง	สมการ
newton	$MR = \exp(-kt)$	[30]	2.60
Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[31]	2.61
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$	[32]	2.62

2.7.3 สมการรอบแห้งเอมไพริคเคิล (Empirical Drying Equation)

สมการการอบแห้งเอมไพริคเคิลใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องที่เงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการ ต้องตรงกับสภาวะการทดลอง โดยสมการการอบแห้งเอมไพริคเคิลที่ได้รับความนิยมแสดงได้ดังตาราง 2.2 ดังต่อไปนี้

ตาราง 2.2 สมการการอบแห้งเอมไพริคเคิล

สมการการอบแห้งเอมไพริคเคิล	รูปแบบ	อ้างอิง	สมการ
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[33]	2.63
Modi Page	$MR = a \exp(-kt)^n$	[34]	2.64
Ademiluyi	$MR = a \exp(-kt)^n$	[35]	2.65

ตัวอย่างสมการอบแห้งแบบกึ่งทฤษฎีและแบบเอมไพริคเคิล สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด มีดังนี้

Kaleta [36] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีและเอมไพริคเคิลหกสมการคือ Newton, Henderson and Pabis, Logarithmic, Page, Modi Page และ Ademiluyi ซึ่งมีรูปสมการดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดลองของ Kaleta

Model No.	Model Name	Model Equation
1	newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
3	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + b$
4	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
5	Modi Page	$MR = a \exp(-kt)^n$
6	Ademiluyi	$MR = a \exp(-kt)^n$

สำหรับค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ (Constants and coefficients, coc) แต่ละตัวตามสมการทั้งห้านี้ อาจจะอธิบายด้วยสมการที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยอาจอยู่ในรูปแบบ Linear type, Rational r type, Exponential type, Arrhenius type และ Logarithmic type ดังนี้

$$\text{Linear coc} = A + BT \quad (2.66)$$

$$\text{Rational coc} = A + BT^{-1} \quad (2.67)$$

$$\text{Exponential coc} = A \exp(BT) \quad (2.68)$$

$$\text{Arrhenius type coc} = A \exp(-B/8.314T) \quad (2.69)$$

$$\text{Logarithmic coc} = A + B \ln(T) \quad (2.70)$$

เมื่อ A,B คือ ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ (Constants and coefficients, coc)
T คือ อุณหภูมิ, °C

ในงานวิจัยของ Kaleta [36] นี้เลือกใช้ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ (coc) แบบ Linear type, Rational type และ Logarithmic type ตามสมการที่ (2.66), (2.67) และ (2.70) ตามลำดับ ดังนั้นทำให้ได้สมการเอมไพริคเคิลรวมทั้งสิ้น 18 สมการ และผลจากการฟิตข้อมูลการทดลองอบแห้งแอปเปิ้ลด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดในช่วง 50-70 °C เข้ากับสมการเอมไพริคเคิลทั้ง 18 สมการ พบว่า สมการที่ทำนายผลได้ดีที่สุดเป็นสมการที่ดัดแปลงมาจากสมการของ Page คือ

$$MR = a \exp(-kt^n) \quad (2.71)$$

ตาราง 2.4 ค่าคงที่และสัมประสิทธิ์ (coc) จากการทดลองของ Kaleta

Type of parameter equation	Coefficients of parameter equation		parameter	R
	A	B		
Linear	0.048318	0.001079	k = 0.11308	0.9995
	0.547729	0.00326	n = 0.743323	
	0.96524	0.000272	a = 0.98158	
Rational	0.1685	-3.14675	k = 0.116054	0.9988
	0.916875	-9.82419	n = 0.753139	
	0.996625	-0.86456	a = 0.982216	
Logarithmic	-0.13852	0.061892	k = 0.114887	0.9988
	-0.01414	0.186331	n = 0.748762	
	0.909601	0.017706	a = 0.982097	

2.7.4 การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Regression) โดยใช้ค่า Coefficient of Determination (R^2), Chi-Square (χ^2), Root Mean Square Error (RMSE), และ sum square error (SSE) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง ถ้าค่าของ R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 ในขณะที่ค่า χ^2 , RMSE และ SSE มีค่าน้อยแสดงว่าสมการนั้นสามารถอธิบายผลการทดลองได้เป็นอย่างดี น่าพอใจ ค่าของ R^2 , χ^2 , RMSE, และ SSE สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{\text{pre}} - MR_{\text{exp},i})^2} \right] \quad (2.72)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \quad (2.73)$$

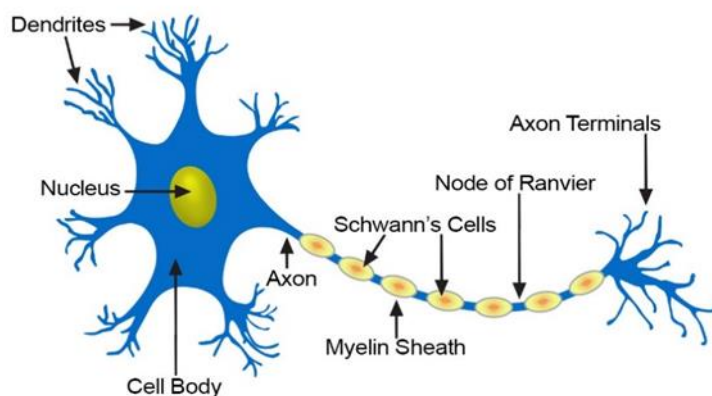
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.74)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pre},i})^2 \quad (2.75)$$

เมื่อ $MR_{\text{pre},i}$ คือ อัตราการความชื้นที่ทำนายด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์
 $MR_{\text{exp},i}$ คือ อัตราการความชื้นที่จากการทดลอง
 N คือ จำนวนข้อมูล

2.8 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network)

สมองของมนุษย์ประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neuron) ที่มีจำนวนอยู่ในช่วงของ 10 – 50 พันล้าน และ 50 ล้านล้านจุดประสานประสาท (Synapse) ในเปลือกสมอง ซึ่งเซลล์ประสาทเหล่านี้ถูกจัดเรียงได้ประมาณ 1000 โมดูล (Module) และในแต่ละโมดูลมี โครงข่ายประสาท (Neuralnetwork) ประมาณ 500 โครงข่าย และโครงข่ายเหล่านี้สามารถทำงาน และแก้ปัญหาได้พร้อมกัน



ภาพประกอบ 2.6 เซลประสาท (Biological Neural Network)

เนื่องจากคุณสมบัติของการกระจายแบบขนาน นั่นเอง ส่วนองค์ประกอบของเซลล์ประกอบแสดงดังภาพประกอบ 2.6 นั้นประกอบไปด้วย ตัวเซลล์ (Cell body) ไยประสาทนำเข้า (Dendrite) และใยประสาทนำออก (Axon) ซึ่งการเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ประสาทเป็นการเชื่อมต่อระหว่างใยประสาทนำออกของเซลล์หนึ่งไปยังใยประสาทนำเข้าของอีกเซลล์หนึ่ง และเส้นเชื่อมเหล่านี้ถูกเรียกว่าจุดประสานประสาท (Synapse) ดังนั้นการส่งต่อสัญญาณจะเป็นการส่งต่อสัญญาณจากใยประสาทนำเข้า ผ่านตัวเซลล์และใยประสาทนำออก ไปยังเซลล์อื่น นั่นเอง [Engelbrecht07] แต่การส่งต่อสัญญาณจะกระทำก็ต่อเมื่อเซลล์นั้นถูกกระตุ้นเท่านั้น ดังนั้นเซลล์ประสาทสามารถยับยั้ง (Inhibit) หรือ กระตุ้น (Excite) สัญญาณได้ ยกตัวอย่างเช่นการที่มีเข็มปักที่นิ้วมือ ก็จะมีการส่งสัญญาณจากปลายนิ้วมือและส่งผ่านเซลล์ ในลักษณะเดียวกันจนกระทั่งสัญญาณนั้นไปถูกแปลผลที่สมอง ทำให้มนุษย์รู้สึกได้ถึงความเจ็บที่ปลายนิ้วมือนั้น [37]

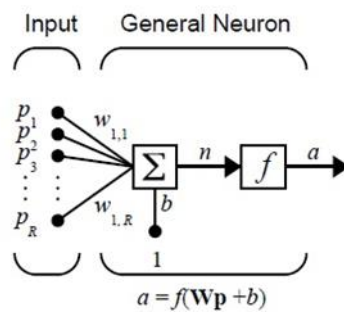
2.8.1 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เป็นการจำลองการทำงานโครงข่ายประสาทของมนุษย์ (Biological Neurons) โดยมีโหนดอินพุตเป็นตัวรับข้อมูล แล้วส่งต่อข้อมูลไปที่นิวรอน (Neuron) โดยผ่านค่าน้ำหนัก (Weight) ซึ่งนิวรอนจะมีการประมวลผลกับฟังก์ชันกระตุ้น (Activate Function) แบบขนานกับอินพุตโหนดตัวอื่นด้วย หลังจากนั้นจะส่งข้อมูลไปยังโหนดถัดไป โครงข่ายประสาทสามารถเรียนรู้ได้จากข้อมูลฝึกสอน (Training Data) โดยผ่านกระบวนการเรียนรู้ (Learning process) โดยความรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมจะเก็บไว้ที่ค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าไบแอส (Bias) ดังภาพประกอบ 2.7

2) Multi - Input neuron เป็นแบบจำลองนิวรอนที่มีจำนวนอินพุตมากกว่า 1 อินพุต ดังภาพประกอบ 2.7 ซึ่งเป็นเวกเตอร์อินพุต $p_1, p_2 \dots \dots p_R$ โดยที่ R แทนจำนวนของสมาชิกในเวกเตอร์อินพุต สมาชิกทุกตัวในเวกเตอร์อินพุตคูณอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots \dots, w_{1,R}$ จากนั้นค่าทั้งหมดจะถูกนำมารวมกัน ถ้ามีค่าไบแอสก็จะถูกนำมารวมด้วยผลรวมที่ได้คือค่า Net input หลังจากนั้นจะส่งไปยังฟังก์ชันการถ่ายโอน เพื่อหาค่าเอาต์พุตสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังสมการต่อไปนี้

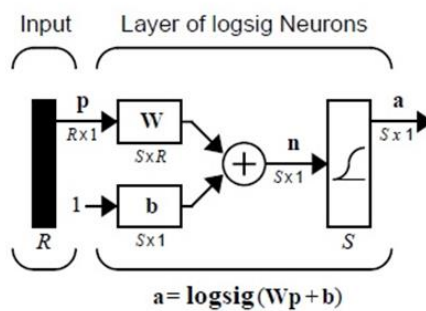
$$n = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots \dots + w_{1,R} p_R + b \tag{2.76}$$

$$a = f(wp + b) \tag{2.77}$$



ภาพประกอบ 2.9 นิวรอนที่มีหลายอินพุต

จากภาพประกอบ 2.9 จำนวนนิวรอนมีเพียงนิวรอนเดียวแต่จะประกอบไปด้วยจำนวนอินพุตหลายอินพุต เมื่อพิจารณาถึงโครงข่ายที่มีนิวรอนจำนวนมาก มีจำนวนของชั้นมากก็ยังมีรายละเอียดที่มากขึ้น ดังนั้นจึงมีการใช้สัญลักษณ์ย่อเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจดังภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.10 นิวรอนที่มีอินพุต R อินพุต [1]

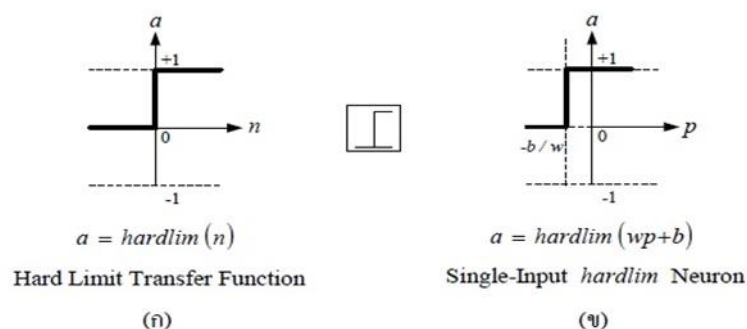
จากภาพประกอบ 2.10 ค่าอินพุตเวกเตอร์แทนด้วยแท่งสี่เหลี่ยมทึบแนวตั้งทางด้านซ้ายมือ มีขนาดของเวกเตอร์เท่ากับ $R \times 1$ นำไปคูณกับเวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งมีขนาดเท่ากับ $1 \times R$ แล้วนำค่าไบแอสที่มีขนาดเท่ากับ 1×1 มาบวกรวมไปด้วยที่ Summing Junction ก่อนที่จะส่งผลรวมนี้ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 1×1 ไปยังฟังก์ชันการถ่ายโอนเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตออกมา ในกรณีนี้ค่าเอาต์พุตที่ได้จะมีขนาดเท่ากับ 1×1 เป็นปริมาณสเกลาร์ แต่ถ้ามีจำนวนนิวรอนมากกว่าหนึ่งนิวรอน ค่าเอาต์พุตที่ได้จะเป็นปริมาณเวกเตอร์

2.8.3 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

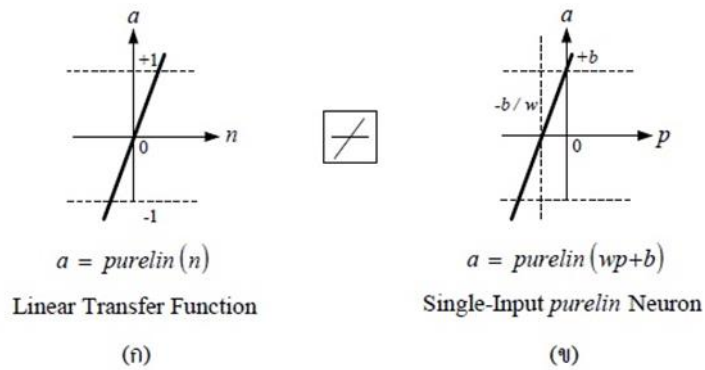
ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) หรือฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) เป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้น หรือเป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ฟังก์ชันการถ่ายโอนมีหลายชนิด ฟังก์ชัน แต่มีฟังก์ชันการถ่ายโอนอยู่ 3 รูปแบบที่ถูกเลือกใช้อยู่เสมอ ได้แก่ฟังก์ชันแบบจำกัดแข็ง (Hard limit) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเชิงเส้น (Linear) ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบ ลอกซิกมอยด์ (Logarithmic – Sigmoid) และฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไฮเพอโบลิก แทนเจนต์ซิกมอยด์ หรือแทนซิกมอยด์ (Hyperbolic tangent sigmoid)

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hard limit แสดงดังภาพประกอบ 2.11 จะเห็นได้ว่าถ้าค่า Net input (n) มีค่าน้อยกว่า 0 ค่าเอาต์พุต (a) ที่ได้ออกมาจากฟังก์ชันการถ่ายโอนจะมีค่า เป็น 0 แต่ถ้าค่า Net input มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 ค่าเอาต์พุตที่ได้ออกมาจากฟังก์ชันการถ่ายโอนจะมีค่า เป็น 1 ฟังก์ชันแบบนี้ใช้เมื่อต้องการแบ่งแยกข้อมูลอินพุตออกเป็น 2 กลุ่ม ส่วนภาพประกอบ 2.11 (ข) แสดงให้เห็นว่ากราฟจะไม่ผ่านจุดกำเนิด (0,0) เนื่องจากผลของการกำหนดค่าไบแอสเข้าไปตอนเริ่มต้น

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น แสดงดังภาพประกอบ 2.12 จะเห็นได้ว่าไม่ว่าค่า Net Input จะมีค่าเท่าใดก็ตาม $(-\infty, +\infty)$ ค่าเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าอินพุต ($a = n$) เสมอ



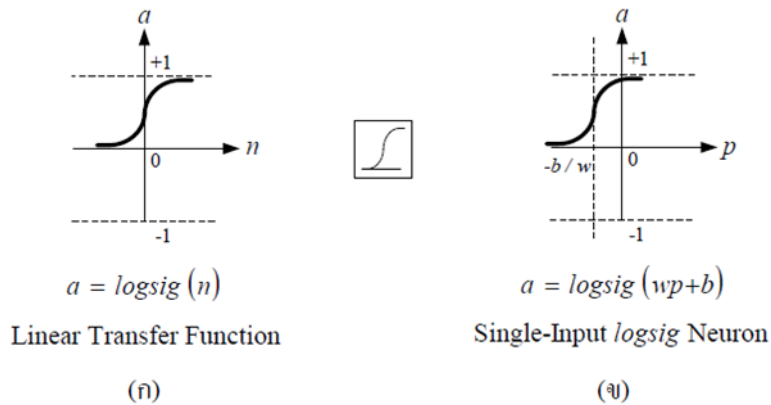
ภาพประกอบ 2.11 (ก) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hard Limit ผ่านจุดกำเนิด (ข) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hard Limit ไม่ผ่านจุดกำเนิด



ภาพประกอบ 2.12 (ก) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น ผ่านจุดกำเนิด (ข) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบเชิงเส้น ไม่ผ่านจุดกำเนิด

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log - Sigmoid แสดงได้ดังภาพประกอบ 2.8 จะเห็นได้ว่าไม่ว่าค่า Net input จะมีค่าเท่าใดก็ตาม $(-\infty, +\infty)$ ค่าเอาต์พุตที่ได้ออกมาจากฟังก์ชันการถ่ายโอนจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เขียนแทนได้ว่า $(0,1)$ กราฟจะเป็นรูป S - Curve ดังสมการ (2.78)

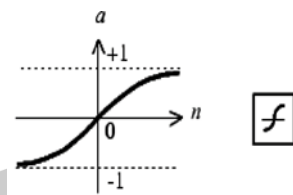
$$a = \frac{1}{1+e^{-n}} \tag{2.78}$$



ภาพประกอบ 2.13 (ก) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log - Sigmoid ผ่านจุดกำเนิด (ข) ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Log - Sigmoid ไม่ผ่านจุดกำเนิด

ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Hyperbolic tangent เป็นฟังก์ชัน sigmoid แบบหนึ่ง [38] บางครั้งเราเรียกว่า tansigmoid ดังสมการที่ (2.79) และแสดงกราฟ tansigmoid ได้ดังภาพประกอบ 2.14

$$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \tag{2.79}$$



$$a = \text{tansig}(n)$$

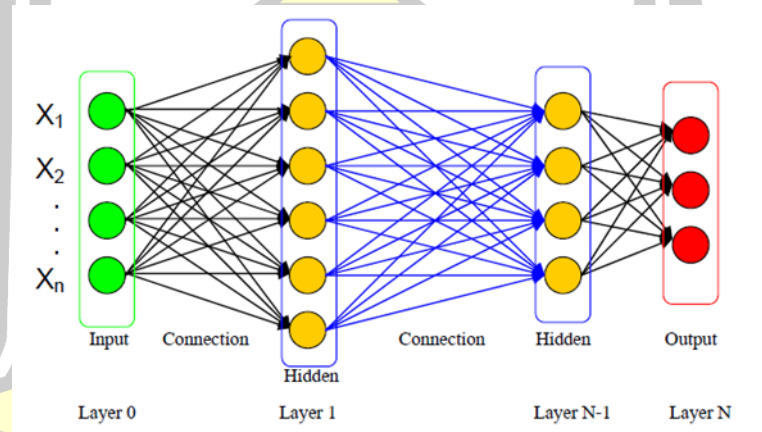
Tan-Sigmoid Transfer Function

ภาพประกอบ 2.14 ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบ Tan Sigmoid

2.8.4 หลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

Neural Network เริ่มจากข้อมูล Input Node ที่เข้ามายัง Network โดยการนำค่า Input มาคูณกับค่า Weight ของแต่ละ Attribute และผลรวมที่ได้มาเทียบกับค่า Threshold ที่กำหนดไว้ โดยหากผลรวมมีค่ามากกว่า Threshold นั้น ค่า Output ที่ได้นี้ก็จะถูกส่งไปยัง Input ใน Node อื่น เพื่อเชื่อมกัน

$$\text{if (sum(input * weight) > threshold) then output} \quad (2.80)$$



ภาพประกอบ 2.15 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

สิ่งสำคัญคือเราต้องทราบค่า Weight และ Threshold สำหรับสิ่งที่เราต้องการเพื่อให้คอมพิวเตอร์รู้จัก ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แน่นอน แต่สามารถกำหนดให้คอมพิวเตอร์ปรับค่าเหล่านั้นได้โดยการสอนให้มันรู้จัก Pattern ของสิ่งที่เราต้องการให้มันรู้จักเรียกว่า "Back propagation" ซึ่งเป็นกระบวนการย้อนกลับของการรู้จัก ในการฝึก Feed-forward neural networks จะมีการใช้อัลกอริทึมแบบ Back-propagation เพื่อใช้ในการปรับปรุงน้ำหนักคะแนนของเครือข่าย (Network weight) หลังจากใส่รูปแบบข้อมูลสำหรับเรียนรู้ใน Attribute แต่ละแล้ว ค่าจาก Output Node จะ

ถูกนำไปเทียบผลค่า Threshold เพื่อคำนวณหา Error โดยค่า Error นี้จะถูกส่งเข้า Network เพื่อแก้ไข Weight ต่อไป

เอาต์พุตของแต่ละโหนดจะหาค่าได้ตามสมการ (2.79)

$$y_i = f(w_i^1 x_1 + w_i^2 x_2 + w_i^3 x_3 + \dots + w_i^m x_m) \quad (2.81)$$

$$= f \sum_j w_i^j x_j$$

เมื่อ x_i คือ อินพุตจากโหนด

W_{ij} คือ น้ำหนัก (Weight) ของแต่ละแขน

2.8.5 กระบวนการฝึกฝน (Training Algorithm)

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

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

2) การฝึกฝนแบบ Batch Gradient Descent with Momentum (Traingd) เป็นรูปแบบการฝึกฝนที่พัฒนาให้มีความเร็วในการไปถึงจุดที่เหมาะสมเร็วกว่า การฝึกฝนแบบ batch Gradient Descent (Traingd) โดยมีการใช้โมเมนตัมเข้ามาช่วย ซึ่งโมเมนตัมจะเข้ามาช่วยเพิ่มการเรียนรู้แบบย้อนกลับโดยการเปลี่ยนน้ำหนักให้เท่ากับผลรวมสัดส่วนระหว่างน้ำหนักสุดท้ายที่เปลี่ยนกับน้ำหนักที่ต้องการให้เปลี่ยน ขนาดการเปลี่ยนน้ำหนักขึ้นกับค่าโมเมนตัมที่ตั้งไว้ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

3) การฝึกฝนแบบ Batch Gradient Descent with Adaptive Learning Rate (Traingda) ประสิทธิภาพของการคำนวณขึ้นกับอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ถ้าตั้งอัตราการเรียนรู้ไว้สูงการคำนวณจะแกว่งและไม่เสถียร แต่ถ้าตั้งอัตราการเรียนรู้ไว้ต่ำการคำนวณให้ถึงก็จะใช้เวลานานกว่าจะถึงจุดที่เหมาะสม ดังนั้นจึงไม่สามารถบอกได้ว่าควรตั้งอัตราการไว้ที่เท่าใด แต่ความจริงแล้วอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมควรจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างการฝึกฝน การเปลี่ยนแปลงอัตราการเรียนรู้ต้องพยายามรักษาขนาดการเรียนรู้ที่เป็นไปได้เพื่อให้การเรียนรู้เสถียร การเปลี่ยนค่าอัตราการเรียนรู้จะต้องดูจากสภาพแวดล้อมทั่วไปด้วย ถ้าอัตราการเรียนรู้มากขึ้นแต่

ผลการเรียนรู้ค่อนข้างคงที่ อัตราการเรียนรู้ก็จะถูกเพิ่มขึ้นไปอีก แต่ถ้าเพิ่มอัตราการเรียนรู้แล้วความคลาดเคลื่อนลดลง อัตราการเรียนรู้ก็จะถูกลดลงจนกระทั่งความคลาดเคลื่อนค่อนข้างคงที่

4) การฝึกฝนแบบ Resilient Backpropagation (Trainrp) จุดประสงค์ของการฝึกฝนแบบ Resilient Backpropagation คือ เพื่อกำจัดผลของการลดอนุพันธ์ ซึ่งสัญลักษณ์ของอนุพันธ์จะบอกทิศทางในการปรับน้ำหนัก แต่ขนาดของอนุพันธ์ไม่มีผลต่อการปรับขนาดน้ำหนัก

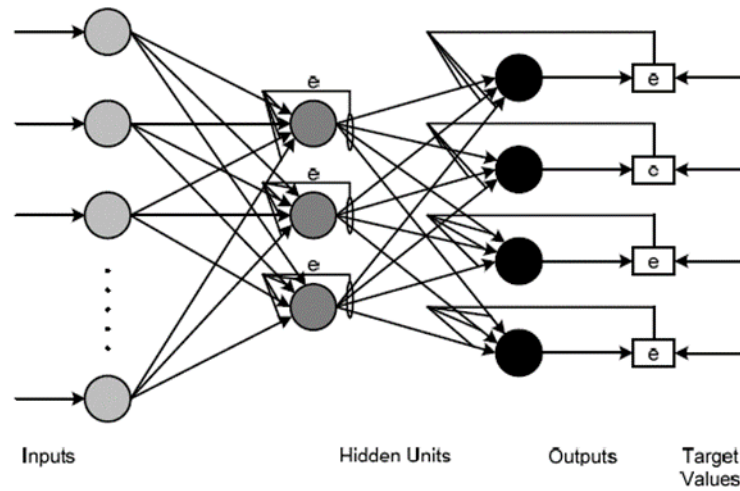
5) การฝึกฝนแบบ Conjugate Gradient Descent Backpropagation การฝึกฝนแบบนี้แตกต่างจากการคำนวณทั่วไป เนื่องจากการคำนวณทั่วไปจะมุ่งถึงอัตราการเรียนรู้เท่านั้น แต่การฝึกฝนแบบ Conjugate Gradient Descent Backpropagation จะมุ่งถึงขนาดในการขยับแต่ละครั้ง ซึ่งมีรูปแบบการหาขนาดในการขยับมีหลายแบบ เช่น Fletcher-Reeves Update (Traincgrf), Polak-Ribiere Update (Traincgp), Powell-Beale Restarts (Traincgb) และ Scaled Conjugate Gradient (Trainscg)

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

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

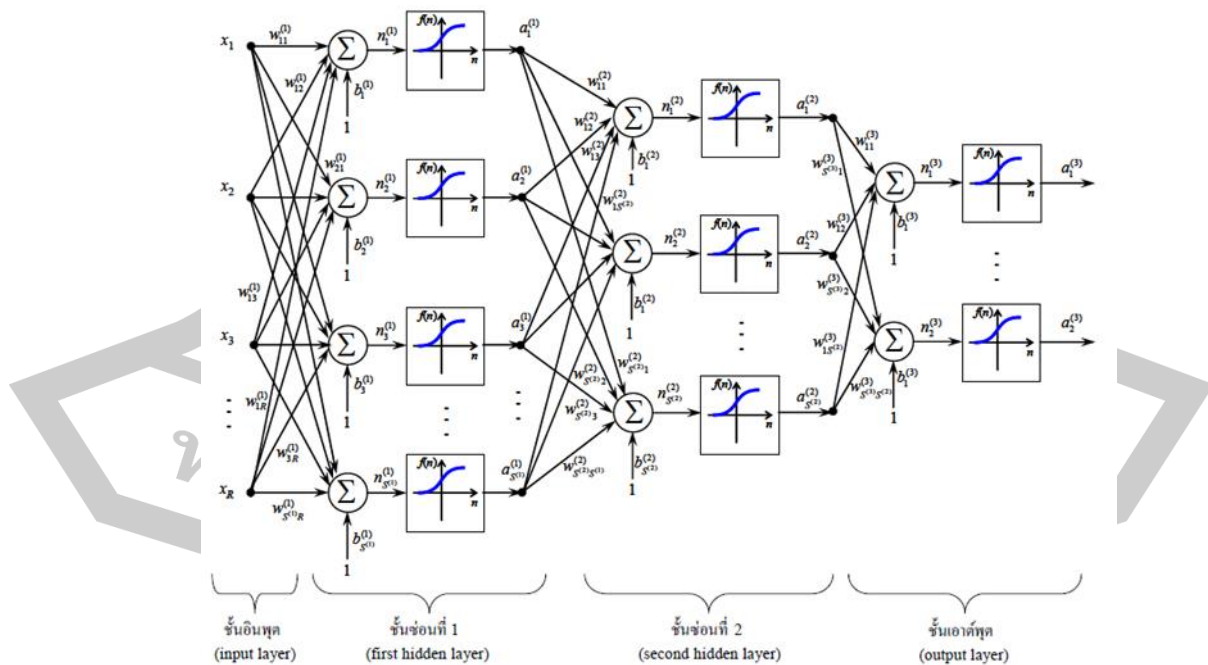
2.8.6 การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับ (Back Propagation Learning)

การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับเป็นการเรียนรู้แบบมีการสอน (Supervised Training) รูปแบบหนึ่ง สามารถใช้กับโครงข่ายแบบ Multilayer Feedforward และสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันการถ่ายโอนแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่แตกต่างกันได้ การเรียนรู้แบบแพร่ค่าย้อนกลับใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสม (Optimization) แบบ Gradient Descent ทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ ในระหว่างการเรียนรู้รูปแบบของอินพุต (Input Pattern) จะเข้าสู่โครงข่ายตามลำดับผ่านชั้นต่าง ๆ ในทิศทางไปข้างหน้า จนกระทั่งได้รูปแบบของเอาต์พุต (Output Pattern) นั้นออกมา ค่าเอาต์พุตที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมาย (Target values) ซึ่งจะได้ค่าความคลาดเคลื่อน และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จะถูกแพร่ค่าย้อนกลับไป เพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละชั้นในทิศทางย้อนกลับจะเป็นดังกระบวนการนี้ไปจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงถือว่าการเรียนรู้ของโครงข่ายสิ้นสุดลง ซึ่งแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.16



ภาพประกอบ 2.16 ขั้นตอนการแพร่ค่าย้อนกลับ

โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Multilayer Feedforward ดังภาพประกอบ 2.17 จะประกอบไปด้วยชั้นอินพุต (Input Layer) ชั้นซ่อน (Hidden Layer) และชั้นเอาต์พุต (Output Layer) ซึ่งในชั้นซ่อนจะมีเพียงชั้นเดียวหรือมากกว่าหนึ่งชั้นก็ได้



ภาพประกอบ 2.17 โครงข่ายประสาทเทียม Multilayer Feedforward แบบ 2 ชั้น

การคำนวณโครงข่ายประสาทเทียมแบบเปอร์เซ็ปตรอนสองชั้น โดยกำหนดให้ x เป็น
เวกเตอร์อินพุต

กำหนดให้	x	คือ	เวกเตอร์อินพุต
	$w^{(1)}$	คือ	เมตริกซ์น้ำหนักชั้นซ่อนที่หนึ่ง
	$b^{(1)}$	คือ	เวกเตอร์ไบแอสของชั้นซ่อนที่หนึ่ง
	$w^{(2)}$	คือ	เมตริกซ์น้ำหนักชั้นซ่อนที่สอง
	$b^{(2)}$	คือ	เวกเตอร์ไบแอสของชั้นซ่อนที่สอง
	$a^{(1)}$	คือ	เอาต์พุตเวกเตอร์ของชั้นซ่อนที่หนึ่ง
	$a^{(2)}$	คือ	เอาต์พุตเวกเตอร์ของชั้นซ่อนที่สอง

ดังนั้นจากภาพประกอบ 2.17 จึงสามารถเขียนค่าพารามิเตอร์ต่างให้อยู่ในรูปแบบของ
เมตริกซ์ได้ดังนี้ [39]

$$w^{(1)} = \begin{bmatrix} w_1^{(1)T} \\ w_2^{(1)T} \\ \vdots \\ w_{s^{(1)}}^{(1)T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}^{(1)} & w_{12}^{(1)} & \dots & w_{1R}^{(1)} \\ w_{21}^{(1)} & w_{22}^{(1)} & \dots & w_{2R}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{s^{(1)}1}^{(1)} & w_{s^{(1)}2}^{(1)} & \dots & w_{s^{(1)}R}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

$$b^{(1)} = \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ b_2^{(1)} \\ \vdots \\ b_{s^{(1)}}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

$$w^{(2)} = \begin{bmatrix} w_1^{(2)T} \\ w_2^{(2)T} \\ \vdots \\ w_{s^{(1)}}^{(2)T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}^{(2)} & w_{12}^{(2)} & \dots & w_{1R}^{(2)} \\ w_{21}^{(2)} & w_{22}^{(2)} & \dots & w_{2R}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{s^{(1)}1}^{(2)} & w_{s^{(1)}2}^{(2)} & \dots & w_{s^{(1)}R}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

$$b^{(2)} = \begin{bmatrix} b_1^{(2)} \\ b_2^{(2)} \\ \vdots \\ b_{s^{(2)}}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

$$\mathbf{n}^{(1)} = \begin{bmatrix} n_1^{(1)} \\ n_2^{(1)} \\ \vdots \\ n_{s^{(1)}}^{(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{w}^1 \mathbf{x} + \mathbf{b}^1 \quad (2.86)$$

$$\mathbf{a}^{(1)} = f^1(\mathbf{n}^{(1)}) = \begin{bmatrix} f(n_1^{(1)}) \\ f(n_2^{(1)}) \\ \vdots \\ f(n_{s^{(1)}}^{(1)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{(1)} \\ a_2^{(1)} \\ \vdots \\ a_{s^{(1)}}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

$$\mathbf{n}^{(2)} = \begin{bmatrix} n_1^{(2)} \\ n_2^{(2)} \\ \vdots \\ n_{s^{(1)}}^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{w}^2 \mathbf{a}^1 + \mathbf{b}^1 \quad (2.88)$$

$$\mathbf{a}^{(2)} = f^2(\mathbf{n}^{(2)}) = \begin{bmatrix} f(n_1^{(2)}) \\ f(n_2^{(2)}) \\ \vdots \\ f(n_{s^{(1)}}^{(2)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{(2)} \\ a_2^{(2)} \\ \vdots \\ a_{s^{(2)}}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

ดังนั้นตัวชี้ค่าผิดพลาดของการทำให้บรรลุผลสำเร็จ (Error Performance Index) ของการเรียนรู้จะใช้ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error: MSE) เป็นตัวชี้วัดตามสมการ (2.90)

$$\text{MSE} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e_k^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (t_k - a_k)^2 \quad (2.90)$$

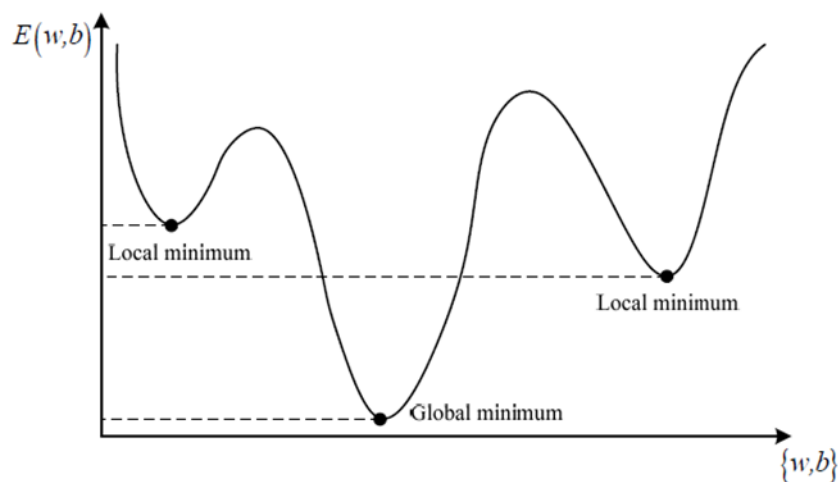
เมื่อ e_k คือ ค่าผิดพลาดของโครงข่าย

a_k คือ ค่าเอาต์พุตของโครงข่าย

t_k คือ ค่าเป้าหมายของโครงข่าย

โดยที่ $k = 1, 2, 3, \dots, K$ เมื่อ k คือจำนวนของข้อมูล

ซึ่งอัลกอริทึมค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดจะทำการปรับค่าน้ำหนักและไบแอสของโครงข่ายเชิงเส้นตรงราบเท่าที่ค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยยังถูกลดค่าลง เนื่องจากตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้ด้วยค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของโครงข่ายเชิงเส้นเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function) ดังนั้นตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้จะเป็นค่าผิดพลาดที่ต่ำสุดเชิงกว้าง (Global Minimum) ค่าผิดพลาดต่ำสุดเฉพาะพื้นที่ (Local Minimum) ค่าผิดพลาดต่ำสุดแบบอ่อน (Weak Minimum) หรือไม่มีค่าผิดพลาดที่ต่ำที่สุด (No Minimum) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของชุดข้อมูลอินพุต ดังภาพประกอบ 2.18



ภาพประกอบ 2.18 ตัวชี้การทำให้บรรลุผลสำเร็จของการเรียนรู้ของค่าผิดพลาด

กำหนดให้

$$E(x) = (t_k - a_k)^2 = e_k^2 \quad (2.91)$$

ดังนั้นเมื่อใช้กฎการเรียนรู้แบบค่าผิดพลาดกำลังสองต่ำสุดปรับค่าน้ำหนักและไบแอสเพื่อลดค่าผิดพลาดจะได้ค่าตามสมการต่อไปนี้ [39]

$$w_{ij}^{(l)}(k+1) = w_{ij}^{(l)}(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(l)}} \quad (2.92)$$

$$b_i^{(l)}(k+1) = b_i^{(l)}(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial b_i^{(l)}} \quad (2.93)$$

เมื่อ η คือ อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) ควรมีค่าเล็ก ๆ ใกล้ศูนย์

l คือ จำนวนชั้นในโครงข่าย

เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ฟังก์ชันค่าผิดพลาดจะไม่ใช่ฟังก์ชันโดยตรงกับค่าน้ำหนักในชั้นซ่อน ดังนั้นการหาค่าอนุพันธ์จะไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงแต่ต้องอาศัยกฎลูกโซ่ (Chain Rule) ซึ่งสมมติให้ตัวแปร f เป็นฟังก์ชันโดยตรงฟังก์ชันเดียวของตัวแปร n ต้องการหาอนุพันธ์ของ f เทียบกับตัวแปร w จะได้กฎลูกโซ่ดังสมการนี้

$$\frac{df(n(w))}{dw} = \frac{df(n)}{dn} \times \frac{dn(w)}{dw} \quad (2.94)$$

จะได้

$$\frac{\partial E}{\partial w_i^{(l)}} = \frac{\partial E}{\partial n_i^{(l)}} \times \frac{\partial n_i^{(l)}}{\partial w_{ij}^{(l)}} \quad (2.95)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_i^{(l)}} = \frac{\partial E}{\partial n_i^{(l)}} \times \frac{\partial n_i^{(l)}}{\partial b_i^{(l)}} \quad (2.96)$$

ซึ่ง

$$n_i^{(l)} = \sum_{j=1}^{s^{(l-1)}} w_{ij}^{(l)} a_j^{(l-1)} + b_i^{(l)} \quad (2.97)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial n_i^{(l)}}{\partial w_{ij}^{(l)}} = a_j^{(l-1)} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial n_i^{(l)}}{\partial b_i^{(l)}} = 1 \quad (2.98)$$

จะได้

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}^{(l)}} = \frac{\partial E}{\partial n_i^{(l)}} (a_j^{(l-1)}) \quad \text{และ} \quad \frac{\partial E}{\partial b_i^{(l)}} = \frac{\partial E}{\partial n_i^{(l)}} \quad (2.99)$$

กำหนดให้ค่าลาดชันของค่าผิดพลาด (Error Gradient : $g_i^{(l)}$) เป็นสภาพรู้สึกได้ต่อค่าผิดพลาด (Error Sensitivities) หรือค่าอนุพันธ์ของค่าผิดพลาดเทียบกับ $n_i^{(l)}$ ของแต่ละชั้น l

$$g_i^{(l)} = \frac{\partial E}{\partial n_i^{(l)}} \quad (2.100)$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial E}{\partial w_i^{(l)}} = g_i^{(l)} a_i^{(l-1)} \quad (2.101)$$

$$\frac{\partial E}{\partial w_i^{(l)}} = g_i^{(l)} \quad (2.102)$$

ถ้าฟังก์ชันค่าลาดชันของค่าผิดพลาด $g_i^{(l)} > 0$ แสดงว่าฟังก์ชันค่าผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าฟังก์ชันค่าผิดพลาด $g_i^{(l)} < 0$ แสดงว่าฟังก์ชันค่าผิดพลาดมีค่าลดลง ถ้าฟังก์ชันค่าผิดพลาด $g_i^{(l)} = 0$ แสดงว่าฟังก์ชันค่าผิดพลาดเป็นค่าต่ำสุดที่บริเวณเฉพาะที่ ฟังก์ชันที่สามารหาค่าอนุพันธ์ได้จะมีค่า

เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกันกับความลาดชันขาขึ้นและมีค่าลดลงในทิศทางตรงกันข้ามนั่นหมายความว่าเมื่อต้องการค้นหาค่าผิดพลาดต่ำสุดในบริเวณเฉพาะที่ของฟังก์ชันค่าผิดพลาดโดยเริ่มจากค่าน้ำหนักเริ่มต้นจะต้องค้นหาไปในทิศทางลาดลง (Downhill) หรือการค้นหาในทิศทางที่ลาดชันที่สุด (Steepest Descent Method) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับค่าลบของค่าอนุพันธ์ของค่าความผิดพลาด ดังนั้นจากสมการ (2-49) และ (2-50) จะได้สมการใหม่คือ

$$w_{ij}^{(l)}(m+1) = w_{ij}^{(l)}(m) - \eta g_i^{(l)} a_j^{(l-1)} \quad (2.103)$$

$$b_i^{(l)}(m+1) = b_i^{(l)}(m) - \eta g_i^{(l)} \quad (2.104)$$

ดังนั้นค่าความลาดชันของค่าผิดพลาดที่ชั้นเอาต์พุตหาค่าได้ดังนี้

$$g_i^{(l)} = \frac{\partial E}{\partial n_i^{(L)}} = \frac{\partial \left((t_j - a_j)^T (t_i - a_i) \right)}{\partial n_i^{(L)}} \quad (2.105)$$

$$= \frac{\partial \sum_{j=1}^L (t_j + a_j)^2}{\partial n_i^{(L)}} = -2(t_i - a_i) \frac{\partial a_i}{\partial n_i^{(L)}} \quad (2.106)$$

เนื่องจาก

$$\frac{\partial a_i}{\partial n_i^{(L)}} = \frac{\partial a_i^{(L)}}{\partial n_i^{(L)}} = \frac{\partial f^{(L)}(n_i^{(L)})}{\partial n_i^{(L)}} = \dot{f}^{(L)}(n_i^{(L)}) \quad (2.107)$$

ดังนั้น

$$g_i^{(L)} = -2(t_i - a_i) \dot{f}(n_i^{(L)}) = -2e_i \dot{f}(n_i^{(L)}) \quad (2.108)$$

หรือ

$$g_i^{(L)} = -2\dot{F}(n^{(L)}) \quad (2.109)$$

เมื่อ

$$\dot{F}(n^{(L)})e = \begin{bmatrix} \dot{f}(n_1^{(L)}) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dot{f}(n_2^{(L)}) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dot{f}(n_s^{(L)}) \end{bmatrix} \quad (2.110)$$

และ $\dot{f}(n_i^{(L)})$ เป็นค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน f ของโครงข่ายที่ i ของชั้น L

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน เพื่อศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง และศึกษาจลนศาสตร์ในการอบแห้ง ตลอดจนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้ง

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งบุกและการอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เซชัน

Harish, A., [6] ได้ศึกษาการอบแห้ง หัวบุกด้วยไมโครเวฟ โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้กำลังไมโครเวฟตั้งแต่ 180 วัตต์ถึง 900 วัตต์ เพื่อศึกษาปัจจัย เวลา, อัตราการอบแห้ง, จลนศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดเวลาในการอบแห้ง จลนศาสตร์การอบแห้งแบบบางชั้นที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง บุก คือ สมการกึ่งทฤษฎี Midilli et al. ซึ่งค่า $R^2 (> 0.998)$ และมีค่าต่ำสุดของ RSS, RMSE และ Chi square นอกจากนี้ยังใช้วิธีการแพร่กระจายความชื้นของ Fick เพื่อหาค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลค่าในช่วง $4.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ถึง $4.2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ในสภาวะการอบแห้ง สมการ Arrhenius ที่ได้ถูกใช้ในการคำนวณพลังงานกระตุ้นซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับทุกความหนาของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 24.7 Wg^{-1}

Harish, A., [40] ได้ศึกษาอิทธิพลของกำลังไมโครเวฟที่ใช้ในการอบแห้งบุก โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้กำลังไมโครเวฟตั้งแต่ 180 วัตต์ถึง 900 วัตต์และความหนาของผลิตภัณฑ์ 5-15 mm. เพื่อศึกษาปัจจัย เวลา, อัตราการอบแห้ง, จลนศาสตร์การอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากการศึกษาพบว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟและลดเวลาในการอบแห้ง ใช้สมการการแพร่ของ Fick ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้ง และหาสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ซึ่งได้ค่าในช่วง $4.44 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ถึง $1.17 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ในสภาวะการอบแห้ง สมการ Arrhenius ที่ได้ถูกใช้ในการคำนวณพลังงานกระตุ้นซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับของผลิตภัณฑ์อยู่ระหว่าง 23.47 Wg^{-1} ถึง 9.23 Wg^{-1}

Wilton Pereira da Silva และคณะ [41] ได้ศึกษาการอบแห้งกล้วย เพื่อลดปัญหาความสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยววัตถุประสงค์หลักของการทดลองครั้งนี้ คือการหาสมการที่เหมาะสมมาอธิบายการอบแห้งบางชั้นของกล้วยทั้งหมด โดยเลือกแบบจำลองเชิงประจักษ์หลายแบบเพื่อจำลองการทดลองการอบแห้งชั้นบาง ด้วยกล้วยทั้งที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยการคำนวณอัตราการอบแห้งและระยะเวลากระบวนการ ช่วงเวลาของกระบวนการตั้งแต่ 1200 (70 C) ถึง 3265 (40 C) นาที อัตราการอบแห้งสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อเริ่มกระบวนการและแตกต่างกันระหว่าง 1.95×10^{-3} (40 C) และ 3.60×10^{-3} (70 C) นาที 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Page และ Silva et alii เป็นแบบที่ดีที่สุดในการอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ทั้งสองสมการสามารถใช้เขียนนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ได้อัตราการอบแห้งและระยะเวลาการผลิตได้เท่ากัน

Fumina Tanaka และคณะ [42] ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นบางโดยศึกษาการกระจายของอนุภาคในการอบแห้งข้าวบดเพื่อพัฒนาแบบจำลองปริมาณความชื้นในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง แบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่ทำนายพฤติกรรมการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุด ในการอบแห้งชั้นบาง ทำนายผลความชื้นเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ ที่การทดลองการอบแห้งที่มีข้อผิดพลาดเฉลี่ย 0.5% แห่งที่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Hosain Darvishi [15] ได้ศึกษา ผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศต่อสมบัติการอบแห้ง (Cracking, bulk density, การหดตัวและการคายความร้อนกลับ) ของเมล็ดถั่วเหลืองในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด การอบแห้ง ได้ทำการอบแห้งเมล็ดถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียสและความเร็วลม 1.8, 3.1 และ 4.5 เมตร/วินาที ถั่วเหลืองถูกอบแห้งจากความชื้นเริ่มต้น 25% (w.b) ถึงความชื้นสุดท้ายที่ 10% จากการทดลองการอบแห้งพบว่า อุณหภูมิการอบแห้งและความเร็วลมสูงทำให้เกิดการแตกร้าวสูงและอัตราการส่วนการให้การอบแห้งต่ำ ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตามความเร็วลมไม่มีผลต่อความหนาแน่นเชิงมวลและการหดตัวของถั่วเหลือง โดยการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วของอากาศให้เต็มช่วงเวลการอบแห้งลดลงจาก 380 เป็น 50 นาที การแตกหัก, ความหนาแน่นเชิงมวล, อัตราการหดตัวและอัตราการอบแห้งจาก 31.80% เป็น 58.22%, 1101.31 ถึง 1186.39 กก./ลูกบาศก์เมตร, 0.730 ถึง 0.787, และ 0.583 ถึง 0.873 ตามลำดับ

Agnieszka Kaleta [36] ได้พัฒนาสมการจลศาสตร์การอบแห้งชั้นใหม่เพื่อใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้น 3 รูปแบบ เพื่ออธิบายพฤติกรรมการอบแห้งของแอปเปิ้ล (Var. Ligo) ในการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด และหาสมการที่เหมาะสมของแบบจำลองใหม่เพื่ออธิบายลักษณะการอบแห้งเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิม 16 แบบจำลอง การวัดความถูกต้องของแบบจำลองการใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R), ความคลาดเคลื่อนรากของค่าความคลาดเคลื่อนราก (RMSE) และการลดโคสแควร์ (χ^2) สามโมเดลที่พัฒนาขึ้นใหม่ได้อธิบายลักษณะการอบแห้งของก้อนแอปเปิ้ลไว้อย่างน่าพอใจ ($R > 0.997$) แบบจำลองหน้าเว็บและแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นนี้สามารถพิจารณาได้ที่เหมาะสมที่สุด ($R > 0.9977$, $RMSE = 0.0094 - 0.0167$, $\chi^2 = 0.0001 - 0.0002$) ผลของการทำให้อากาศแห้งอุณหภูมิในแบบจำลองการอบแห้งถูกกำหนดด้วยการหดตัวของก้อนแอปเปิ้ลในช่วงการอบแห้งถูกวัดเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของแอปเปิ้ลแห้ง

M.J. Perea-Flores [43] ได้ศึกษาการอบแห้งเมล็ดน้ำมันละหุ่งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีโปรตีนเป็นจำนวนมากและไขมันเพื่อใช้ในการเก็บรักษาเมล็ดน้ำมันละหุ่งเพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพโดยศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเมล็ดน้ำมันละหุ่งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วลมคงที่ 7 m/s และอุณหภูมิอากาศสูง (80, 90, 100, 110 องศาเซลเซียส) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 6 แบบเพื่ออธิบาย ค่าคงที่ของอัตราการอบแห้ง, ค่า

สัมประสิทธิ์และพารามิเตอร์ๆในการอบแห้ง โดยสมการการแพร่ของ Fick, จากผลการทดลองพบว่ามีสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิภาพ มีค่าตั้งแต่ 8.21×10^{-10} ถึง 2.61×10^{-9} m^2/s และการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแพร่ โดยใช้สมการ Arrhenius-type เพื่อหาพลังงานกระตุ้นในการอบแห้ง พบว่าพลังงานกระตุ้นได้ค่า 41.41 kJ/mol ค่าที่ได้จากการทดลองอบแห้งเมล็ดน้ำมันละหุ่งในครั้งนี้เพื่อนำเป็นข้อมูลในการอบแห้งเพื่อยืดอายุเมล็ดน้ำมันละหุ่งสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

S.M. Tasirina และคณะ [44] ได้ศึกษาการอบแห้งใบมะกรูด (*Citrus hystrix* D.C.) เนื่องจากใบมะกรูดเป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นสมุนไพรและส่วนผสมอาหารที่มีกลิ่นหอม ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการอบแห้งของใบมะกรูดในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยทราย ด้วยความเร็วของอากาศ ที่ superficial air velocities 0.6, 0.7 และ 0.8 เมตรต่อวินาทีและอัตราส่วนมวลของใบมะกรูดต่อทราย (โดยไม่มีเฉื่อย, 0.04, 0.02 และ 0.01) ที่อุณหภูมิคงที่ 50 องศาเซลเซียส อิทธิพลของอัตราความเร็วและมวลของอากาศของใบมะกรูดต่อทรายที่ได้รับการทดสอบ. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศ และพบว่าการปรากฏตัวของอนุภาคเฉื่อยทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการอบแห้งลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนของมะกรูดกับทรายที่สูงขึ้น แบบจำลอง Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลศาสตร์การอบแห้ง เมื่อค่า r^2 และค่า RMSE ต่ำสุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองจลศาสตร์การอบแห้งแบบอื่น ๆ และยังพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วอากาศ จะแตกต่างกัน อยู่ในช่วง 2.61×10^{-11} ถึง $9.24 \times 10^{-11} m^2/s$ การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แห้งโดยใช้วิธีการอบแห้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ การอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดกับการอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และเตาอบในแง่สีและส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยและวิตามินซีและเอ ไม่มีส่วนผสมของน้ำมันหอมระเหยวิตามินซีและ A และสีเขียวของใบมะกรูดเมื่ออบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งและโครงข่ายประสาทเทียม

L.V. Kamblec และคณะ [45] ได้อธิบายถึงประสิทธิภาพการใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านการถ่ายเทความร้อนด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด รูปแบบต่าง ๆ เช่น ปัญหาความร้อนแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก๊าซไฮโดรเจน ฯลฯ ไม่สามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบดั้งเดิม จุดประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้คือการชี้ให้เห็นถึงความก้าวหน้าล่าสุดของ ANN จากการทดลองพบว่าพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบ feed-forward ด้วยเทคนิคการแพร่ย้อนกลับ (Back Propagation Technique) การวัดประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยและพารามิเตอร์ประสิทธิภาพการทำงาน เช่น RMSE, SSE และค่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมบูรณ์ ฯลฯ

Kaveh M., Chayjan R.A. [46] ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมในการอบแห้งผลไม้ terebinth fruit เพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล การหดตัวของผลิตภัณฑ์ อัตราการอบแห้ง อัตราส่วนความชื้นในการอบแห้ง โดยใช้เครือข่าย Neural Network Feed Forward (FFBP) และ Cascade Forward Neural Network (CFNN) รวมถึงอัลกอริทึมการฝึกอบรมของ Levenberg-Marquardt (LM) และ Bayesian regularization (BR) อุณหภูมิอากาศและความเร็วรอบอยู่ที่ 40-80 องศาเซลเซียสและ 0.81-4.35 เมตร/วินาทีตามลำดับ แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ดีที่สุดในการทำนาย สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลคือโครงข่ายประสาทเทียมแบบ CFNN ด้วยอัลกอริทึมการฝึกอบรม BR, โทโพโลยี 2-3-1 และ threshold function of TANSIG. ในทำนองเดียวกันผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับการใช้อัตราการแห้งตัวและอัตราส่วนความชื้นของแอนเน็ทิงสอดคล้องกับเครือข่าย CFNN ด้วยอัลกอริทึมการฝึกอบรม LM โครงสร้างพิกัด 3-2-4-2 และ threshold function of TANSIG.

Tayyeb Nazghelichi และคณะ [47] ได้ศึกษาการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนาย จลศาสตร์การอบแห้งของแครอทขนาด 4, 7, และ 10 มม. ด้วยฟลูอิดไดซ์เบด ที่อุณหภูมิของอากาศ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียสและความสูงของเบด 3, 6 และ 9 ซม. เป็นตัวแปรต้นในการทดลองเพื่อหาตัวแปรตาม คือ อัตราการอบแห้ง และอัตราส่วนความชื้น แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายพฤติกรรมรอบแห้งได้อย่างน่าพอใจคือค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.94 ถึง 0.96

Shivmurti Srivastav และคณะ [48] ได้ทำการทดลองอบแห้ง ซีสสดแบบอินเดีย (Paneer) ใอน้ำยิ่งยวด เพื่อหาจลศาสตร์การอบแห้งด้วยสมการเอมไพริคัล ปัจจัยในการวิเคราะห์คือความดันไอน้ำและอุณหภูมิ ที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง จากการศึกษพบว่า แบบจำลอง Page ใช้ทำนายสภาวะการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 (0.997) และ SD ต่ำกว่า (0.0043) เฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ k และ n ของสมการสำหรับ paneer 1 cm-cube แตกต่างกันตั้งแต่ 0.0041 ถึง 0.0067 และ 1.1552 ถึง 1.2209 ตามลำดับสำหรับลูกบาศก์ 1.5 ซม จาก 0.0021 ถึง 0.0044 และ 1.1987 ถึง 1.3032 ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวได้นำมาเปรียบเทียบกับ การหาจลศาสตร์การอบแห้งด้วยโครงข่ายประสาทเทียม จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมการอบแห้งด้วย โครงข่ายประสาทเทียม ANNs ปรากฏว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถหาค่าคำตอบได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำสูงในการหา ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม 1 hidden layers และ 5 neurons ค่า R^2 (0.9993) อัตราการอบแห้ง R^2 (0.9977) โครงข่ายประสาทเทียม 1 hidden layers และ 9 neurons อัตราส่วนความชื้น R^2 (0.9997) โครงข่ายประสาทเทียม 1 hidden layers และ 7 neurons จากผลลัพธ์การทดลองจะเห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถประยุกต์ใช้ในการทำนายเพื่อหาจลศาสตร์การอบแห้งได้ดี

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการทดลองและการหาค่าของตัวแปรต่าง ๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้

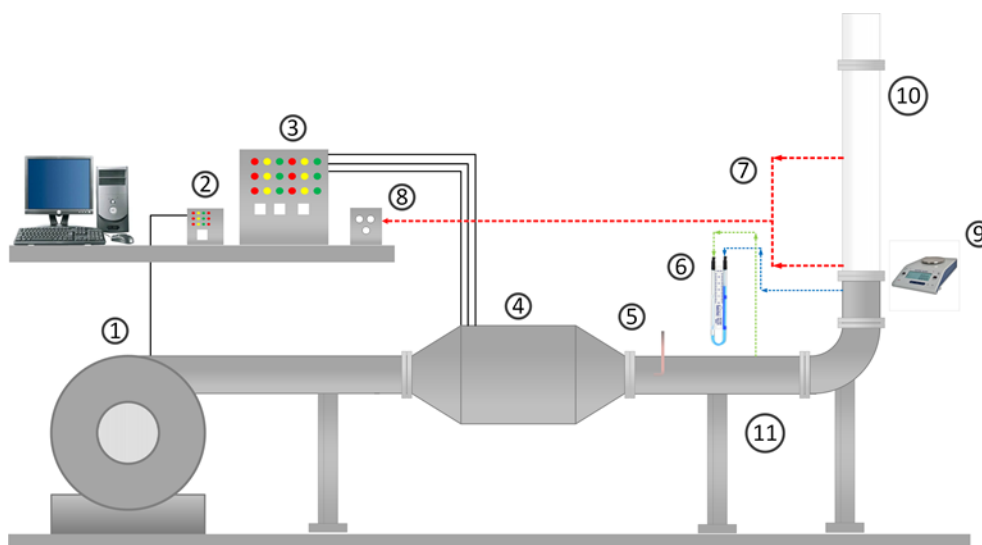
- 3.1 วัตถุประสงค์
- 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง
- 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3.5 วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น
- 3.6 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 วัตถุประสงค์

หัวบุกไข่หรือบุกเนื้อทราย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 ตู้อบแห้งลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด
- 3.2.2 ตู้อบไฟฟ้า ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNE 500 ความละเอียด 10C
- 3.2.3 เครื่องหั่นอาหาร (electric food slicer) ยี่ห้อ SAVIOLI รุ่น 300s
- 3.2.4 เครื่องชั่งดิจิตอลชนิดละเอียด 0.001กรัม ยี่ห้อ OHAUS รุ่น Explorer
- 3.2.5 เครื่องมือวัดค่าสี hunter lab รุ่น color flex EZ
- 3.2.6 เครื่องมือวัดอุณหภูมิด้วยแสง
- 3.2.7 สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (Thermocouple type K)
- 3.2.8 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดขดลวดร้อน (Hot-wire anemometer)
- 3.2.9 เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ
- 3.2.10 เครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้า (กระแส, ความต่างศักย์, กำลังและพลังงานไฟฟ้า)
- 3.2.11 เวอร์เนียคาลิเปอร์ ความละเอียด 0.05 mm



ภาพประกอบ 3.1 เครื่องอบแห้งหั่วบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน [0.2]

ส่วนประกอบของเครื่องอบแห้งหั่วบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน มีดังนี้

- 1) พัดลม (Electrical Centrifugal Fan) ขนาด 0.5 HP.
- 2) ตัวปรับความถี่เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Inverter)
- 3) ตัวควบคุมอุณหภูมิของอากาศร้อน (PID Temperature Controller)
- 4) ฮีตเตอร์ (Heaters) ขนาด 9 kW
- 5) ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ทำด้วยท่ออะคริลิกใส ขนาด ศก. 100 มม.
- 6) เครื่องชั่ง (Electronic Balance) ชนิดละเอียด ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 7) เครื่องคอมพิวเตอร์ (Personal Computer)
- 8) Data logger

3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยแบ่งขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย เป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

3.3.1 การหาความชื้นเริ่มต้นของบุก โดยการนำหั่วบุกใส่กระป๋องอะลูมิเนียม น้ำหนักประมาณกระป๋องละ 15-20 กรัม ชั่งน้ำหนักรวมภาชนะด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล (OHAUS รุ่น Exploer) ความละเอียด 0.001 กรัม บันทึกค่า นำเข้าตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักรวมภาชนะ บันทึกค่า และ ชั่งน้ำหนักภาชนะเปล่า คำนวณความชื้นของหั่วบุก โดยใช้สมการ

$$M_w = \frac{w-d}{w} \quad (3.1)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (ร้อยละมาตรฐานแห้ง)

w คือ มวลของวัสดุ (กิโลกรัม)

d คือ มวลวัสดุแห้ง (กิโลกรัม)

3.3.2 การดำเนินการอบแห้งหีบึกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

การวิเคราะห์การอบแห้งหีบึกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน ทำการบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ด้านอัตราการไหลเชิงมวลของตัวกลางอบแห้ง อุณหภูมิตัวกลางอบแห้ง และน้ำหนักผลิตภัณฑ์ก่อนและหลัง โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

3.3.2.1 เตรียมวัสดุอบแห้ง คือ บุกไข่ทรงลูกบาศก์ ขนาด 6 มม. 10 มม. และ 15 มม.

3.3.2.2 เตรียมความพร้อมของเครื่องอบแห้งตามเงื่อนไขที่กำหนด พร้อมตรวจสอบจุดวัดอุณหภูมิและความดัน โดยครั้งแรกใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

3.3.2.3 ซั่งภาชนะเปล่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งคงที่แล้ว

1) นำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมไว้เข้าห้องอบแห้ง
2) บันทึกผลอุณหภูมิทุก ๆ 5 นาที และหลังอบแห้งจนถึงเวลา 120 นาทีจะบันทึกทุก ๆ 10 นาที

3) ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง

4) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ ก. ถึง ข้อ ฉ. แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการอบแห้งเป็น 60 และ 70 องศาเซลเซียส และเพิ่มความสูงของเบด

5) นำข้อมูลที่ได้ศึกษาจลนศาสตร์การอบแห้งของบุกโดยใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิดไดซ์เซชันที่ความสูงต่างกัน

3.4 จลนศาสตร์ของการอบแห้งบุก ประกอบด้วย

3.4.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของบุกเทียบกับเวลาโดยการนำเสนอกราฟ

3.4.2 อัตราส่วนความชื้นของบุก (Moisture Ratio) โดยการคำนวณจากสูตร

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (3.2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น
 M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

นำเสนอผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา

3.4.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) คำนวณจากสูตร

$$DR = \frac{(M_{t+dt} - M_t)}{dt} \quad (3.3)$$

เมื่อ M_t คือ ความชื้นที่เวลาใด ๆ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{t+dt} คือ ความชื้นที่เวลา $t+dt$, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

3.4.4 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของหัวบุก พิจารณาจากสมการ Fick's Second Law of Diffusion [49] ในกรณีที่ทรงลูกบาศก์สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

สามารถเขียนอยู่ในรูปอัตราส่วนความชื้น ได้ดังนี้

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8^3}{\pi^6} \exp \left[-\frac{3\pi^2 D_{eff} t}{l^2} \right] \quad (3.5)$$

จากสมการ (3.4) สามารถจัดอยู่ในรูป ล็อกคาร์ที่มิธรรมชาติได้ตั้งสมการที่ (3.6)

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8^3}{\pi^6} \right) - \left(\frac{3\pi^2 D_{eff} t}{l^2} \right) \quad (3.6)$$

จากสมการที่ (3.6) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปของสมการเส้นตรงได้ดังต่อไปนี้

$$\ln MR = A - Bt \quad (3.7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลโดยทั่วไปสามารถหาได้จากการสร้างกราฟจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปของลอการิทึมของตัวแปรไร้หน่วยของอัตราส่วนความชื้น ($\ln(MR)$) เปรียบเทียบกับเวลา (t) จะได้ความชันของเส้นกราฟ โดยที่ค่า B จากสมการที่ (3.6) คือค่าความชันของรูปแบบทั่วไปของสมการเส้นตรง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผล ดังต่อไปนี้

$$\text{slope} = \left(\frac{3\pi^2 D_{\text{eff}} t}{l^2} \right) \quad (3.8)$$

ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเคลื่อนที่ของสสาร (E_a) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้จากรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของ Arrhenius [50] ดังนี้

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.9)$$

เมื่อ D_0 คือ ค่าคงที่ของ Arrhenius (m^2/s)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($\text{kJ}/\text{mol K}$)

T คือ อุณหภูมิของอากาศอบแห้ง (K)

การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งแบบชั้นบางของหัวบุกโดยใช้สมการต่าง ๆ ดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนความชื้น

ชื่อสมการ	รูปแบบ	อ้างอิง
1.Newton	$MR = \exp(-kt)$	[51-56]
2.Page	$MR = \exp(-kt^n)$	[53-56]
3.Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	[54]
4.Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[51, 54-56]
5.Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[51, 54, 55]

3.4.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลประกอบไปด้วยสถิติพื้นฐานได้แก่ ค่าเฉลี่ย (\bar{x}) และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ส่วนสถิติที่ใช้วิเคราะห์ความสามารถในการทำนายผลการทดลองของ แบบจำลองต่างๆ ได้รวบรวมจากบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติของนักวิจัยหลายท่าน (Arash Tahmasebia and Jianglong Yu. [57]; Doymaz [58]; Chayjan and other [59]) โดย สถิติที่ใช้ได้แก่ R^2 , RMSE, χ^2 และ SSE ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.72 - 2.75

3.5 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง

เลือกสภาวะสุดท้ายของการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไซซ์เซชัน มาศึกษาลักษณะทาง กายภาพที่เปลี่ยนไปของอบแห้ง ดังนี้

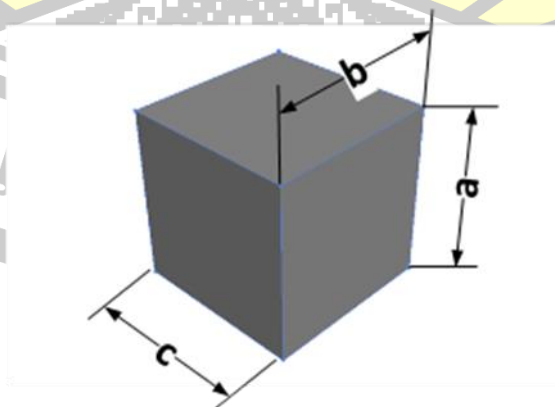
3.5.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีหลังการอบแห้ง โดยการวัดค่าสีตาม Hunter parameters ซึ่งประกอบไปด้วยค่า L (darkness/whiteness) ค่า a (greenness/redness) และค่า b (blueness/yellowness) จำนวน 3 ชั้น คำนวณหาค่าเฉลี่ย แล้วคำนวณหาค่า การเปลี่ยนแปลงสี สุธิ หรือ total color difference จากสมการ

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad (3.10)$$

โดยที่

$$\Delta L = L - L_0; \Delta a = a - a_0; \Delta b = b - b_0 \quad (3.11)$$

3.5.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของทรงลูกบาศก์หลังการอบแห้ง โดยการวัดขนาด ทั้งสามด้านของตามสมการ [60]



ภาพประกอบ 3.2 หัวบุกรูปทรงลูกบาศก์

$$\% a - \text{axis shrinkage} = \left(\frac{a_0 - a}{a_0} \right) \times 100 \quad (3.12)$$

$$\% b - \text{axis shrinkage} = \left(\frac{b_0 - b}{b_0} \right) \times 100 \quad (3.13)$$

$$\% c - \text{axis shrinkage} = \left(\frac{c_0 - c}{c_0} \right) \times 100 \quad (3.14)$$

3.6 การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งหัวบุกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

3.6.1 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANNs)

โดยข้อมูลที่นำเข้า (Input) ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความหนาของผลิตภัณฑ์ และความสูงของเบด ข้อมูลออก (Output) ได้แก่ อัตราการอบแห้ง (Drying Rate) และ อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) โดยการแบ่งข้อมูลจำนวน 549 ข้อมูล ออกเป็น 3 ส่วน คือ 70% 15% 15% เพื่อการฝึกฝน (Training) โครงข่ายประสาทเทียม ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) และทดสอบแบบจำลอง (Testing) ของโครงข่ายประสาทเทียม

เปรียบเทียบหน่วยซ่อน (Hidden Neuron) 5 ระดับ คือ 2, 4, 6, 8 และ 10 นิวรอน และจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) 2 ระดับ คือ 1 และ 2 ชั้น เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำงานของคุณลักษณะต่าง ๆ ของหัวบุกอบแห้ง

3.6.2 ส่วนประกอบโครงข่ายประสาทเทียม

3.6.2.1 ฟังก์ชันการฝึกฝน (Training Function) แบบ TRAINL (LevenbergMarquardt backpropagation)

3.6.2.2 Adaptation learning function แบบ LEARNGDM (Gradient decent w/momentum weight/bias learning function)

3.6.2.3 ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) ดังต่อไปนี้

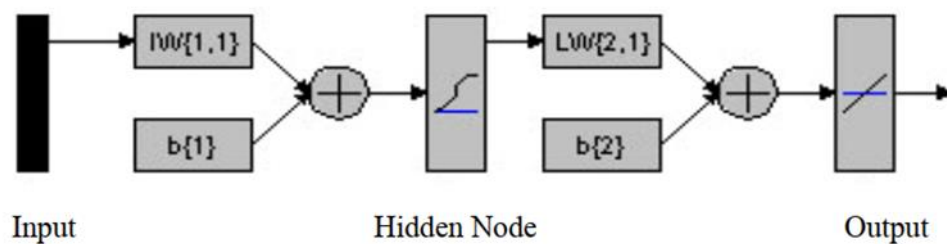
1) กรณีที่มีชั้นซ่อน (Hidden Layer) 1 ชั้น ชั้นที่ 1 ใช้แบบ LOGSIG (Log-sigmoid Transfer Function) และชั้นที่ 2 เป็นแบบ TANSIG (Hyperbolic Tangent Sigmoid)

2) กรณีที่มีชั้นซ่อน (Hidden Layer) 2 ชั้น ชั้นที่ 1 ใช้แบบ LOGSIG (Log-sigmoid Transfer Function) ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 เป็นแบบ TANSIG (Hyperbolic Tangent Sigmoid)

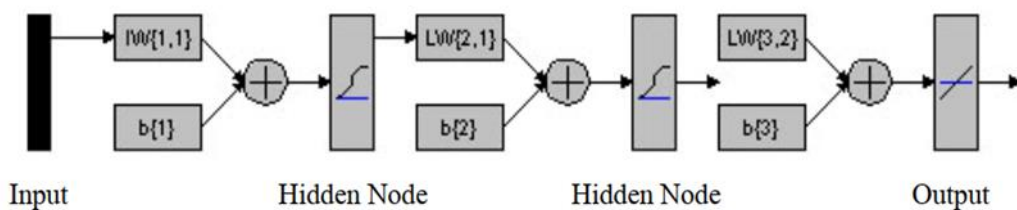
3) Performanc Function เป็นความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean squared Error MSE)

- 4) จำนวนรอบของการฝึกฝน (Epochs) ที่มากที่สุดในการฝึกฝนเท่ากับ 1000 รอบ
- 5) กำหนด Stopping rule คือ เมื่อถึงจำนวนรอบสูงสุดในการฝึกฝน (Maximum number of epochs to train) คือ 1000 รอบ, เมื่อค่า Performance ลดลงถึง Goal ที่กำหนด คือ 0 และเมื่อค่า Performance ของชั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) ไม่สามารถที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นหรือ มีค่าคงที่ที่ค่า Maximum validation failures (max fail) กำหนดไว้ คือ 6 รอบ

3.6.2.4 ข้อมูลออก (Output) ที่ทำการศึกษา คุณลักษณะของหัวบุกจากกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยโครงสร้างชั้นซ่อน 2 ระดับคือ 1 ชั้น 2 ชั้นแสดงดังภาพประกอบ 3.3 และ 3.4



ภาพประกอบ 3.3 โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 1 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะหัวบุกจากการอบแห้ง



ภาพประกอบ 3.4 โครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) 2 ชั้น สำหรับการทำนายคุณลักษณะหัวบุกจากการอบแห้ง [0.5]

ทำการเลือกจำนวนหน่วยซ่อน (Hidden Neuron) และจำนวนชั้นซ่อน (Hidden Layer) ที่ทำให้แบบจำลองมีค่า MSE, RMSE และ SSE ต่ำที่สุด และ R^2 สูงสุดในการประเมิน

ประสิทธิภาพของแบบจำลองนั้นโดยสร้างแบบจำลองโดยข่ายประสาทเทียมทำนายครั้งละ 1 คุณลักษณะ ด้วยโปรแกรม MATLAB Version 2013 ทั้งหมด 2 แบบจำลองคือ

1) แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้อัตรากรอบแห้ง (Drying Rate) เป็นข้อมูลออก (Output)

2) แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบที่ใช้อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) เป็นข้อมูลออก (Output)

จำนวนโครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมทั้งหมด 30 โครงสร้าง แสดงรายละเอียดดังตาราง 3.2 โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะนำมาทำการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้องด้วยชุดข้อมูลที่ทำการสุ่มมาแตกต่างกัน 3 ชุด (Cross-validation ทำการฝึกฝนและตรวจสอบความถูกต้องด้วยน้ำหนักเริ่มต้น (Initial weight) ที่แตกต่างกัน 3 แบบ จากการใช้ค่าน้ำหนักเริ่มต้นที่แตกต่างกัน เลือกโครงสร้างแบบจำลองที่ให้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) น้อยที่สุด และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูง (R^2) เพื่อเป็นตัวแทนสำหรับ cross-validation จากนั้นหาค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) จากทั้ง 3 cross validation เพื่อทำการเปรียบเทียบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการแปลงค่า (Normalize)

ตาราง 3.2 แบบจำลองโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

Architecture No.	ANNs Architecture	Neuron in	
		hidden layer 1	hidden layer 2
1	LOG/PURELIN	2	0
2	LOG/PURELIN	4	0
3	LOG/PURELIN	6	0
4	LOG/PURELIN	8	0
5	LOG/PURELIN	10	0
6	LOG/LOG/PURELIN	2	2
7	LOG/LOG/PURELIN	2	4
8	LOG/LOG/PURELIN	2	6

ตาราง 3.2 แบบจำลองโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม (ต่อ)

Architecture No.	ANNs Architecture	Neuron in	
		hidden layer 1	hidden layer 2
9	LOG/LOG/PURELIN	2	8
10	LOG/LOG/PURELIN	2	10
11	LOG/LOG/PURELIN	4	2
12	LOG/LOG/PURELIN	4	4
13	LOG/LOG/PURELIN	4	6
14	LOG/LOG/PURELIN	4	8
15	LOG/LOG/PURELIN	4	10
16	LOG/LOG/PURELIN	6	2
17	LOG/LOG/PURELIN	6	4
18	LOG/LOG/PURELIN	6	6
19	LOG/LOG/PURELIN	6	8
20	LOG/LOG/PURELIN	6	10
21	LOG/LOG/PURELIN	8	2
22	LOG/LOG/PURELIN	8	4
23	LOG/LOG/PURELIN	8	6
24	LOG/LOG/PURELIN	8	8
25	LOG/LOG/PURELIN	8	10
26	LOG/LOG/PURELIN	10	2
27	LOG/LOG/PURELIN	10	4
28	LOG/LOG/PURELIN	10	6
29	LOG/LOG/PURELIN	10	8
30	LOG/LOG/PURELIN	10	10

บทที่ 4

ผลการวิจัย และการอภิปราย

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองผู้วิจัยได้กำหนดหัวข้อตามลำดับ ดังนี้

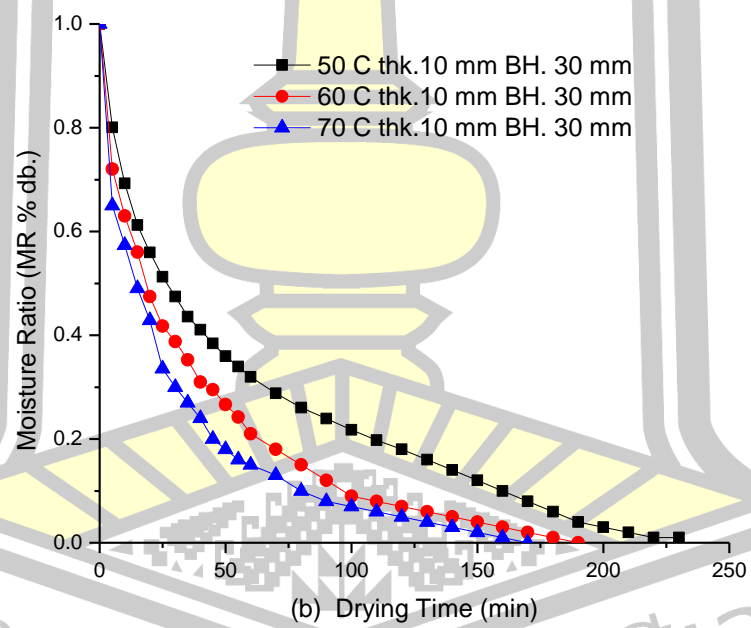
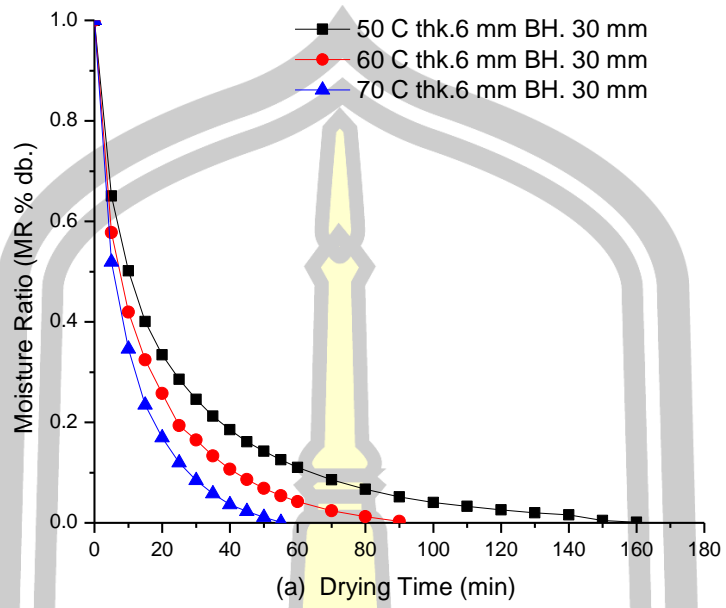
- 4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุก
- 4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล
- 4.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ
- 4.4 การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

4.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุก

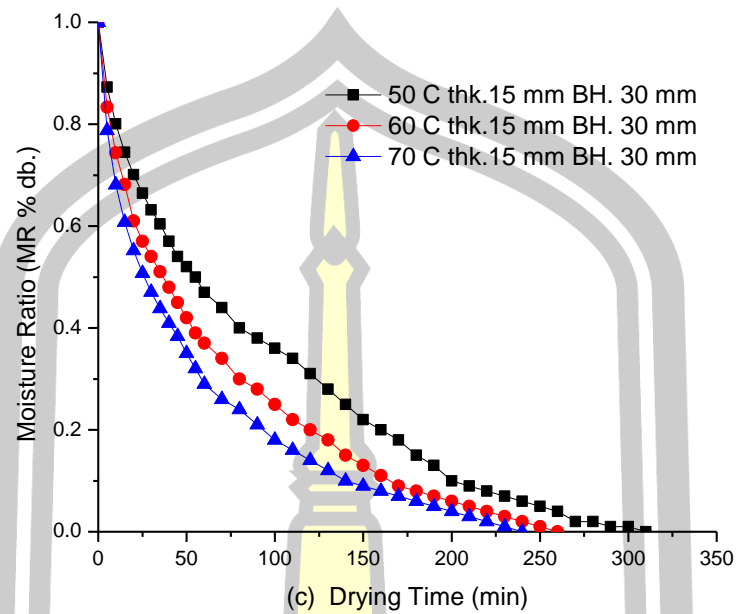
จากการทดลองอบแห้งบุกสดทรงลูกเต๋าทะหนัก 6 mm 10 mm และ 15 mm ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 265.49 %db โดยใช้อากาศร้อนที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 °C ที่ความเร็วอากาศร้อน 2.5 m/s ได้จลนพลศาสตร์การอบแห้งดังแสดงในภาพประกอบ 4.1-4.2

4.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งหัวบุก

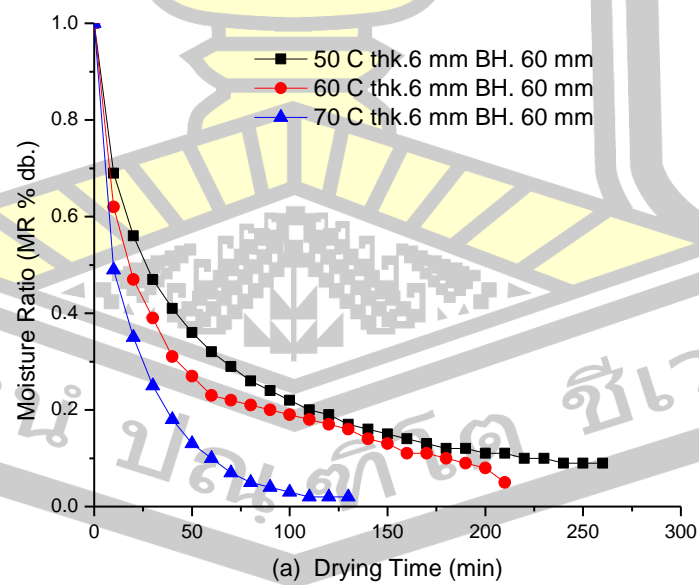
เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 4.1-4.2 พบว่า ในช่วงต้นของการอบแห้งความชื้นในผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นความชื้นจะค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ จนมีค่าคงที่เมื่อถึงช่วงเวลาหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรกผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นอยู่มาก จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มายังอากาศภายนอกจึงมากตามไปด้วย เมื่อช่วงเวลาของการอบแห้งผ่านไปอีกอัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์จะช้าลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ของน้ำภายในผลิตภัณฑ์มายังผิวเกิดช้ากว่าการพาความร้อนจากผิวไปยังอากาศ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบแห้งที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งหัวบุกสด พบว่า ที่ความหนาของผลิตภัณฑ์เดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นในหัวบุกได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีผลต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งกับผลิตภัณฑ์มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากตัวกลางไปยังผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าจึงสามารถระเหยน้ำได้ดีกว่า ส่งผลให้การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงใช้ระยะเวลาสั้นกว่าที่อุณหภูมิต่ำอย่างเห็นได้ชัดเจน

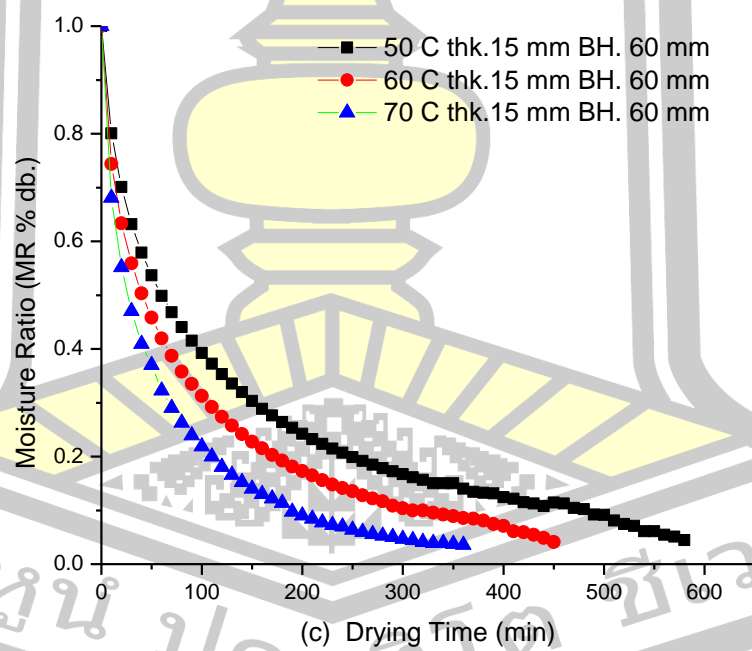
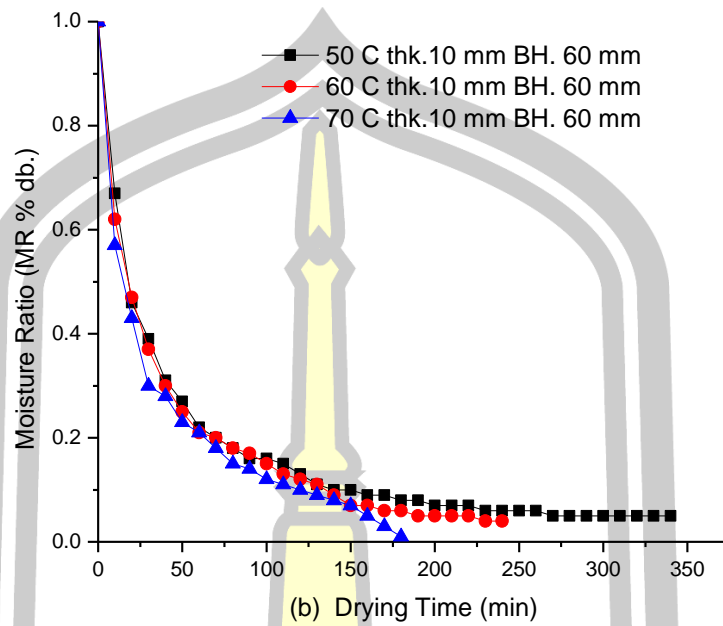


พหุบัณฑิต ชีวะ



ภาพประกอบ 4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบูกที่ความสูงเบต 30 มม. (a) ความหนาบูก 6 มม. (b) ความหนาบูก 10 มม. (c) ความหนาบูก 15 มม.

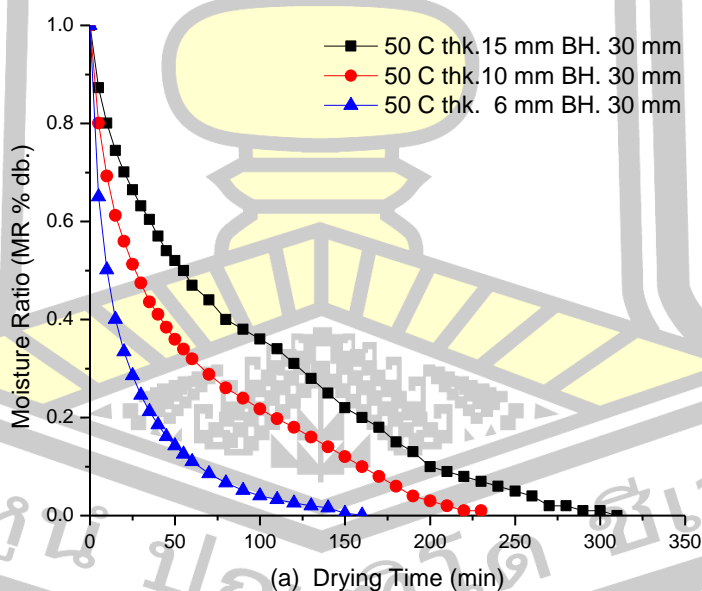


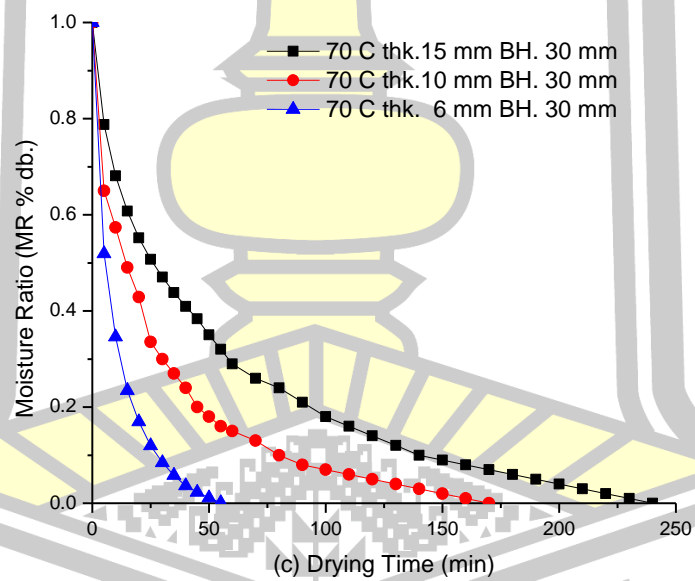
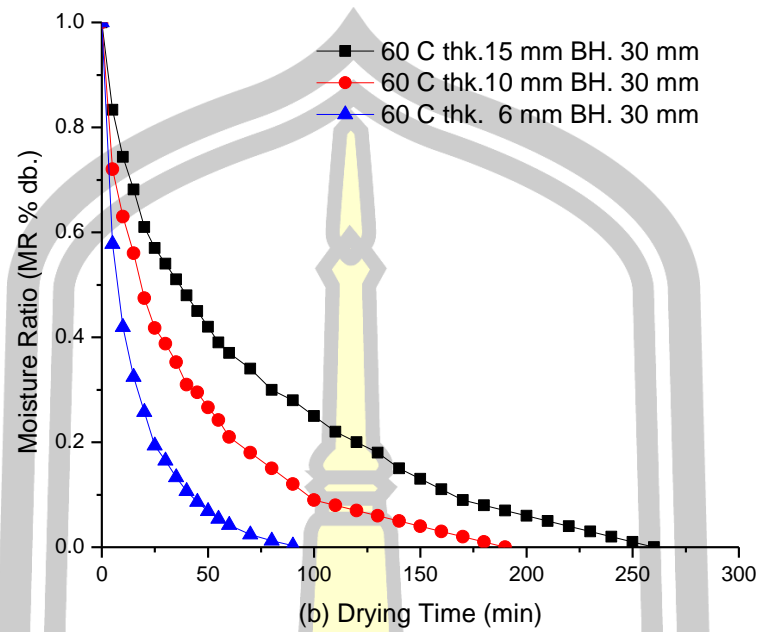


ภาพประกอบ 4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบุกที่ ความสูงเบต 60 มม. (a) ความหนาบุก 6 มม. (b) ความหนาบุก 10 มม. (c) ความหนาบุก 15 มม.

4.1.2 อิทธิพลของความหนาของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งหัวบุกสด

ความหนาของผลิตภัณฑ์นับได้ว่าเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เมื่อสังเกตจากภาพประกอบ 4.3 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่บาง (6 mm) ความชื้นจะลดลงได้เร็วกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนา (10 และ 15 mm) อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่บางนั้น น้ำภายในวัสดุจะมีระยะทางการเคลื่อนที่จากภายในสู่ที่ผิวสั้นกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนา นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปยังผลิตภัณฑ์ที่บางยังง่ายกว่าในกรณีผลิตภัณฑ์ที่หนาด้วย สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าผลิตภัณฑ์ที่บางมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนามากนั่นเอง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ความชื้นในหัวบุกที่มีความหนา 6 mm ลดลงเร็วกว่าความชื้นในหัวบุกที่มีความหนา 10 และ 15 mm เช่น จากภาพประกอบ 4.3 a. ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C และระยะเวลาการอบแห้ง 10 นาที พบว่า อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์หนา 15 mm มีค่าประมาณ 0.80 % db อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์หนา 10 mm มีค่าประมาณ 0.61 % db ในขณะที่อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์หนา 6 mm มีค่าประมาณ 0.40 % db อย่างไรก็ตามพบว่า ที่เวลาในการอบแห้ง 150-300 นาที อัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่มีความหนาต่างกันจะเข้าสู่ความชื้นสมดุลตามลำดับ

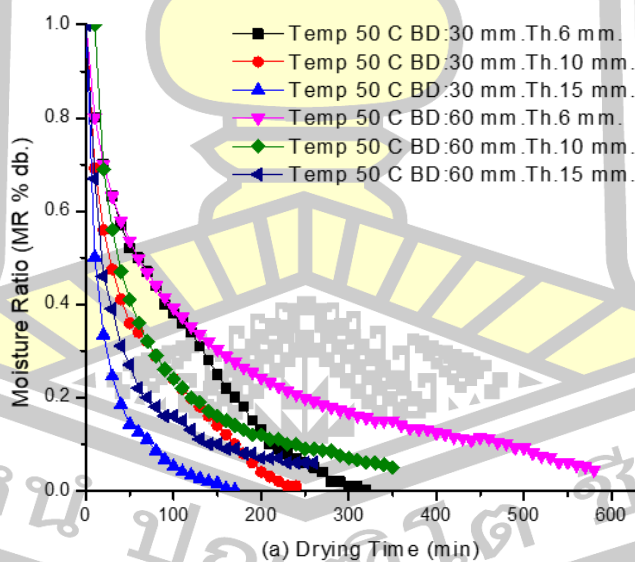


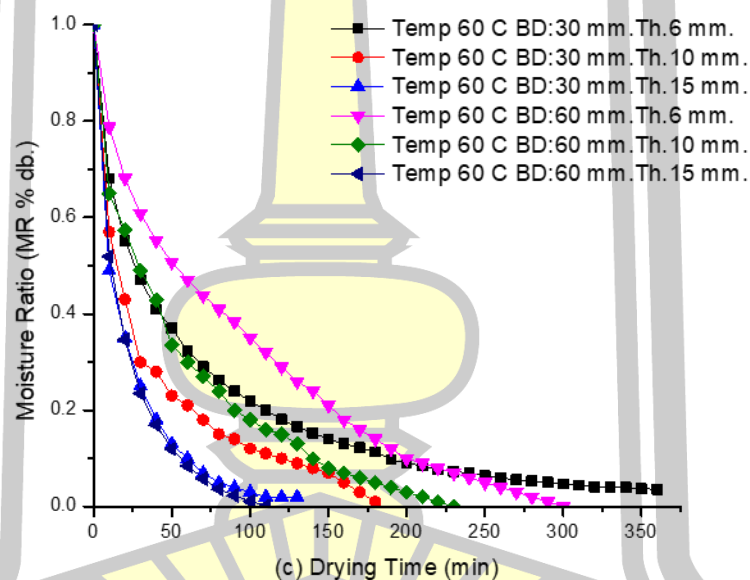
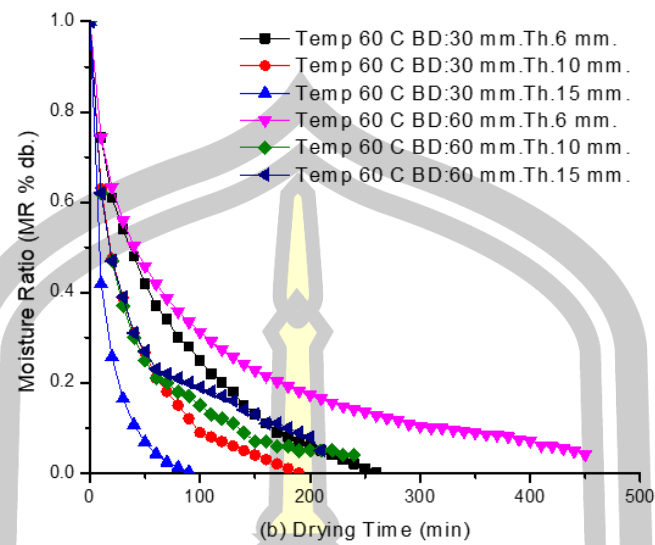


ภาพประกอบ 4.3 อิทธิพลของความหนาของผลิตภัณฑ์ที่มีต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งบุงกสตุ๋นหมูมิ (a) 50 °C (b) 60 °C และ (c) 70 °C

4.1.3 อิทธิพลของความสูงของเบตของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

ความสูงของเบตของกระบวนการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันของผลิตภัณฑ์นับได้ว่าเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เมื่อสังเกตจากภาพประกอบ 4.3 พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกันผลิตภัณฑ์ที่ความสูงของเบตสั้นกว่า (30 มม.) ความชื้นจะลดลงได้เร็วกว่าผลิตภัณฑ์ที่ความสูงของเบตยาวกว่า (60 มม.) อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ความสูงของเบตสั้นกว่า (30 มม.) นั้น ความดันตกคร่อมเบตมีค่าน้อยทำให้ตัวกลางในการอบแห้งสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ได้ดีสามารถถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้สูงจึงทำให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ความสูงเบตมากกว่า น้ำภายในวัสดุจะมีระยะทางการเคลื่อนที่จากภายในสู่ที่ผิวสั้นกว่าผลิตภัณฑ์ที่หนากว่า เช่น จากภาพประกอบ 4.3 a. ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 °C และระยะเวลาการอบแห้ง 10 นาที พบว่า อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์หนา 15 mm มีค่าประมาณ 0.80 %db อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์หนา 10 mm มีค่าประมาณ 0.61 %db ในขณะที่อัตราส่วนความชื้นของผลิตภัณฑ์หนา 6 mm มีค่าประมาณ 0.40 %db อย่างไรก็ตามพบว่าที่เวลาในการอบแห้ง 150-300 นาที อัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่มีความหนาต่างกันจะเข้าสู่ความชื้นสมดุลตามลำดับ





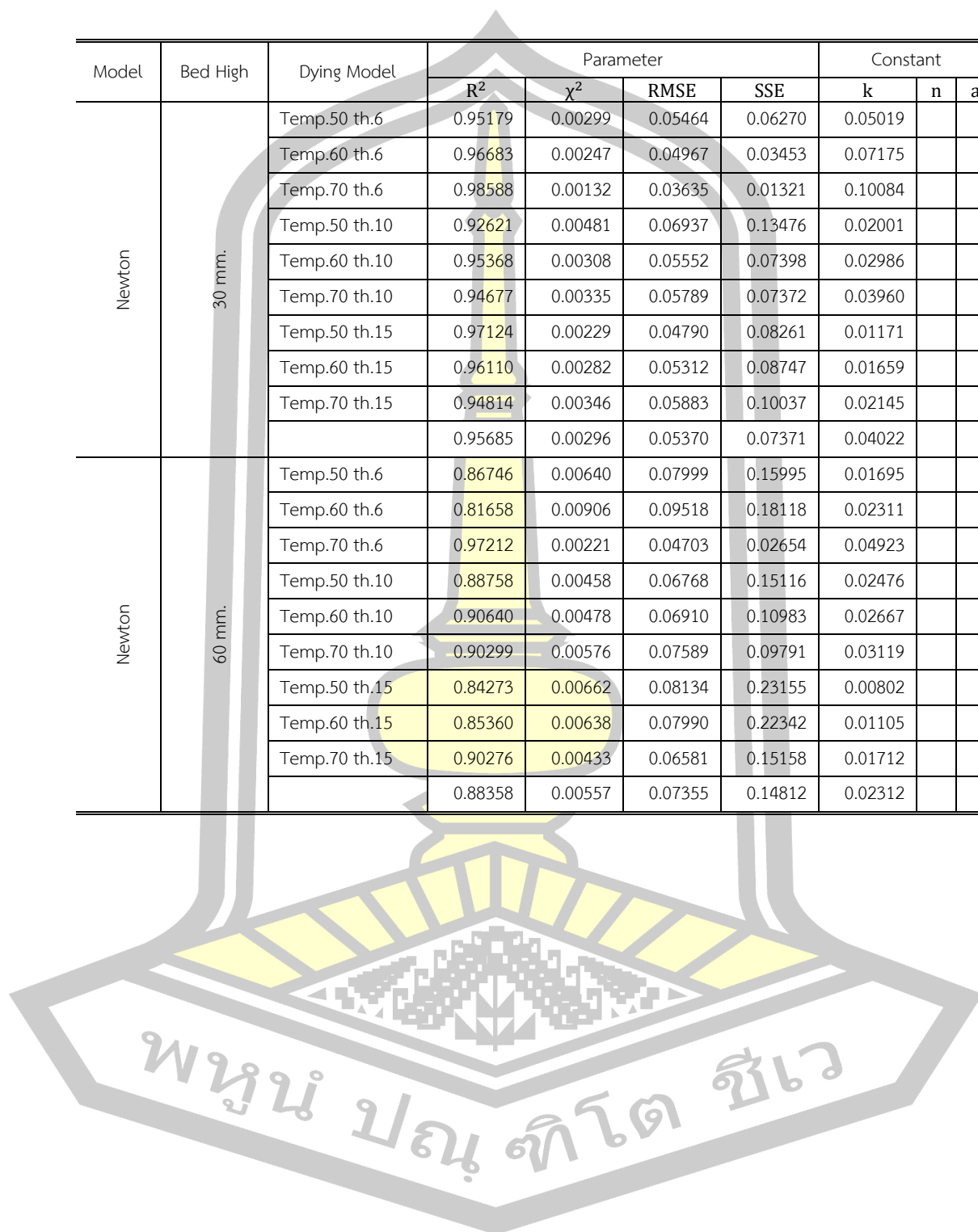
ภาพประกอบ 4.4 อิทธิพลของความสูงของเบตของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งหัวบุกสด

4.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันนั้น ผู้วิจัยได้นำสมการการอบแห้งแบบชั้นบางของ Newton, Page, Modified Page, Henderson and Pabis, และ Logarithmic มาใช้ในการทำนายอัตราส่วนความชื้น โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์แบบ Nonlinear regression ผลการวิเคราะห์แสดงในตาราง 4.1-4.5

ตาราง 4.1 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Newton

Model	Bed High	Dying Model	Parameter				Constant		
			R^2	χ^2	RMSE	SSE	k	n	a
Newton	30 mm.	Temp.50 th.6	0.95179	0.00299	0.05464	0.06270	0.05019		
		Temp.60 th.6	0.96683	0.00247	0.04967	0.03453	0.07175		
		Temp.70 th.6	0.98588	0.00132	0.03635	0.01321	0.10084		
		Temp.50 th.10	0.92621	0.00481	0.06937	0.13476	0.02001		
		Temp.60 th.10	0.95368	0.00308	0.05552	0.07398	0.02986		
		Temp.70 th.10	0.94677	0.00335	0.05789	0.07372	0.03960		
		Temp.50 th.15	0.97124	0.00229	0.04790	0.08261	0.01171		
		Temp.60 th.15	0.96110	0.00282	0.05312	0.08747	0.01659		
		Temp.70 th.15	0.94814	0.00346	0.05883	0.10037	0.02145		
				0.95685	0.00296	0.05370	0.07371	0.04022	
Newton	60 mm.	Temp.50 th.6	0.86746	0.00640	0.07999	0.15995	0.01695		
		Temp.60 th.6	0.81658	0.00906	0.09518	0.18118	0.02311		
		Temp.70 th.6	0.97212	0.00221	0.04703	0.02654	0.04923		
		Temp.50 th.10	0.88758	0.00458	0.06768	0.15116	0.02476		
		Temp.60 th.10	0.90640	0.00478	0.06910	0.10983	0.02667		
		Temp.70 th.10	0.90299	0.00576	0.07589	0.09791	0.03119		
		Temp.50 th.15	0.84273	0.00662	0.08134	0.23155	0.00802		
		Temp.60 th.15	0.85360	0.00638	0.07990	0.22342	0.01105		
		Temp.70 th.15	0.90276	0.00433	0.06581	0.15158	0.01712		
				0.88358	0.00557	0.07355	0.14812	0.02312	



ตาราง 4.2 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Page

Model	Bed High	Dying Model	Parameter				Constant		
			R ²	χ^2	RMSE	SSE	k	n	a
Page	30 mm.	Temp.50 th.6	0.99952	0.00003	0.00531	0.00059	0.149944	0.659894	
		Temp.60 th.6	0.99898	0.00001	0.00225	0.00007	0.172494	0.698476	
		Temp.70 th.6	0.99883	0.00010	0.00996	0.00099	0.183638	0.768426	
		Temp.50 th.10	0.98610	0.00111	0.03331	0.03994	0.025948	0.826144	
		Temp.60 th.10	0.99329	0.00049	0.02206	0.01509	0.046494	0.755071	
		Temp.70 th.10	0.99616	0.00026	0.01601	0.00743	0.06964	0.702654	
		Temp.50 th.15	0.98610	0.00111	0.03331	0.03994	0.025948	0.826144	
		Temp.60 th.15	0.99329	0.00049	0.02206	0.01509	0.046494	0.755071	
		Temp.70 th.15	0.99616	0.00026	0.01601	0.00743	0.06964	0.702654	
		0.99427	0.00043	0.01781	0.01406	0.08780	0.74383		
	60 mm.	Temp.50 th.6	0.99895	0.00005	0.00713	0.00127	0.104268	0.579095	
		Temp.60 th.6	0.99302	0.00034	0.01856	0.00689	0.161963	0.515248	
		Temp.70 th.6	0.99927	0.00006	0.00761	0.00070	0.139928	0.684799	
		Temp.50 th.10	0.99235	0.00031	0.01765	0.01028	0.143049	0.553755	
		Temp.60 th.10	0.99785	0.00011	0.01048	0.00252	0.132959	0.586343	
		Temp.70 th.10	0.99615	0.00023	0.01507	0.00386	0.152343	0.576153	
		Temp.50 th.15	0.99975	0.00001	0.00324	0.00037	0.06069	0.593766	
		Temp.60 th.15	0.99992	0.00000	0.00182	0.00012	0.078103	0.587603	
		Temp.70 th.15	0.99969	0.00001	0.00372	0.00048	0.094093	0.607653	
		0.99744	0.00013	0.00948	0.00294	0.1186	0.58715		



ตาราง 4.3 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Modified Page

Model	Bed High	Dying Model	Parameter				Constant		
			R ²	χ^2	RMSE	SSE	k	n	a
Modified Page	30 mm.	Temp.50 th.6	0.99952	2.82E-05	0.00531	0.000592	0.056391	0.659894	
		Temp.60 th.6	0.99898	7.09E-05	0.008423	0.000993	0.08078	0.69836	
		Temp.70 th.6	0.99883	9.92E-05	0.009962	0.000992	0.1102	0.76825	
		Temp.50 th.10	0.99145	0.000558	0.023614	0.015613	0.021099	0.678185	
		Temp.60 th.10	0.99656	0.000229	0.015128	0.005492	0.031942	0.702306	
		Temp.70 th.10	0.99662	0.000213	0.014582	0.004678	0.043707	0.667207	
		Temp.50 th.15	0.9861	0.001109	0.033307	0.039937	0.012033	0.826158	
		Temp.60 th.15	0.99329	0.000487	0.022064	0.015092	0.017184	0.755069	
		Temp.70 th.15	0.99616	0.000256	0.01601	0.007433	0.022552	0.702655	
			0.995279	0.000339	0.016489	0.010091	0.043988	0.717565	
Modi Page	30 mm.	Temp.50 th.6	0.99895	5.08E-05	0.007129	0.001271	0.020161	0.579094	
		Temp.60 th.6	0.99302	0.000345	0.018565	0.006893	0.029216	0.515247	
		Temp.70 th.6	0.99927	5.8E-05	0.007615	0.000696	0.056595	0.684799	
		Temp.50 th.10	0.99235	0.000312	0.017651	0.010281	0.029849	0.553754	
		Temp.60 th.10	0.99785	0.00011	0.010475	0.002524	0.032027	0.586343	
		Temp.70 th.10	0.99615	0.000227	0.015067	0.003859	0.038165	0.576153	
		Temp.50 th.15	0.99975	1.05E-05	0.003238	0.000367	0.008924	0.593759	
		Temp.60 th.15	0.99992	3.32E-06	0.001822	0.000116	0.013047	0.587601	
		Temp.70 th.15	0.99969	1.38E-05	0.003721	0.000485	0.020456	0.607652	
			0.997439	0.000125	0.009476	0.002943	0.027605	0.587156	



ตาราง 4.4 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Handerson and Pabis

Model	Bed High	Dying Model	Parameter				Constant		
			R ²	χ^2	RMSE	SSE	k	n	a
Handerson and Pabis	30 mm.	Temp.50 th.6	0.96561	0.002033	0.045087	0.04269	0.04317		0.88296
		Temp.60 th.6	0.97267	0.001896	0.043548	0.02655	0.06519		0.91966
		Temp.70 th.6	0.98652	0.001147	0.033867	0.01147	0.09665		0.96041
		Temp.50 th.10	0.96678	0.002167	0.046546	0.060664	0.015648		0.837437
		Temp.60 th.10	0.97734	0.001508	0.038831	0.036188	0.024894		0.865214
		Temp.70 th.10	0.96877	0.001966	0.044337	0.043248	0.033239		0.866339
		Temp.50 th.15	0.98726	0.001016	0.03188	0.036589	0.010249		0.899862
		Temp.60 th.15	0.98493	0.001093	0.033058	0.033878	0.013852		0.873275
		Temp.70 th.15	0.97805	0.001465	0.03827	0.042473	0.017292		0.852241
				0.976437	0.001588	0.039492	0.037083	0.035576	
	60 mm.	Temp.50 th.6	0.92453	0.003643	0.060359	0.09108	0.01295		0.808651
		Temp.60 th.6	0.87798	0.006027	0.077631	0.12053	0.016828		0.794366
		Temp.70 th.6	0.976	0.001904	0.043639	0.022852	0.046014		0.941708
		Temp.50 th.10	0.91208	0.003582	0.059848	0.118197	0.019504		0.841266
		Temp.60 th.10	0.93208	0.003465	0.058864	0.079693	0.021499		0.849087
		Temp.70 th.10	0.92674	0.004318	0.065715	0.073414	0.025547		0.858565
		Temp.50 th.15	0.94147	0.002462	0.04962	0.086176	0.006064		0.797667
		Temp.60 th.15	0.93803	0.002702	0.051979	0.094563	0.008184		0.783306
		Temp.70 th.15	0.94743	0.002345	0.048428	0.082085	0.013104		0.808021
				0.930704	0.003383	0.057342	0.085399	0.018855	

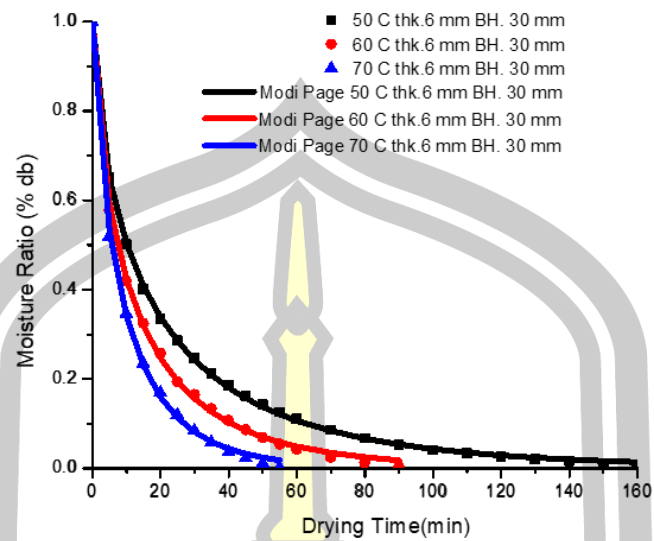


ตาราง 4.5 ค่าคงที่และผลการวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับแบบจำลองของ Logarithmic

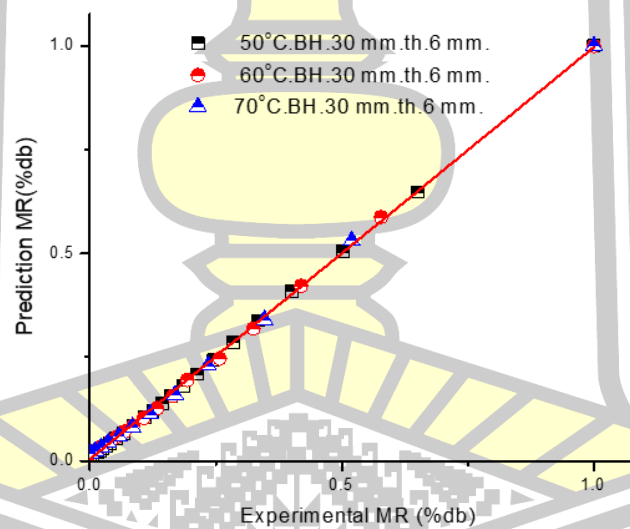
Model	Bed High	Dying Model	Parameter				Constant		
			R ²	χ^2	RMSE	SSE	k	a	c
Logarithmic	30 mm.	Temp.50 th.6	0.97516	0.001399	0.037397	0.02937	0.0519	0.87305	0.04155
		Temp.60 th.6	0.98037	0.001265	0.035567	0.01771	0.07853	0.90476	0.04323
		Temp.70 th.6	0.98898	0.000844	0.029052	0.00844	0.10768	0.94536	0.02797
		Temp.50 th.10	0.97131	0.001872	0.043261	0.052402	0.019	0.82088	0.047563
		Temp.60 th.10	0.9814	0.001238	0.035181	0.029705	0.028452	0.852985	0.034134
		Temp.70 th.10	0.97773	0.001402	0.037444	0.030846	0.039736	0.852929	0.04305
		Temp.50 th.15	0.98879	0.000894	0.029907	0.032198	0.009005	0.926205	-0.04304
		Temp.60 th.15	0.98545	0.001056	0.032489	0.032722	0.014769	0.86542	0.017627
		Temp.70 th.15	0.98193	0.001206	0.034721	0.034961	0.020133	0.839899	0.037485
			0.981236	0.001242	0.035002	0.029817	0.041023	0.875721	0.02773
	60 mm.	Temp.50 th.6	0.96799	0.001265	0.035565	0.031621	0.037436	0.817276	0.127816
		Temp.60 th.6	0.98126	0.001131	0.033628	0.022617	0.023657	0.806375	0.112881
		Temp.70 th.6	0.9858	0.001127	0.033566	0.01352	0.055004	0.923657	0.041395
		Temp.50 th.10	0.97881	0.000863	0.029384	0.028493	0.030844	0.863086	0.073127
		Temp.60 th.10	0.97501	0.001275	0.035706	0.029323	0.033239	0.856574	0.075761
		Temp.70 th.10	0.96839	0.001863	0.043167	0.031677	0.041104	0.85702	0.085521
		Temp.50 th.15	0.98335	0.000692	0.026302	0.024212	0.011789	0.742021	0.155717
		Temp.60 th.15	0.97701	0.001002	0.031657	0.035077	0.014206	0.769478	0.110033
		Temp.70 th.15	0.97303	0.001201	0.034661	0.042048	0.01854	0.814581	0.061405
			0.976739	0.001158	0.033737	0.028732	0.029536	0.827785	0.09374

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันพบว่า แบบจำลองของ Modified Page เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่า R² ที่มากที่สุด และให้ค่า RMSE ,SSE และ Chi-square (χ^2) ที่น้อยที่สุด แบบจำลองที่เหมาะสมเรียงตามลำดับ ถัดมาคือ Page, Logarithmic, Henderson and Pabis และ Newton

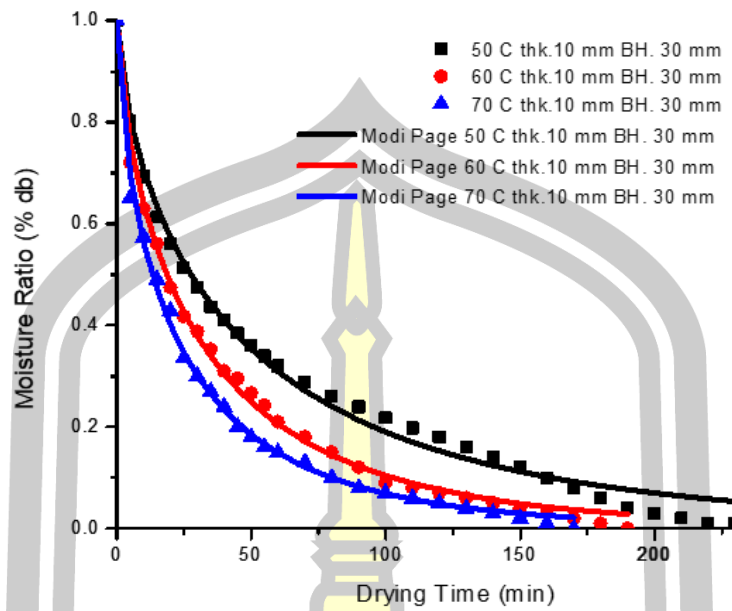
พหุ ประถมศึกษา



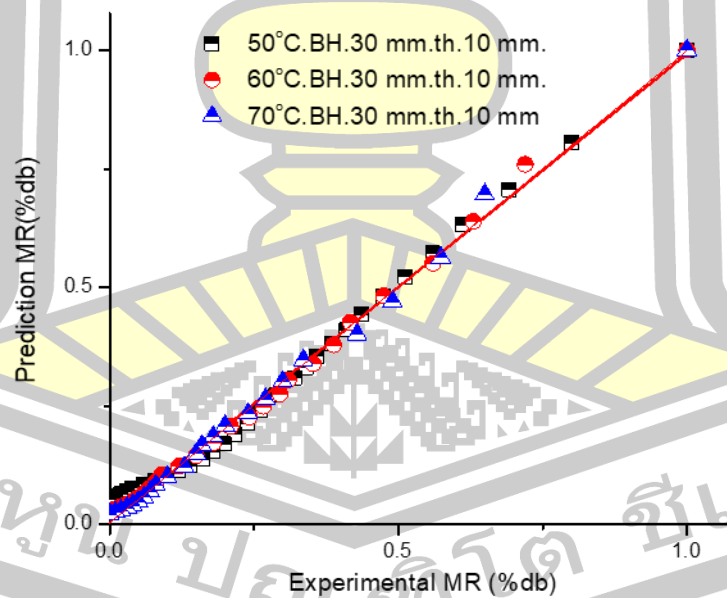
ภาพประกอบ 4.5 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 6 มม.



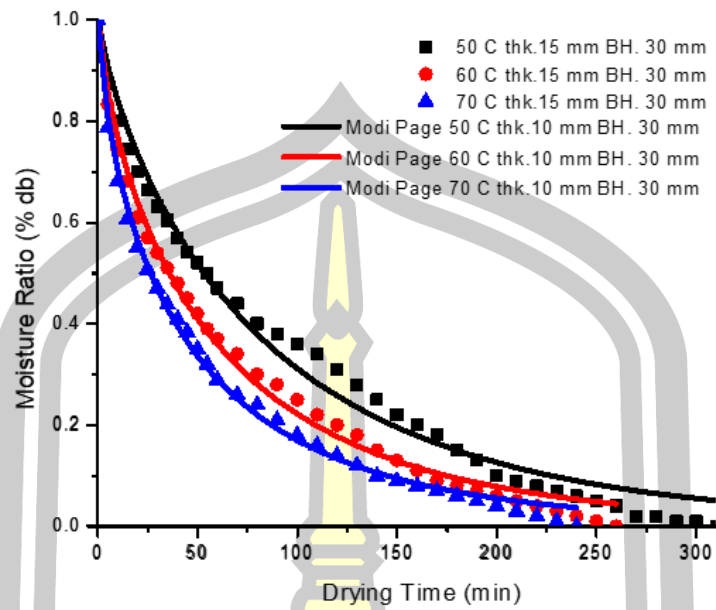
ภาพประกอบ 4.6 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลองที่ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 6 มม.



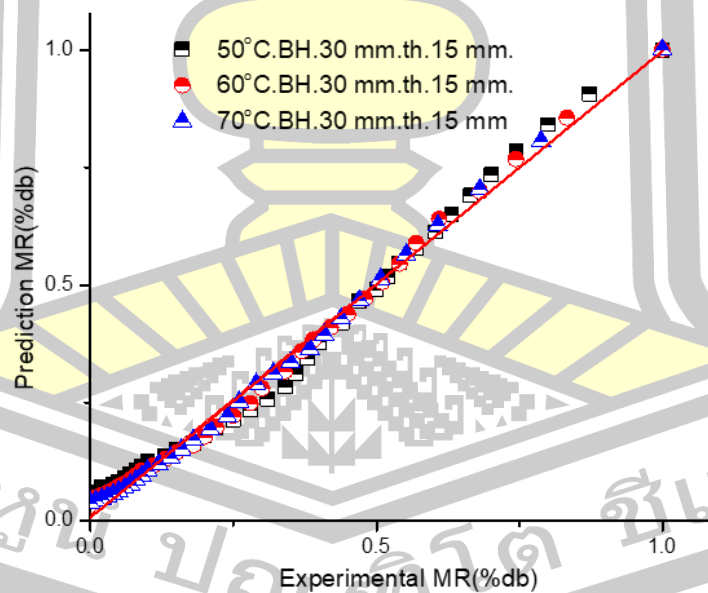
ภาพประกอบ 4.7 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 10 มม.



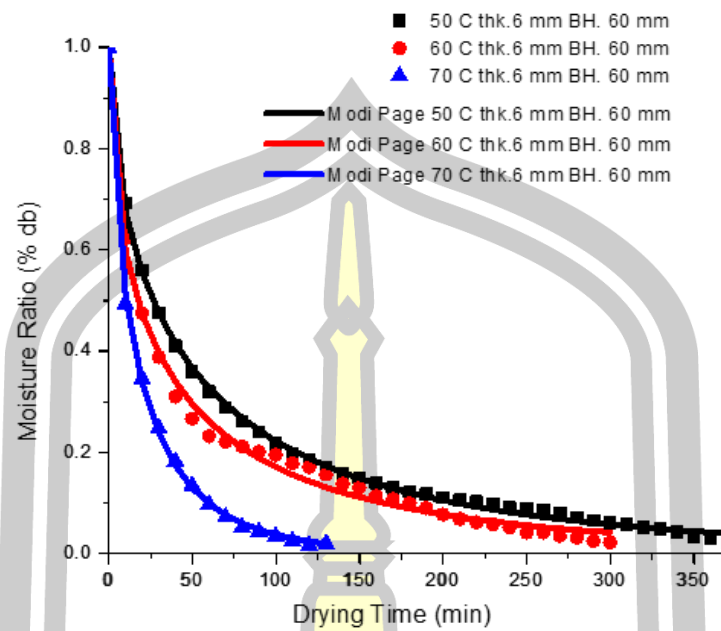
ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 10 มม.



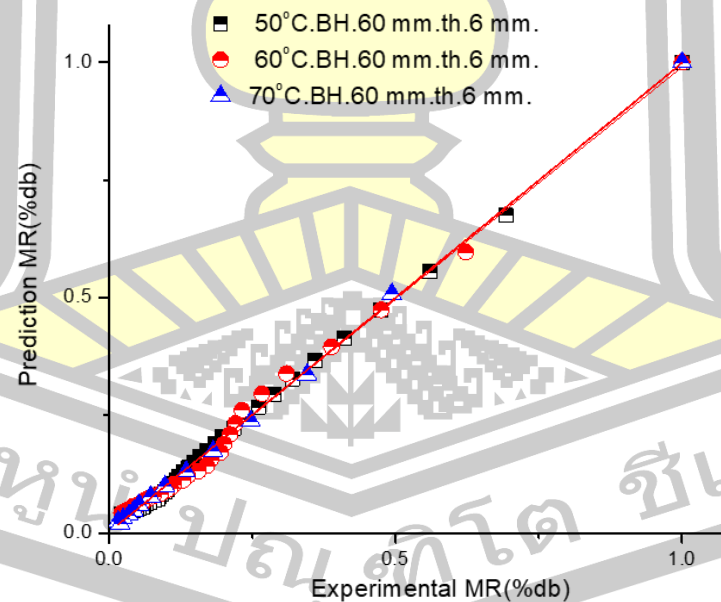
ภาพประกอบ 4.9 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 15 มม.



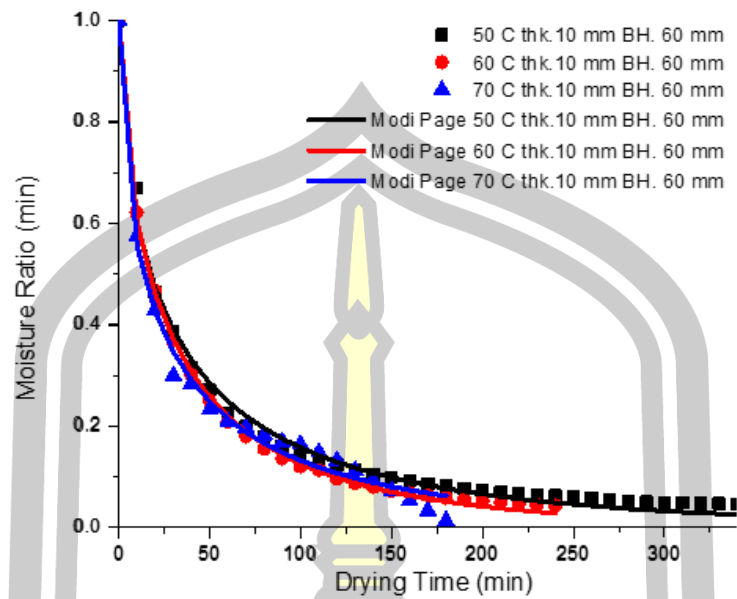
ภาพประกอบ 4.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 30 มม. ความหนาบุก 15 มม.



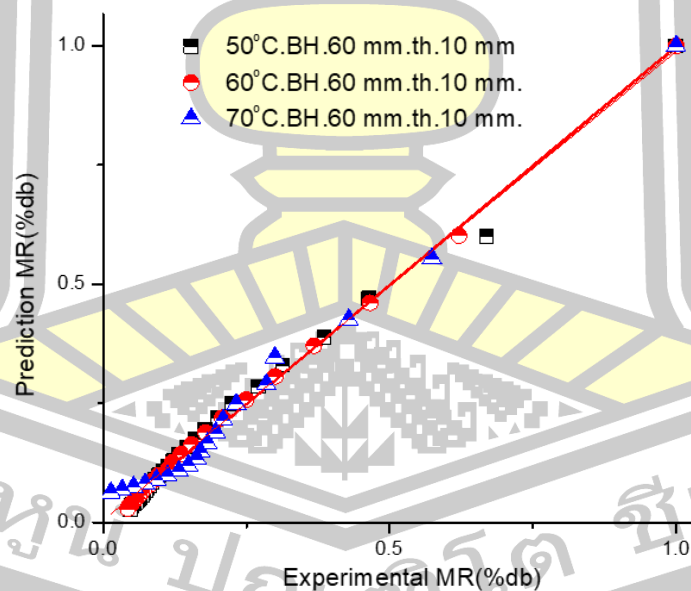
ภาพประกอบ 4.11 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบต 60 มม. ความหนาบุก 6 มม.



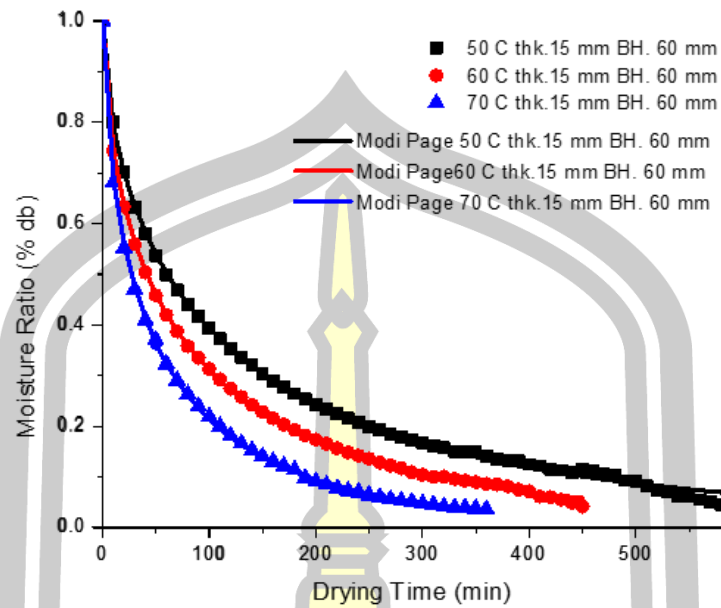
ภาพประกอบ 4.12 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบต 60 มม. ความหนาบุก 6 มม.



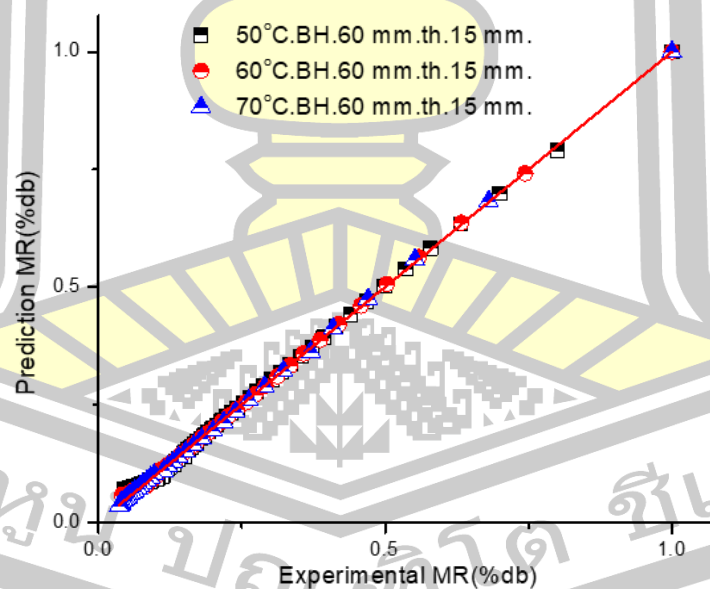
ภาพประกอบ 4.13 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบต 60 มม. ความหนาบุก 10 มม.



ภาพประกอบ 4.14 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบต 60 มม. ความหนาบุก 10 มม.



ภาพประกอบ 4.15 อัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page และข้อมูลจากการทดลอง ที่ ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 15 มม.



ภาพประกอบ 4.16 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นของหัวบุกที่อบด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการทำนายตามสมการของ Modified Page แบบ Linear และข้อมูลจากการทดลอง ที่ความสูงเบด 60 มม. ความหนาบุก 15 มม.

4.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

การลดลงของความชื้น (%db) ของบุกในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันจะพบว่าอุณหภูมิที่สูงส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงมากกว่าอุณหภูมิต่ำกว่าดังภาพประกอบ 4.4-4.12 ในช่วงแรกของการอบแห้งอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนจะสามารถถ่ายโอนได้ดี อัตราส่วนความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้น เมื่อความชื้นที่พื้นผิววัสดุลดลงอย่างมาก อุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราส่วนความชื้นมากซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นว่าการอบแห้งในช่วงนี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากการแพร่ของน้ำเป็นองค์ประกอบหลักในการถ่ายโอนความชื้น [61, 62] อันเนื่องมาจากเกรเดียนต์ความเข้มข้นความชื้น ในระหว่างการอบแห้งความชื้นที่ผิวหน้าจะลดลงเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอน้ำในอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและผิวหน้า ความชื้นที่ผิวหน้าลดลงนี้ ทำให้เกิดเกรเดียนต์ของความชื้นที่ผิวหน้าและภายในวัสดุที่ทำให้การอบแห้งผิวหน้า อัตราการอบแห้งจะถูกควบคุมด้วยการแพร่ความชื้นของวัสดุ วัสดุทางชีวภาพแม้จะมีความชื้นสูงแต่โดยทั่วไปจะไม่พบช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และความเร็วลมจะไม่มีผลโดยตรงต่อการถ่ายโอนความชื้นภายในวัสดุ [63-65]

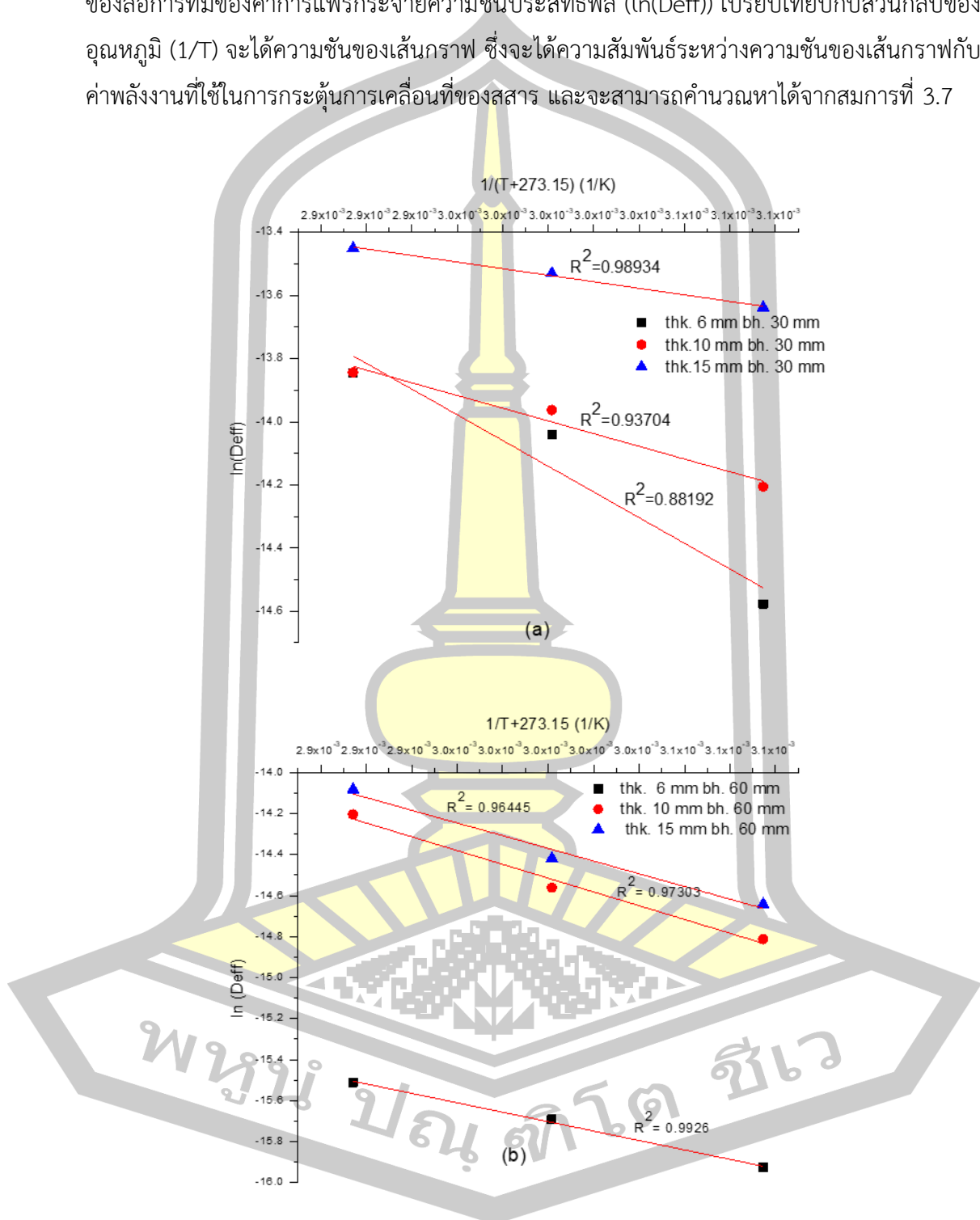
การอบแห้งหัวบุกในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การแพร่ของน้ำจะเป็นส่วนหลักของการถ่ายโอนความชื้นในระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นข้อมูลความชื้นสามารถใช้กฎข้อที่สองของฟิกในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) ได้ดังแสดงในตาราง 4.6

ตาราง 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (Effective diffusivity: D_{eff})

Thickness (mm)	Bed Hight(mm)	Effective diffusivity (m^2/s)			E_a (kJ/mol)
		50 ° C	60 ° C	70 ° C	
6 mm	30 mm	3.8907E-08	6.6507E-08	8.08544E-08	33.8694
10 mm	30 mm	5.6402E-08	7.1938E-08	8.10233E-08	16.7513
15 mm	30 mm	9.9548E-08	1.1094E-07	1.20066E-07	8.6501
6 mm	60 mm	3.0734E-08	3.9515E-08	5.64022E-08	61.2873
10 mm	60 mm	2.3979E-08	3.8839E-08	5.84286E-08	41.0761
15 mm	60 mm	3.1916E-08	4.3314E-08	6.38325E-08	31.9079

ค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเคลื่อนที่ของสสาร (E_a) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้จากรูปแบบสมการความสัมพันธ์ของ Arrheniu ดังนั้นค่าพลังงานที่ใช้ในการ

กระตุ้มการเคลื่อนที่ของสสารสามารถหาได้จากการสร้างกราฟจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูปของลอการิทึมของค่าการแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผล ($\ln(D_{eff})$) เปรียบเทียบกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) จะได้ความชันของเส้นกราฟ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความชันของเส้นกราฟกับค่าพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้มการเคลื่อนที่ของสสาร และจะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 3.7



ภาพประกอบ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) กับอุณหภูมิ ด้วยสมการ Arrhenius (a) ที่ความสูงเบต 30 มม. (b) ที่ความสูงเบต 60 มม.

4.3 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

4.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้านสี

จากผลการวัดค่าสีของหัวบุกสดนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติได้ผลแสดงดังตาราง 4.7 โดยค่าสีเริ่มต้นของหัวบุกสดมีค่า L^* ประมาณ 68.33 ± 0.69 ค่า a^* ประมาณ 1.63 ± 0.05 และค่า b^* ประมาณ 20.57 ± 0.06 ตามลำดับ และเมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า L^* ค่า a^* และค่า b^* ของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) ดังแสดงในตาราง 4.7

ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสีหัวบุกสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชั่น

ปัจจัย	L^*	a^*	b^*	WI
อิทธิพลหลัก				
ความสูงเบต(A)				
30 มิลลิเมตร(a1)	38.74 ± 5.45^a	4.96 ± 1.70^a	12.93 ± 2.61^a	37.14 ± 5.75^a
60 มิลลิเมตร(a2)	40.70 ± 4.26^a	4.26 ± 0.85^a	16.50 ± 1.70^b	38.30 ± 4.56^a
อุณหภูมิลมร้อน (B)				
50 องศาเซลเซียส(b1)	42.59 ± 4.93^a	3.35 ± 0.73^a	13.84 ± 2.81^a	40.79 ± 4.97^a
60 องศาเซลเซียส(b2)	39.33 ± 4.50^{ab}	4.89 ± 0.95^b	14.74 ± 2.84^a	37.33 ± 4.81^{ab}
70 องศาเซลเซียส(b3)	37.24 ± 3.99^b	5.60 ± 1.29^b	15.56 ± 2.72^a	35.05 ± 4.21^b
ความหนาของผลิตภัณฑ์(C)				
6 มิลลิเมตร(c1)	45.04 ± 3.55^a	3.71 ± 0.89^a	13.11 ± 1.6^a	43.35 ± 3.61^a
10 มิลลิเมตร(c2)	38.46 ± 2.00^b	4.83 ± 1.18^b	13.80 ± 3.14^a	36.66 ± 1.71^b
15 มิลลิเมตร(c3)	35.66 ± 3.19^c	5.31 ± 1.51^b	17.23 ± 1.45^b	33.15 ± 3.25^c
อิทธิพลร่วม				
AxB				
a1b1	41.45 ± 6.07^{ab}	3.32 ± 0.93^c	11.91 ± 2.61^d	40.16 ± 6.17^{ab}
a1b2	39.26 ± 4.90^{ab}	5.46 ± 1.05^{ab}	13.01 ± 2.67^{cd}	37.60 ± 5.22^{ab}
a1b3	35.50 ± 3.79^b	6.11 ± 1.62^a	13.87 ± 2.46^{bcd}	33.71 ± 4.30^b
a2b1	43.72 ± 3.46^a	3.38 ± 0.54^c	15.77 ± 1.26^{abc}	41.45 ± 3.66^a

ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสีหัวบุงสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (ต่อ)

ปัจจัย	L*	a*	b*	WI
a2b2	39.41± 4.35 ^{ab}	4.32±0.29 ^{bc}	16.47±1.84 ^{ab}	37.06±4.66 ^{ab}
a2b3	38.98± 3.56 ^{ab}	5.08±0.57 ^{ab}	17.26±1.79 ^a	36.37±3.90 ^{ab}
AxC				
a1c1	44.86±4.45 ^a	3.64±1.00 ^b	11.64±0.79 ^d	43.52±4.51 ^a
a1c2	37.03±0.93 ^{bc}	5.17±1.40 ^{ab}	10.92±1.30 ^d	35.86±1.22 ^{bc}
a1c3	34.31±2.72 ^c	6.09±1.68 ^a	16.22±1.12 ^b	32.04±2.93 ^c
a2c1	45.21±2.63 ^a	3.77±0.80 ^b	14.57±0.54 ^c	43.17±2.69 ^a
a2c2	39.88±1.75 ^b	4.49±0.77 ^{ab}	16.67±0.78 ^b	37.45±1.82 ^b
a2c3	37.01±3.17 ^{bc}	4.53±0.826 ^{ab}	18.24±0.94 ^a	34.26±3.31 ^{bc}
BxC				
b1c1	48.90±0.83 ^a	3.58±0.64 ^{ef}	12.60±3.54 ^c	47.25±1.17 ^a
b1c2	39.87±2.03 ^{cd}	3.90±0.33 ^{def}	16.17±1.26 ^{abc}	38.35±1.27 ^{cd}
b1c3	38.99±2.38 ^{cd}	4.23±0.31 ^{cde}	12.77±1.62 ^c	36.75±2.06 ^{cde}
b2c1	45.33±0.63 ^b	5.12±0.99 ^{bcd}	14.03±3.13 ^{abc}	43.68±0.89 ^b
b2c2	37.33±0.92 ^{de}	5.33±1.08 ^{abc}	17.42±1.13 ^{ab}	35.51±0.77 ^e
b2c3	35.33±0.55 ^{ef}	4.32±0.29 ^{cde}	13.81±1.66 ^{bc}	32.80± 0.44 ^f
b3c1	40.88±1.77 ^c	5.78± 0.54 ^{ab}	14.77±2.86 ^{abc}	39.12±1.46 ^c
b3c2	38.18±2.16 ^{cde}	6.70±1.34 ^a	18.12±1.39 ^a	36.11±1.53 ^{de}
b3c3	32.65±2.03 ^f	3.58±0.64 ^{ef}	12.60±3.54 ^c	29.91±1.74 ^g
AxBxC				
a1b1c1	49.5±0.53 ^a	2.37±0.32 ^f	11.20±0.39 ^g	48.22±0.55 ^a
a1b1c2	38.03±0.41 ^{fg}	3.47±0.95 ^{def}	9.37±0.08 ^h	37.23±0.39 ^{fg}
a1b1c3	36.83±0.36 ^{gh}	4.13±0.23 ^{cde}	15.17±0.93 ^{ef}	34.90±0.56 ^h
a1b2c1	45.70±0.26 ^b	4.30±0.36 ^{cd}	11.33±0.60 ^g	44.361±0.348 ^c
a1b2c2	36.8±0.78 ^{sh}	5.87±0.81 ^b	11.20±0.40 ^g	35.55±0.91 ^{sh}
a1b2c3	35.27±0.60 ^{hi}	6.23±0.68 ^b	16.50±0.79 ^{cde}	32.9±0.35 ⁱ
a1b3c1	39.4±0.89 ^{ef}	4.27±0.42 ^{cd}	12.40±0.85 ^g	37.99±0.99 ^{ef}

ตาราง 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าสีหัวบุกสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (ต่อ)

ปัจจัย	L*	a*	b*	WI
a1b3c2	36.27±0.53 ^{gh}	6.17±0.55 ^b	12.20±0.61 ^g	34.81±0.66 ^h
a1b3c3	30.83±0.43 ^j	7.90±0.35 ^a	17.00±0.95 ^{bc}	28.333±0.21 ^j
AxBxC				
a1b1c1	49.5±0.53 ^a	2.37±0.32 ^f	11.20±0.39 ^g	48.22±0.55 ^a
a1b1c2	38.03±0.41 ^{fg}	3.47±0.95 ^{def}	9.37±0.08 ^h	37.23±0.39 ^{fg}
a1b1c3	36.83±0.36 ^{gh}	4.13±0.23 ^{cde}	15.17±0.93 ^{ef}	34.90±0.56 ^h
a1b2c1	45.70±0.26 ^b	4.30±0.36 ^{cd}	11.33±0.60 ^g	44.361±0.348 ^c
a1b2c2	36.8±0.78 ^{gh}	5.87±0.81 ^b	11.20±0.40 ^g	35.55±0.91 ^{gh}
a1b2c3	35.27±0.60 ^{hi}	6.23±0.68 ^b	16.50±0.79 ^{cde}	32.9±0.35 ⁱ
a1b3c1	39.4±0.89 ^{ef}	4.27±0.42 ^{cd}	12.40±0.85 ^g	37.99±0.99 ^{ef}
a1b3c2	36.27±0.53 ^{gh}	6.17±0.55 ^b	12.20±0.61 ^g	34.81±0.66 ^h
a1b3c3	30.83±0.43 ^j	7.90±0.35 ^a	17.00±0.95 ^{bc}	28.333±0.21 ^j
a2b1c1	48.3±0.61 ^a	2.77±0.45 ^{ef}	14.30±0.10 ^f	46.286±0.61 ^b
a2b1c2	41.70±0.35 ^{cd}	3.70±0.26 ^{def}	15.83±0.25 ^{cdef}	39.47±0.36 ^d e
a2b1c3	41.17±0.20 ^{cde}	3.67±0.25 ^{def}	17.17±0.32 ^{bc}	38.60±0.28 ^{def}
a2b2c1	44.97±0.72 ^b	4.17±0.32 ^{cd}	14.20±0.1 ^{7f}	43.01±0.73 ^c
a2b2c2	37.87±0.81 ^{fg}	4.37±0.38 ^{cd}	16.87±0.59 ^{bcd}	35.47±0.82 ^{gh}
a2b2c3	35.40±0.62 ^{hi}	4.43±0.23 ^{cd}	18.33±0.21 ^{ab}	32.70±0.58 ⁱ
a2b3c1	42.37±0.66 ^c	4.37±0.21 ^{cd}	15.21±0.45 ^{def}	40.24±0.75 ^d
a2b3c2	40.1±0.61 ^{de}	5.40±0.10 ^c	17.33±0.55 ^{bc}	37.41±0.63 ^f
a2b3c3	34.47±0.51 ⁱ	5.50±0.26 ^c	19.23±0.47 ^a	31.48±0.34 ⁱ

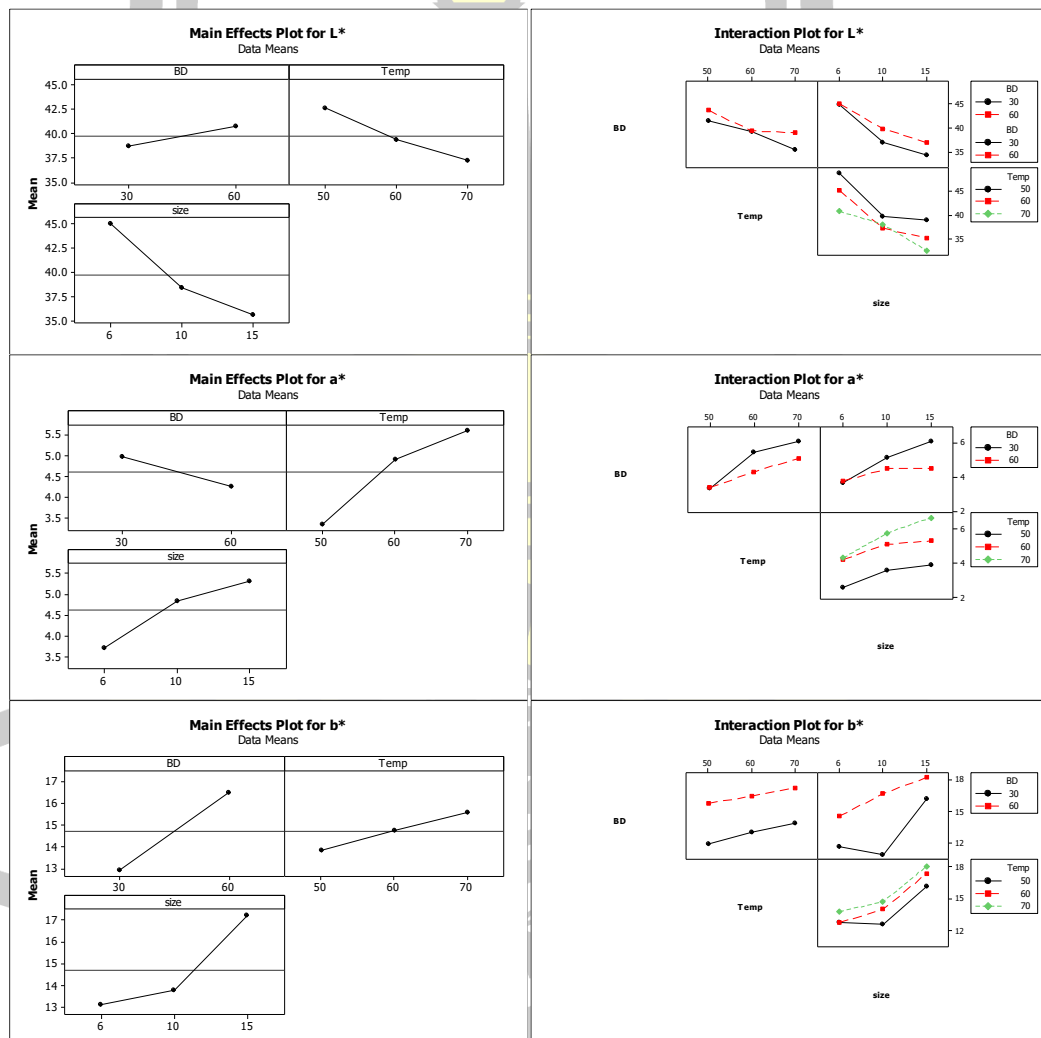
หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

จากตาราง 4.7 และภาพประกอบ 4.18 การวิเคราะห์หาค่าสีบุกหลังการอบแห้ง เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง ค่าความเป็นสีเหลือง, พบว่า ความสูงของเบตไม่มีผลต่อความสว่าง ค่าสีแดง และดัชนีความขาว แต่มีผลต่อค่าสีเหลือง

อุณหภูมิมีผลต่อค่าความสว่าง ค่าสีแดง ดัชนีความขาว โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 50

องศาเซลเซียส จนถึง 70 องศาเซลเซียสค่าความสว่างและดัชนีความขาวลดลง แต่ค่าสีแดงเพิ่มขึ้น และค่าสีเหลืองไม่แตกต่างกันอย่างนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเกี่ยวกับเอนไซม์ (Enzymatic Browning Reaction) และ ปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวกับเอนไซม์ (Non-enzymatic Browning Reaction)

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบเกี่ยวกับเอนไซม์ (Enzymatic Browning Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อพืชเมื่อ เซลล์ถูกทำลายทางกลเช่น การปอกเปลือก การหั่น ทำให้ monophenol ที่อยู่ในเซลล์ พืชสัมผัสกับออกซิเจน และความร้อนในการอบแห้ง โดยมีเอนไซม์กลุ่ม polyphenol oxidase (PPO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้วัสดุในการอบแห้งมีสีน้ำตาล ในขั้นตอน การเตรียมผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง



ภาพประกอบ 4.18 แผนภูมิแสดงอิทธิพลหลักและอิทธิพลร่วม ที่มีผลต่อค่าความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) ค่าสีเหลือง (b*)

การเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวกับเอนไซม์ (Non-enzymatic Browning Reaction) เมื่อผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรตและโปรตีน เป็นองค์ประกอบ เมื่อได้รับความร้อนจะมีการสูญเสียน้ำ และมีการสลายตัว (Degradation) และมีการควบแน่น (Condensation) ของหมู่เอมีนและน้ำตาลรีดิวซ์ ซึ่งแล้วกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีเหลืองจนถึงสีน้ำตาลแดง ปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่เกี่ยวกับเอนไซม์ มี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการเมลเลชัน (Carmelization) และ ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Impaprasert และคณะ ได้ทำการศึกษาการสกัด Glucomannan จากบุก พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง ค่าความแปรสีแดง ค่าความแปรสีเหลืองดัชนีความขาวของบุก [6] และการศึกษาของ Anuj Kumar และคณะได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของบุก พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่น เปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง ค่าความแปรสีแดง ค่าความแปรสีเหลืองของบุกโดยตรง [7]

ความหนาของผลิตภัณฑ์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และค่าดัชนีสีขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความสว่างและดัชนีความขาวลดลงเนื่องจากผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งมากขึ้นจึงทำให้ค่าความสว่างและดัชนีความขาวมีแนวโน้มลดลง ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล

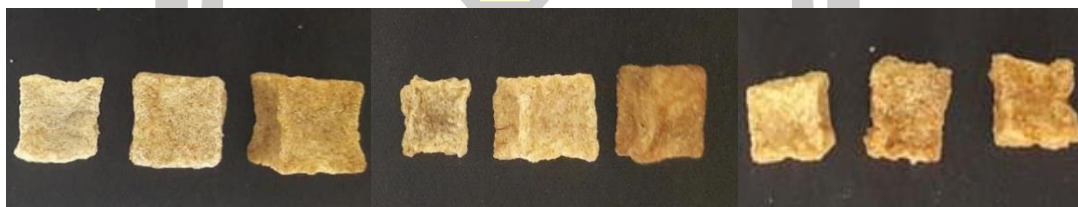
อิทธิพลร่วมระหว่างระหว่างความสูงของเบตกับอุณหภูมิ พบว่าค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาว จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบแห้งเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจาก 50 องศาเซลเซียสจนถึง 70 องศาเซลเซียสค่าความสว่าง ดัชนีความขาวจะลดลง ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความหนาของเบตจาก 30 มิลลิเมตรเป็น 60 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิที่เท่ากันค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันมากนัก

อิทธิพลร่วมระหว่างระหว่างความสูงของเบตกับอุณหภูมิ พบว่าค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาว จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบแห้งเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งจาก 50 องศาเซลเซียสจนถึง 70 องศาเซลเซียสค่าความสว่าง ดัชนีความขาวจะลดลง ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความสูงของเบตจาก 30 มิลลิเมตรเป็น 60 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิที่เท่ากันค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันมากนัก

อิทธิพลร่วมระหว่างระหว่างความสูงของเบตกับความหนาผลิตภัณฑ์ พบว่าค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาว จะขึ้นอยู่กับความหนาผลิตภัณฑ์ ในการอบแห้งเมื่อมีการเพิ่มความหนาผลิตภัณฑ์ ในการอบแห้งจาก 6 มิลลิเมตร 10 มิลลิเมตรและ 15 มิลลิเมตรค่าความสว่าง ดัชนีความขาวจะลดลง ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความสูงเบต จาก 30 มิลลิเมตรเป็น 60 มิลลิเมตร ความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาวจะไม่แตกต่างกัน

อิทธิพลร่วมระหว่างระหว่างอุณหภูมิกับความหนาผลิตภัณฑ์ พบว่าค่าความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาว จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบแห้งเมื่อมีการเพิ่มความหนาผลิตภัณฑ์ ในการอบแห้งจาก 50 องศาเซลเซียสจนถึง 70 องศาเซลเซียส ค่าความสว่าง ดัชนีความขาว ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองจะลดลง แต่เมื่อความหนาผลิตภัณฑ์ จาก 6 มิลลิเมตรเป็น 15 มิลลิเมตร ความสว่าง ค่าสีแดง ค่าสีเหลือง และดัชนีความขาวจะไม่แตกต่างกัน

อิทธิพลร่วมระหว่างความสูงของเบต อุณหภูมิและความหนาผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย พบว่าความสูงเบต 30 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและความหนาผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง 6 มิลลิเมตร จะให้ค่าความสว่าง และดัชนีสีขาวมากที่สุดและให้ค่าสีแดงและค่าสีเหลืองน้อยที่สุด [6, 8]



ขนาด 6 mm. 50°C,60 °C และ70 °C ขนาด 10 mm. 50°C,60 °C และ 70 °C ขนาด 15 mm. 50°C,60 °C และ 70 °C

ภาพประกอบ 4.19 สีและการหดตัวหลังการอบแห้ง ที่ความสูงเบต 30 มิลลิเมตร

4.3.2 การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้านการหดตัว

จากผลการวิเคราะห์ทางกายภาพด้านการหดตัวของหัวบุกสดนำผลมาวิเคราะห์ทางสถิติ ได้ผลแสดงดังตาราง 4.8 และภาพประกอบ 4.19 โดยปริมาตรของหัวบุกสดมีปริมาตร 216, 10000 และ 3375 มม.³ ตามลำดับ และเมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า ปริมาตรของหัวบุกสดของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) ดังแสดงในตาราง 4.8

พูน ปณ ทิโต ชิว

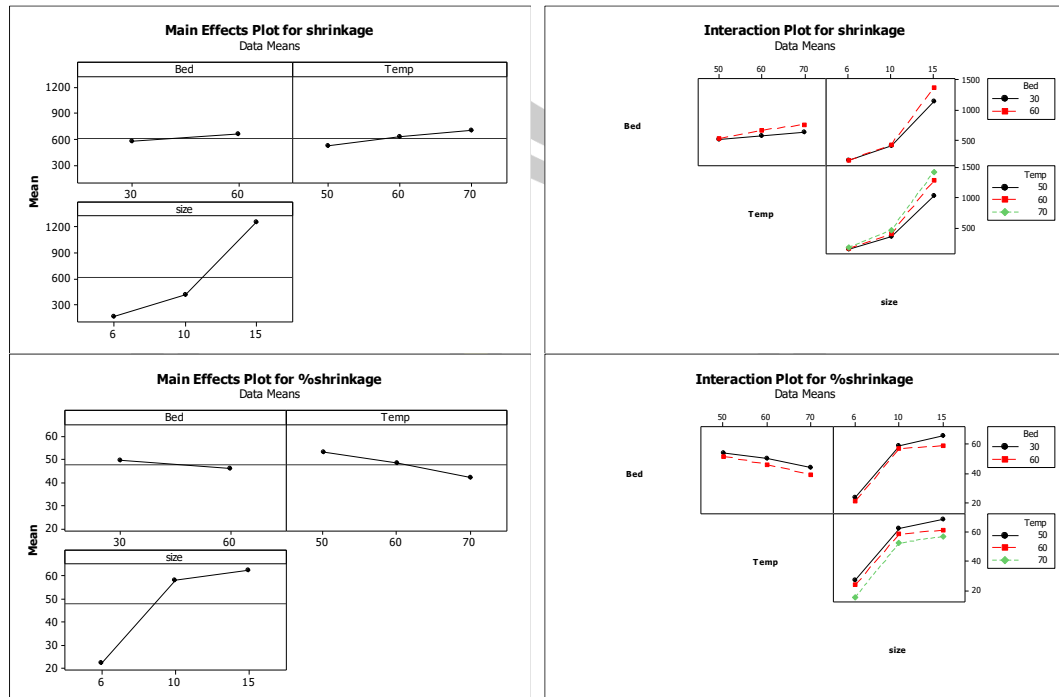
ตาราง 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าการหดของหัวบูกสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

ปัจจัย	การหดตัวเชิงปริมาตร (มม. ³)	ร้อยละการหดตัว
อิทธิพลหลัก		
ความสูงเบด(A)		
30 มิลลิเมตร(a1)	573.00±433.7 ^a	49.71±19.72 ^a
60 มิลลิเมตร(a2)	656.5±549.4 ^a	45.90±18.8 ^a
อุณหภูมิลมร้อน (B)		
50 องศาเซลเซียส(b1)	524.5±392.7 ^a	22.522±6.48 ^a
60 องศาเซลเซียส(b2)	623.2±510.3 ^a	58.186±5.64 ^b
70 องศาเซลเซียส(b3)	696.5±569.7 ^a	62.703±7.22 ^b
ความหนาของผลิตภัณฑ์(C)		
6 มิลลิเมตร(c1)	167.4±14.0 ^a	43.35±3.61 ^a
10 มิลลิเมตร(c2)	418.1±56.4 ^b	36.66±1.71 ^b
15 มิลลิเมตร(c3)	1258.8±244.0 ^c	33.15±3.25 ^c
อิทธิพลร่วม		
AxB		
a1b1	514.3±402.3 ^a	54.37±19.30 ^a
a1b2	575.2±459.2 ^a	50.22±19.25 ^a
a1b3	629.5±480.9 ^a	44.53±21.58 ^a
a2b1	534.8±406.9 ^a	51.93±19.88 ^a
a2b2	671.3±580.8 ^a	46.32±17.46 ^a
a2b3	763.5±669.6 ^a	39.44±19.2 ^a
AxC		
a1c1	164.4±15.8 ^d	23.903±7.30 ^c
a1c2	408.1±66.8 ^c	59.189±6.67 ^{ab}
a1c3	1146.5±135.0 ^b	66.028±4.00 ^a
a2c1	170.3±12.2 ^d	21.141±5.64 ^c
a2c2	428.2±45.7 ^c	57.183±4.57 ^b
a2c3	1371.0±282.7 ^d	59.377±8.37 ^{ab}

ตาราง 4.8 ผลการวิเคราะห์ค่าการหดของหัวบุกสดหลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (ต่อ)

ปัจจัย	การหดตัวเชิงปริมาตร (มม. ³)	ร้อยละการหดตัว
BxC		
b1c1	156.3±9.5 ^e	27.629±4.39 ^a
b1c2	372.0±35.0 ^{cd}	62.802±3.50 ^{ab}
b1c3	1045.3±83.0 ^b	69.030±2.45 ^a
b2c1	163.6±6.5 ^{de}	24.257±2.99 ^{de}
b2c2	410.6±36.8 ^c	58.936±3.68 ^{bc}
b2c3	1295.5±184.3 ^a	61.615±5.46 ^{ab}
b3c1	182.1±10.5 ^e	15.679±4.87 ^e
b3c2	471.8±46.6 ^c	52.820±4.66 ^c
b3c3	1435.6±260.1 ^a	57.463±7.70 ^{bc}
AxBxC		
a1b1c1	152.7±12.8 ^s	29.31±5.94 ^d
a1b1c2	355.3±44.7 ^{defg}	64.46±4.47 ^{abc}
a1b1c3	1034.8±67.9 ^c	69.33±2.01 ^a
a1b2c1	161.5±7.6 ^{fg}	25.24±3.53 ^{de}
a1b2c2	401.4±48.4 ^{def}	59.86±4.83 ^{abc}
a1b2c3	1162.8±145.7 ^c	65.54±4.31 ^{ab}
a1b3c1	178.9±15.4 ^{efg}	17.15±7.11 ^{de}
a1b3c2	467.6±62.6 ^d	53.23±6.25 ^{bc}
a1b3c3	1242.0±119.4 ^{bc}	63.20±3.53 ^{abc}
a2b1c1	160.0±4.5 ^{fg}	25.94±2.09 ^{de}
a2b1c2	388.6±15.1 ^{defg}	61.13±1.50 ^{abc}
a2b1c3	1055.7±110.9 ^c	68.72±3.28 ^a
a2b2c1	165.7±5.8 ^{fg}	23.27±2.66 ^{de}
a2b2c2	419.9±28.1 ^{de}	58.01±2.81 ^{abc}
a2b2c3	1428.2±104.3 ^{ab}	57.68±3.09 ^{abc}
a2b3c1	185.3±3.3 ^{efg}	14.20±1.51 ^e
a2b3c2	476.0±38.3 ^d	52.40±3.82 ^c
a2b3c3	1629.2±205.9 ^a	51.72±6.10 ^c

หมายเหตุ : ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)



ภาพประกอบ 4.20 แผนภูมิแสดงอิทธิพลร่วม ความสูงเบต อุณหภูมิและขนาดของบुकอบแห้งที่มีผลต่อค่าการหดตัว

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าการหดตัวของบुकโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 พบว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) คือความสูงของเบต อุณหภูมิและขนาดของผลิตภัณฑ์และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) ของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าการหดของผลิตภัณฑ์โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัยในตาราง 4.8 อิทธิพลร่วมระหว่างความสูงของเบต ขนาดของผลิตภัณฑ์และอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิกับขนาด มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟคทอเรียล สามารถแสดงเป็นแผนภาพอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์ และความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของปัจจัยได้ดังภาพประกอบ 4.20

เมื่อพิจารณาปัจจัยความสูงเบตในการอบแห้งต่อค่าการหดตัวจากตาราง 4.8 และภาพประกอบ 4.20 เส้นกราฟชันน้อยมาก ซึ่งหมายถึงว่า เมื่อความสูงของเบตในการอบแห้งสูงขึ้นจะไม่ส่งผลต่อค่าการหดตัวและอัตราการหดตัว ดังนั้นปัจจัยความสูงของเบตในการอบแห้งจึงไม่มีผลต่างค่าการหดตัวและอัตราการหดตัว อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

เมื่อพิจารณาปัจจัยอุณหภูมิในการอบแห้งต่อค่าการหดตัวและอัตราการหดตัว จากภาพประกอบ 4.20 เส้นกราฟชันเล็กน้อย ซึ่งหมายถึงว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะไม่ส่งต่อค่าการหดตัวลดลงและอัตราการหดตัว ดังนั้นปัจจัยอุณหภูมิในการอบแห้งจึงไม่มีผลต่อค่าการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาปัจจัยขนาดของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งต่อค่าการหดตัวและอัตราการหดตัว จากภาพประกอบ 4.20 เส้นกราฟชันขึ้น ซึ่งหมายถึงว่า เมื่อขนาดของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งมีขนาดเพิ่มขึ้นจะส่งต่อค่าการหดตัวและอัตราการหดตัว สูงขึ้น แต่เมื่อลดขนาดของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งให้มีขนาดเล็กลงจะส่งผลให้ค่าการหดตัวและอัตราการหดตัว ของผลิตภัณฑ์ลดลง ดังนั้นปัจจัยขนาดของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งจึงมีผลต่อค่าการหดตัวอย่างมีนัยสำคัญ

จากการพิจารณากราฟของอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย ดังภาพประกอบ 4.20 อิทธิพลร่วมระหว่าง ความสูงเบต กับขนาดของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง มีผลต่อการหดตัวและอัตราการหดตัว ดังนี้ ขนาดของผลิตภัณฑ์ขนาด 15 มม.จะมีอัตราการหดตัวและอัตราการหดตัว ที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ขนาด 6 และ 10 มม.เนื่องผลิตภัณฑ์มีโอกาสสัมผัสลมร้อนได้อย่างทั่วถึงจึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง และอิทธิพลร่วมระหว่าง อุณหภูมิกับขนาดของผลิตภัณฑ์ มีผลต่อค่าการหดตัว ดังนี้ขนาดของผลิตภัณฑ์ขนาด 15 มม. จะมีอัตราการหดตัวที่สูง

4.4 การทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งของหัวบุกด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

4.4.1 วิเคราะห์โครงข่ายประสาทเทียมการทดลองการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน ผลการวิเคราะห์การทดลองการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน โดยการสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองการอบแห้งหัวบุกสด ผลการทดสอบการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับที่มีชั้นซ่อน 3 ชั้นซ่อน โดยผลการทดสอบจะแยกออกเป็น 2 แบบจำลอง คือแบบจำลองอัตราส่วนความชื้น (MR) และ อัตราการอบแห้ง (DR) ผลของการทดลองในการศึกษาทั้งสองกรณีจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแต่ละโครงข่ายซึ่งมีความแตกต่างกันตามจำนวนโหนดภายในชั้นซ่อน และรูปแบบของฟังก์ชันกระตุ้นที่แตกต่างกัน โดยเงื่อนไขจะเลือกค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักและค่าไบแอสโดยการสุ่มเลือก ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error: MSE) R^2 ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean Squared error: RMSE) และค่ากำลังสองความคลาดเคลื่อน (Error sum of squares: SSE) เพื่อหาโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับที่เหมาะสมกับการพยากรณ์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของการอบแห้งหัวบุกได้ ดังแสดงในตาราง 4.9

ตาราง 4.9 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชัน (MR) การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

Transfer Function	Neuron in		Statistical Parameter			
	hidden layer 1	hidden layer 2	MSE	R ²	RMSE	SSE
Log/Purelin	2	0	0.005810	0.898836	0.070096	1.130103
Log/Purelin	4	0	0.000376	0.993853	0.020387	0.095592
Log/Purelin	6	0	0.000216	0.997053	0.014124	0.045882
Log/Purelin	8	0	0.000134	0.996244	0.015991	0.058815
Log/Purelin	10	0	0.002210	0.950093	0.054426	0.681315
Log/Log/Purelin	2	2	0.000633	0.989814	0.025932	0.154663
Log/Log/Purelin	2	4	0.002370	0.960820	0.051367	0.606877
Log/Log/Purelin	2	6	0.000263	0.994787	0.018746	0.080826
Log/Log/Purelin	2	8	0.000468	0.992966	0.021873	0.110036
Log/Log/Purelin	2	10	0.000494	0.991538	0.023746	0.129688
Log/Log/Purelin	4	2	0.000285	0.993763	0.020380	0.095529
Log/Log/Purelin	4	4	0.000312	0.994535	0.019105	0.083947
Log/Log/Purelin	4	6	0.000320	0.994828	0.018568	0.079297
Log/Log/Purelin	4	8	0.000084	0.996534	0.015275	0.053668
Log/Log/Purelin	4	10	0.000487	0.962418	0.047847	0.526558
Log/Log/Purelin	6	2	0.000368	0.989494	0.025286	0.147059
Log/Log/Purelin	6	4	0.000197	0.996701	0.014880	0.050926
Log/Log/Purelin	6	6	0.000162	0.994303	0.019487	0.087340
Log/Log/Purelin	6	8	0.000232	0.995982	0.016428	0.062070
Log/Log/Purelin	6	10	0.000143	0.995035	0.018116	0.075482
Log/Log/Purelin	8	2	0.000167	0.996844	0.014580	0.048893
Log/Log/Purelin	8	4	0.000142	0.992872	0.021429	0.105612
Log/Log/Purelin	8	6	0.000130	0.995100	0.017880	0.073490

ตาราง 4.9 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชัน (MR) การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (ต่อ)

Transfer Function	Neuron in		Statistical Parameter			
	hidden layer 1	hidden layer 2	MSE	R ²	RMSE	SSE
Log/Log/Purelin	8	8	0.000132	0.997300	0.013440	0.041550
Log/Log/Purelin	8	10	0.000131	0.997300	0.013460	0.041650
Log/Log/Purelin	10	2	0.000262	0.994200	0.019690	0.089210
Log/Log/Purelin	10	4	0.000112	0.996700	0.014870	0.050880
Log/Log/Purelin	10	6	0.000115	0.997100	0.013960	0.044840
Log/Log/Purelin	10	8	0.000101	0.993100	0.021310	0.104400
Log/Log/Purelin	10	10	0.000170	0.995800	0.016710	0.064260

ตาราง 4.10 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง (DR) การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

Transfer Function	Neuron in		Statistical Parameter			
	hidden layer 1	hidden layer 2	MSE	R ²	RMSE	SSE
Log/Purelin	2	0	0.001370	0.970700	0.037460	0.745200
Log/Purelin	4	0	0.000664	0.979400	0.031800	0.537100
Log/Purelin	6	0	0.000484	0.990200	0.021930	0.255300
Log/Purelin	8	0	0.001550	0.959400	0.042870	0.975900
Log/Purelin	10	0	0.000369	0.987600	0.024980	0.331500
Log/Log/Purelin	2	2	0.001250	0.968400	0.039020	0.808500
Log/Log/Purelin	2	4	0.000366	0.987300	0.024980	0.331300
Log/Log/Purelin	2	6	0.000351	0.989400	0.022940	0.022940
Log/Log/Purelin	2	8	0.000465	0.987600	0.024810	0.326900
Log/Log/Purelin	2	10	0.000444	0.982600	0.028880	0.442800

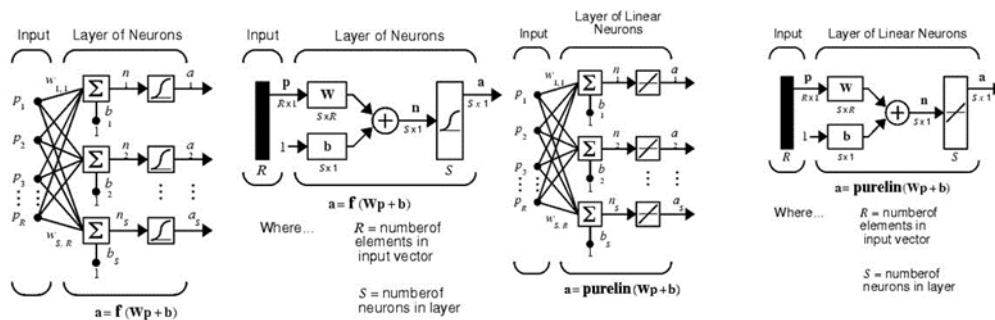
ตาราง 4.10 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการเรียนรู้ (DR) การอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน (ต่อ)

Transfer Function	Neuron in		Statistical Parameter			
	hidden layer 1	hidden layer 2	MSE	R ²	RMSE	SSE
Log/Log/Purelin	4	2	0.000399	0.985400	0.026970	0.386100
Log/Log/Purelin	4	4	0.000324	0.991200	0.021020	0.234600
Log/Log/Purelin	4	6	0.000499	0.986000	0.025930	0.357100
Log/Log/Purelin	4	8	0.000341	0.986400	0.025690	0.350500
Log/Log/Purelin	4	10	0.000472	0.991400	0.020710	0.227700
Log/Log/Purelin	6	2	0.000500	0.980800	0.030830	0.504600
Log/Log/Purelin	6	4	0.000459	0.989800	0.022780	0.275500
Log/Log/Purelin	6	6	0.000443	0.991000	0.021380	0.242800
Log/Log/Purelin	6	8	0.000246	0.993400	0.018060	0.173300
Log/Log/Purelin	6	10	0.000482	0.973400	0.033750	0.605000
Log/Log/Purelin	8	2	0.000150	0.949800	0.047380	1.192000
Log/Log/Purelin	8	4	0.000358	0.988600	0.023590	0.295400
Log/Log/Purelin	8	6	0.000362	0.984400	0.027620	0.405100
Log/Log/Purelin	8	8	0.000331	0.988000	0.024510	0.319100
Log/Log/Purelin	8	10	0.000383	0.989900	0.022390	0.266300
Log/Log/Purelin	10	2	0.000339	0.979000	0.030500	0.493900
Log/Log/Purelin	10	4	0.000327	0.986200	0.026250	0.365900
Log/Log/Purelin	10	6	0.000262	0.983000	0.028290	0.425000
Log/Log/Purelin	10	8	0.000531	0.974400	0.035020	0.652100
Log/Log/Purelin	10	10	0.000374	0.986700	0.025840	0.354700

ตาราง 4.11 แสดงผลโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งหัวบุกสดด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

Drying Model	MSE	R ²	RMSE	SSE	ANNs network
Moisture Ratio (MR)	0.000098	0.99780	0.01099	0.06605	4-8-8-1
Drying Rate (DR)	0.000246	0.99340	0.01806	0.17330	4-6-8-1

ลักษณะโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว แสดงดังภาพประกอบ 4.21 ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมที่ผ่านการฝึกสอนมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือมีค่า R² เท่ากับ 0.99780 สำหรับอัตราส่วนความชื้น และ R² เท่ากับ 0.99340 สำหรับอัตราการอบแห้ง



ภาพประกอบ 4.21 ลักษณะโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

4.4.2 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายอัตราส่วนความชื้นการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

กำหนดให้

m = เวลาในการอบแห้ง (minute)

T = อุณหภูมิการอบแห้ง °C

s = ขนาดของบูกทรงลูกบาศก์ mm.

b = ความสูงเบต mm.

First hidden layer

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \text{Logsig}[(-3.0788m + 0.58087T - 5.8058s + 0.013944b)(2.3968)] \\
 a_2 &= \text{Logsig}[(1.0126m - 1.9751T - 5.0206s + 0.3094b)(3.144)] \\
 a_3 &= \text{Logsig}[(3.0057m - 0.46275T - 0.88182s + 2.6816b)(6.1578)] \\
 a_4 &= \text{Logsig}[(0.23407m - 7.0768T - 2.7312s - 1.2419b)(-2.9236)] \\
 a_5 &= \text{Logsig}[(-2.8252m + 5.4592T - 0.56362s - 2.3097b)(-0.12633)] \\
 a_6 &= \text{Logsig}[(5.3443m - 0.057236T + 0.50077s - 0.99951b)(4.8534)] \\
 a_7 &= \text{Logsig}[(-4.1605m - 0.58292T + 0.73698s - 1.3031b)(-3.6001)] \\
 a_8 &= \text{Logsig}[(1.2564m - 2.0042T + 1.1707s - 3.1036b)(-4.5039)]
 \end{aligned}$$

Second hidden layer

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \text{Logsig}[(1.9096a_1 - 2.5973a_2 + 4.3454a_3 + 5.8867a_4 - 0.51298a_5 \\
 &\quad - 0.032213a_6 + 2.9259a_7 - 0.28806a_8)(-1.5675)] \\
 y_2 &= \text{Logsig}[(-1.2137a_1 + 2.8046a_2 + 3.2019a_3 + 3.2987a_4 + 2.6343a_5 \\
 &\quad - 0.59384a_6 - 3.2647a_7 - 1.6226a_8)(1.1513)] \\
 y_3 &= \text{Logsig}[(2.606a_1 + 2.7864a_2 - 4.9541a_3 + 7.3556a_4 - 0.38762a_5 \\
 &\quad + 5.4504a_6 + 0.23107a_7 + 2.237a_8)(-6.8867)] \\
 y_4 &= \text{Logsig}[(2.9139a_1 - 1.3585a_2 - 6.7298a_3 + 0.70525a_4 + 2.7388a_5 \\
 &\quad - 23.7794a_6 + 11.4473a_7 + 5.0342a_8)(1.3369)] \\
 y_5 &= \text{Logsig}[(-1.8373a_1 - 5.7317a_2 + 0.96741a_3 - 2.8094a_4 + 2.8857a_5 \\
 &\quad + 2.7197a_6 + 2.1966a_7 - 0.92073a_8)(-1.316)] \\
 y_6 &= \text{Logsig}[(1.2997a_1 - 5.0272a_2 - 0.56421a_3 + 2.8515a_4 - 1.1436a_5 \\
 &\quad - 1.6007a_6 - 0.50355a_7 - 3.1132a_8)(0.75416)] \\
 y_7 &= \text{Logsig}[(-1.7797a_1 + 2.8967a_2 - 3.2862a_3 + 3.4157a_4 + 2.1577a_5 \\
 &\quad - 6.3014a_6 + 1.4155a_7 + 0.084557a_8)(-2.5234)] \\
 y_8 &= \text{Logsig}[(2.7986a_1 - 0.67396a_2 + 1.4392a_3 - 2.3a_4 - 0.39028a_5 \\
 &\quad - 3.6072a_6 + 4.9435a_7 + 5.9023a_8)(-5.3629)]
 \end{aligned}$$

Moisture Ratio

$$\begin{aligned}
 &= \text{Purlin}[(2.7839y_1 - 1.5005y_2 - 0.5623y_3 + 15.5138y_4 \\
 &\quad - 0.30699y_5 + 2.746y_6 + 2.0347y_7 + 3.0261y_8)(-1.8446)]
 \end{aligned}$$

4.4.3 การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายอัตราส่วนการอบแห้งหัวบุก

ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

กำหนดให้

M = เวลาในการอบแห้ง (minute)

T = อุณหภูมิการอบแห้ง °C

s = ขนาดของบุงทรงลูกบาศก์ mm.

b = ความสูงเบต mm.

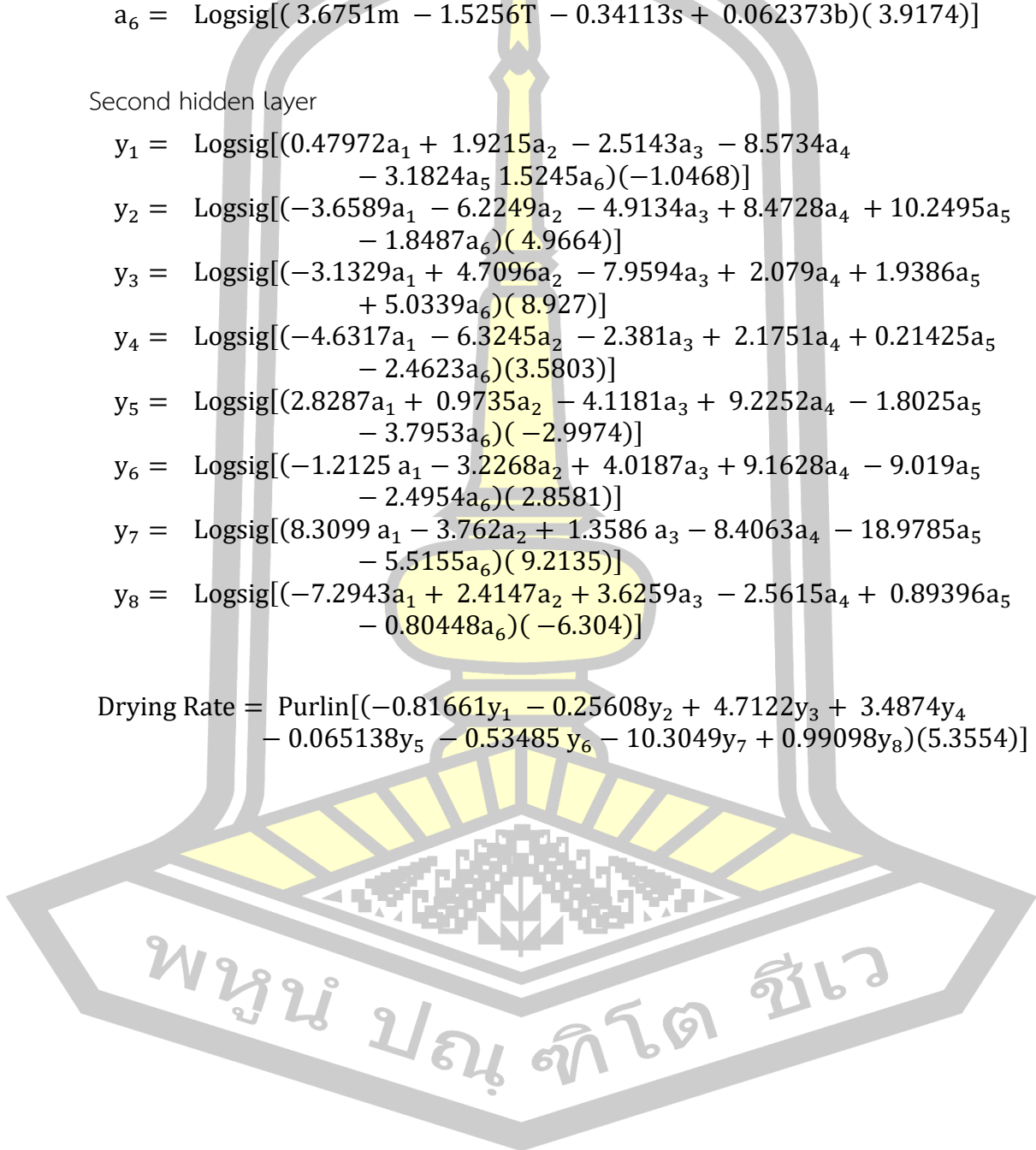
First hidden layer

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \text{Logsig}[(1.2037m - 0.38277T - 0.4718s - 3.3726b)(5.3845)] \\
 a_2 &= \text{Logsig}[(-0.91862m + 0.5434T - 1.5432s + 0.55696b)(0.23331)] \\
 a_3 &= \text{Logsig}[(13.5914m + 3.3325T - 16.0282s + 1.6121b)(2.8448)] \\
 a_4 &= \text{Logsig}[(-5.2898m - 0.14367T + 0.81461s - 0.098125b)(-6.3022)] \\
 a_5 &= \text{Logsig}[(-26.936m + 0.47273T - 0.45162s - 0.30365b)(-27.8691)] \\
 a_6 &= \text{Logsig}[(3.6751m - 1.5256T - 0.34113s + 0.062373b)(3.9174)]
 \end{aligned}$$

Second hidden layer

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \text{Logsig}[(0.47972a_1 + 1.9215a_2 - 2.5143a_3 - 8.5734a_4 \\
 &\quad - 3.1824a_5 + 1.5245a_6)(-1.0468)] \\
 y_2 &= \text{Logsig}[(-3.6589a_1 - 6.2249a_2 - 4.9134a_3 + 8.4728a_4 + 10.2495a_5 \\
 &\quad - 1.8487a_6)(4.9664)] \\
 y_3 &= \text{Logsig}[(-3.1329a_1 + 4.7096a_2 - 7.9594a_3 + 2.079a_4 + 1.9386a_5 \\
 &\quad + 5.0339a_6)(8.927)] \\
 y_4 &= \text{Logsig}[(-4.6317a_1 - 6.3245a_2 - 2.381a_3 + 2.1751a_4 + 0.21425a_5 \\
 &\quad - 2.4623a_6)(3.5803)] \\
 y_5 &= \text{Logsig}[(2.8287a_1 + 0.9735a_2 - 4.1181a_3 + 9.2252a_4 - 1.8025a_5 \\
 &\quad - 3.7953a_6)(-2.9974)] \\
 y_6 &= \text{Logsig}[(-1.2125a_1 - 3.2268a_2 + 4.0187a_3 + 9.1628a_4 - 9.019a_5 \\
 &\quad - 2.4954a_6)(2.8581)] \\
 y_7 &= \text{Logsig}[(8.3099a_1 - 3.762a_2 + 1.3586a_3 - 8.4063a_4 - 18.9785a_5 \\
 &\quad - 5.5155a_6)(9.2135)] \\
 y_8 &= \text{Logsig}[(-7.2943a_1 + 2.4147a_2 + 3.6259a_3 - 2.5615a_4 + 0.89396a_5 \\
 &\quad - 0.80448a_6)(-6.304)]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Drying Rate} &= \text{Purlin}[(-0.81661y_1 - 0.25608y_2 + 4.7122y_3 + 3.4874y_4 \\
 &\quad - 0.065138y_5 - 0.53485y_6 - 10.3049y_7 + 0.99098y_8)(5.3554)]
 \end{aligned}$$



บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน จากการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปดังนี้

- 5.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน
- 5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน
- 5.3 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทของการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน
- 5.4 ข้อเสนอแนะ

5.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์และคุณภาพของบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

จากการศึกษาการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1.1 อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งหัวบุกโดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้น
- 5.1.2 อุณหภูมิและขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์มีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น
- 5.1.3 อุณหภูมิและความสูงของเบดในการอบแห้งมีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่ออัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้งสูงขึ้น
- 5.1.4 ความสูงของเบดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิและขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์มีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์
- 5.1.5 ความสูงของเบดและอุณหภูมิในการอบแห้งมีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์
- 5.1.6 ขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิมิมีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์
- 5.1.7 ความสูงของเบดและขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งมีอิทธิพลร่วมที่ส่งผลต่อเปลี่ยนแปลงของสีของผลิตภัณฑ์
- 5.1.8 ความสูงของเบดและอุณหภูมิมิมีผลต่ออัตราการหดตัวน้อย ขนาดของผลิตภัณฑ์มีผลต่ออัตราการหดตัวสูง
- 5.1.9 อิทธิพลร่วมระหว่าง ความสูงเบดกับขนาดของผลิตภัณฑ์ และอุณหภูมิกับขนาดของผลิตภัณฑ์ มีผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์

5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งหัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

5.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หัวบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน ที่เหมาะสมที่สุดคือแบบจำลองของ Modified Page's

5.1.2 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นตาม

5.1.3 ขนาดความหนาของผลิตภัณฑ์ที่มากกว่าจะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลสูงขึ้นตาม

5.3 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทของการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชัน

5.3.1 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทของการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันสำหรับอัตราส่วนความชื้น โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำนายการอบแห้งหัวบุกคือ $\text{Log}\backslash\text{Log}\backslash\text{Purlin}$ ชั้นซ่อน 4-8-8-1

5.3.2 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทของการอบแห้งบุกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เซชันสำหรับอัตราส่วนการอบแห้ง โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำนายการอบแห้งหัวบุกคือ $\text{Log}\backslash\text{Log}\backslash\text{Purlin}$ ชั้นซ่อน 4-6-8-1

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.4.1.1 ในการศึกษาการหัตถ์ครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษการหัตถ์ด้วยการวัดด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์เพียงอย่างเดียว ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการวัดอัตราการหัตถ์เปรียบเทียบกับวิธีอื่น ที่ให้ค่าความถูกต้องและแม่นยำและใช้เวลาน้อยกว่านี้

5.4.1.2 บุกเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สำคัญกำลังได้รับความนิยมนำไปแปรรูปอย่างกว้างขวางจึงควรมีการศึกษวิธีการอบแห้งด้วยเทคนิคอื่นที่แตกต่างจากการวิจัยครั้งนี้

5.4.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาคนคว้ต่อไป

5.4.2.1 ควรมีการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

5.4.2.2 ควรมีการศึกษาการอบแห้งหัวบุกในรูปแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มทางเลือกและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ให้แก่ผู้บริโภค

บรรณานุกรม

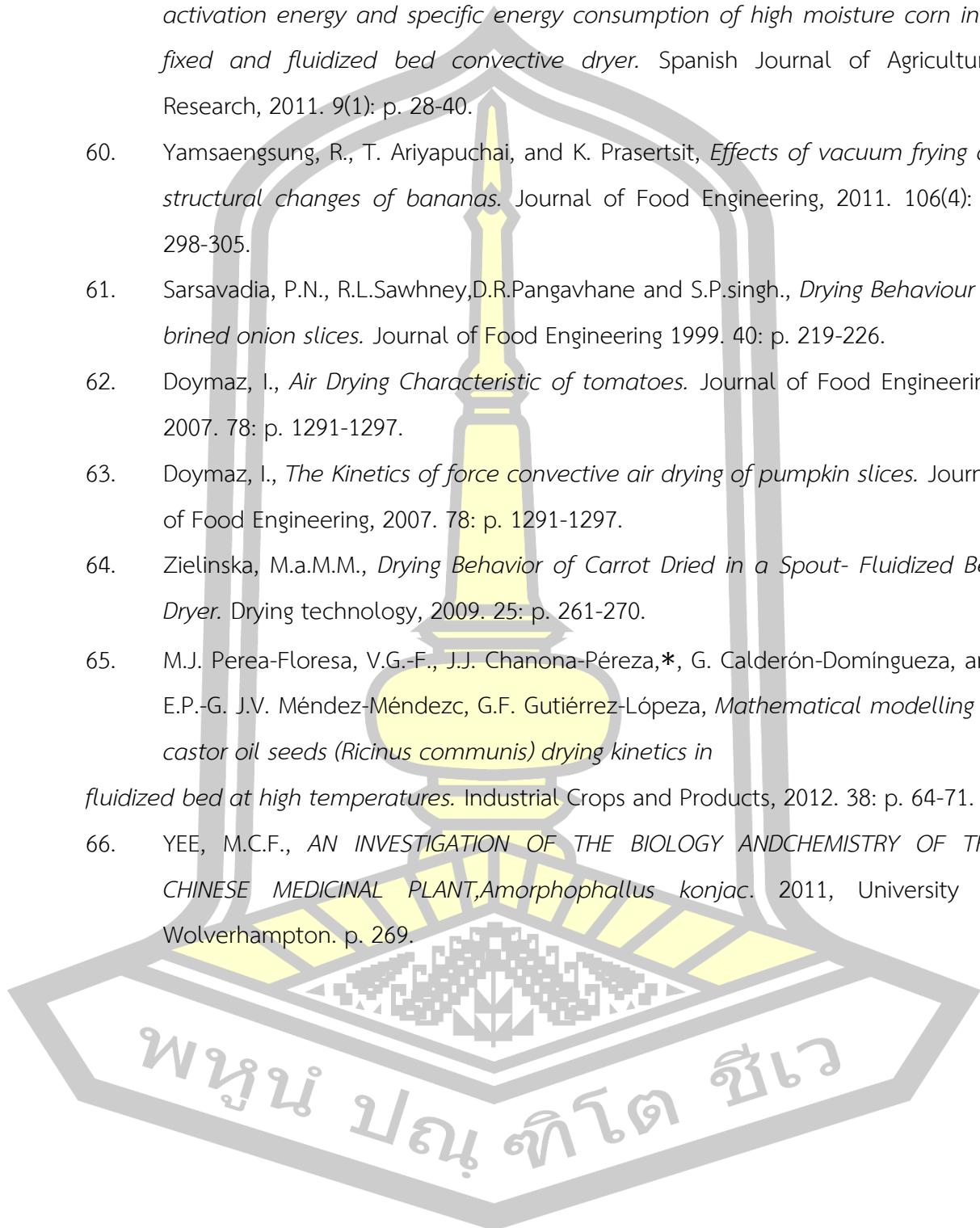
1. Ray, R.C. and S.S. Behera, *Amorphophallus: technological interventions*. Tropical Tuber Crops: Technological Interventions, John Wiley & Sons, 2016.
2. Parry, J.-M., *11 Konjac Glucomannan*. Food stabilisers, thickeners and gelling agents, 2009: p. 198.
3. Hetterscheid, W. and S. Ittenbach, *Everything you always wanted to know about Amorphophallus, but were afraid to stick your nose into*. Aroideana, 1996. 19: p. 7-131.
4. ทิพย์วัลย์ กุศลมนันท์, พันธุ์บุกในประเทศไทย. ศูนย์วิจัยข้าวเชียงใหม่สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 1 กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์เชียงใหม่. 2548.
5. Mekkerdchoo, O., et al. *Genetic variation among Amorphophallus sp. from Northern Thailand and their glucomannan content*. in *Southeast Asia Symposium on Quality Management in Postharvest Systems and Asia Pacific Symposium on Postharvest Quality 989*. 2012.
6. Harish, A., et al., *Mathematical modeling of thin layer microwave drying kinetics of elephant foot yam (Amorphophallus paeoniifolius)*. International Food Research Journal, 2014. 21(3).
7. Shah, B.R., et al., *Health benefits of konjac glucomannan with special focus on diabetes*. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2015. 5(2): p. 179-187.
8. Impaprasert, R., C. Borompichaichartkul, and G. Srzednicki, *A new drying approach to enhance quality of konjac glucomannan extracted from Amorphophallus muelleri*. Drying technology, 2014. 32(7): p. 851-860.
9. Sangeeta, H.B. and B. Hathan, *Elephant Foot Yam (Amorphophallus paeoniifolius): Osmotic Dehydration and Modelling*. J Food Process Technol, 2015. 6(499): p. 2.
10. Patel, J.H., *Hybrid Drying (Osmotic and Microwave Vacuum) of Elephant Foot Yam (Amorphophallus paeoniifolius)*. 2013, AAU, Anand.
11. Suriya, M., et al., *Influence of blanching and drying methods on molecular structure and functional properties of elephant foot yam (Amorphophallus*

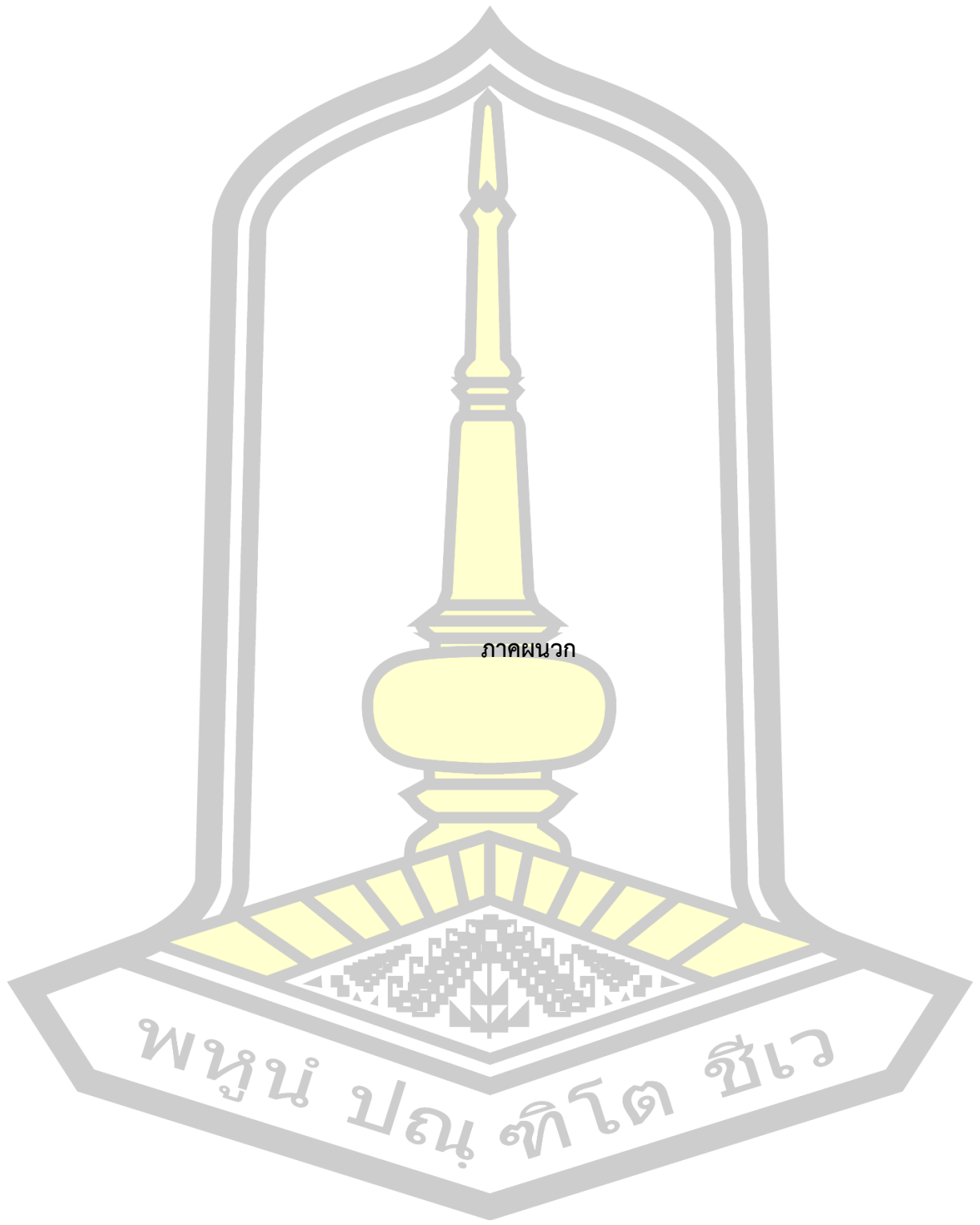
- paeoniifolius*) flour. LWT-Food Science and Technology, 2016. 68: p. 235-243.
12. Chen, Q., et al., *Drying kinetics and quality attributes of jujube (Zizyphus jujuba Miller) slices dried by hot-air and short-and medium-wave infrared radiation.* LWT-Food Science and Technology, 2015. 64(2): p. 759-766.
 13. Özahi, E. and H. Demir, *A model for the thermodynamic analysis in a batch type fluidized bed dryer.* Energy, 2013. 59: p. 617-624.
 14. Tatemoto, Y., et al., *Drying characteristics of food materials injected with organic solvents in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure.* Journal of Food Engineering, 2015. 158: p. 80-85.
 15. Darvishi, H., M.H. Khoshtaghaza, and S. Minaei, *Effects of fluidized bed drying on the quality of soybean kernels.* Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2015. 14(2): p. 134-139.
 16. Pan, C., A. Gichira, and J. Chen, *Genetic variation in wild populations of the tuber crop Amorphophallus konjac (Araceae) in central China as revealed by AFLP markers.* Genetics and Molecular Research, 2015. 14(4): p. 18753-18763.
 17. ทิพย์วัลย์ กุศลมนันท์, บุก พืชอาหารที่น่าสนใจ. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 1 กรุงเทพฯ. 2544.
 18. มงคล เกษประเสริฐและอรนุช เกษประเสริฐ, บุกพืชอุตสาหกรรมใหม่จากป่าสู่แปลงปลูก: การผลิตบุกเนื้อทรายหรือบุกเพื่อการอุตสาหกรรมที่ครบวงจร.เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ, กรุงเทพฯ กองวิชาการเกษตร, กองเกษตรและสหกรณ์. หน้า 21. 2541.
 19. มงคล เกษประเสริฐและอรนุช เกษประเสริฐ., การผลิตบุกเนื้อทรายหรือบุกเพื่อการอุตสาหกรรมที่ครบวงจร. เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการ พฤษศาสตร์และวิพืช, กรุงเทพฯ กองวิชาการเกษตร, กองเกษตรและสหกรณ์. หน้า 19. 2540.
 20. มงคล เกษประเสริฐ., บุกและการใช้ประโยชน์จากบุกในประเทศไทย. วิชาการเกษตร ,กรุงเทพฯ: กองวิชาการเกษตร, กองเกษตรและสหกรณ์. หน้า 208. 2547.
 21. Kato, K. and K. Matsuda, *Studies on the chemical structure of konjac mannan: part I. Isolation and characterization of oligosaccharides from the partial acid hydrolyzate of the mannan.* Agricultural and Biological Chemistry, 1969. 33(10): p. 1446-1453.
 22. Kato, K., T. Watanabe, and K. Matsuda, *Studies on the Chemical Structure of*

34. Janjai, S., et al., *Thin layer drying of peeled longan (Dimocarpus longan lour.)*. Food science and technology research, 2011. 17(4): p. 279-288.
35. Ademiluyi, T., E. Oboho, and M. Owudogu, *Investigation into the thin layer drying models of Nigerian popcorn varieties*. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2008. 7(13): p. 047-062.
36. Kaleta, A., et al., *Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer*. Energy Conversion and Management, 2013. 67: p. 179-185.
37. ศันสนีย์ เอื้อพันธ์วิริยะกุล., *บทนำความฉลาดเชิงคำนวณสำหรับวิศวกรรมคอมพิวเตอร์*. 2556, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
38. Mark Hudson Beale, M.T.H., Howard B. Demuth., *Neural Network Toolbox™ User's Guide*, I. The MathWorks, Editor. © COPYRIGHT 1992–2010.
39. พยุง มีสัจ., *ระบบฟuzzyและโครงข่ายประสาทเทียม*. 2555, กรุงเทพฯ: คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
40. Harish, A., et al., *Effect of Microwave Power and Sample Thickness on Microwave Drying Kinetics Elephant Foot Yam (Amorphophallus Paeoniifolius)*. American Journal of Food Science and Technology, 2014. 2(1): p. 28-35.
41. Da Silva, W.P., et al., *Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2014. 13(1): p. 67-74.
42. Tanaka, F., et al., *Mathematical modelling of thin-layer drying according to particle size distribution in crushed feed rice*. Biosystems Engineering, 2015. 136: p. 87-91.
43. Perea-Flores, M., et al., *Mathematical modelling of castor oil seeds (Ricinus communis) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures*. Industrial Crops and Products, 2012. 38: p. 64-71.
44. Tasirin, S.M., et al., *Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination*. Industrial Crops and Products, 2014. 61: p. 193-201.
45. Kamble, L., D. Pangavhane, and T. Singh, *Heat Transfer Studies using Artificial Neural Network-a Review*. International Energy Journal, 2014. 14(1).

46. Kaveh, M. and R. Amiri Chayjan, *Mathematical and neural network modelling of terebinth fruit under fluidized bed drying*. Research in Agriculture Engineering, 2015. 61(2): p. 55-65.
47. Nazghelichi, T., M.H. Kianmehr, and M. Aghbashlo, *Prediction of carrot cubes drying kinetics during fluidized bed drying by artificial neural network*. Journal of food science and technology, 2011. 48(5): p. 542-550.
48. Srivastav, S. and B. Kumbhar, *Modeling drying kinetics of paneer using Artificial Neural Networks (ANN)*. Journal of Food Research and Technology, 2014. 2(1): p. 39-45.
49. Zlatanović, I., M. Komatina, and D. Antonijević, *Low-temperature convective drying of apple cubes*. Applied Thermal Engineering, 2013. 53(1): p. 114-123.
50. !!! INVALID CITATION !!! (Bai, Sun et al. 2013, Onwude, Hashim et al. 2016, Pikal 2016, Torki-Harchegani, Ghasemi-Varnamkhasti et al. 2016).
51. Sobukola, O., et al., *Thin Layer Drying Process of Some Leafy Vegetables under Open Sun*. Food Science and Technology International, 2010. 16: p. 135-146.
52. Aregbesola, O.A., et al., *Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (Irvingia gabonensis) nuts and kernels*. Nigerian Food Journal, 2015. 33(1): p. 83-89.
53. Roberts, J.S., D.R. Kidd, and O. Padilla-Zakour, *Drying kinetics of grape seeds*. Journal of Food Engineering, 2008. 89(4): p. 460-465.
54. Demir, V., T. Gunhan, and A.K. Yagcioglu, *Mathematical modelling of convection drying of green table olives*. Biosystems Engineering, 2007. 98(1): p. 47-53.
55. Gazor, H.R. and A. Mohsenimanesh. *Modelling the drying kinetics of canola in fluidised bed dryer*. Czech Journal of Food Sciences 2010 [cited 28 6]; 531-537].
56. Perea-Flores, M.J., et al., *Mathematical modelling of castor oil seeds (Ricinus communis) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures*. Industrial Crops and Products, 2012. 38: p. 64-71.
57. Tahmasebi, A., et al., *A kinetic study of microwave and fluidized-bed drying of a Chinese lignite*. Chemical Engineering Research and Design, 2014. 92(1): p. 54-65.
58. Doymaz, İ., *Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (Diospyros kaki L.)*. Energy Conversion and Management, 2012. 56: p. 199-205.

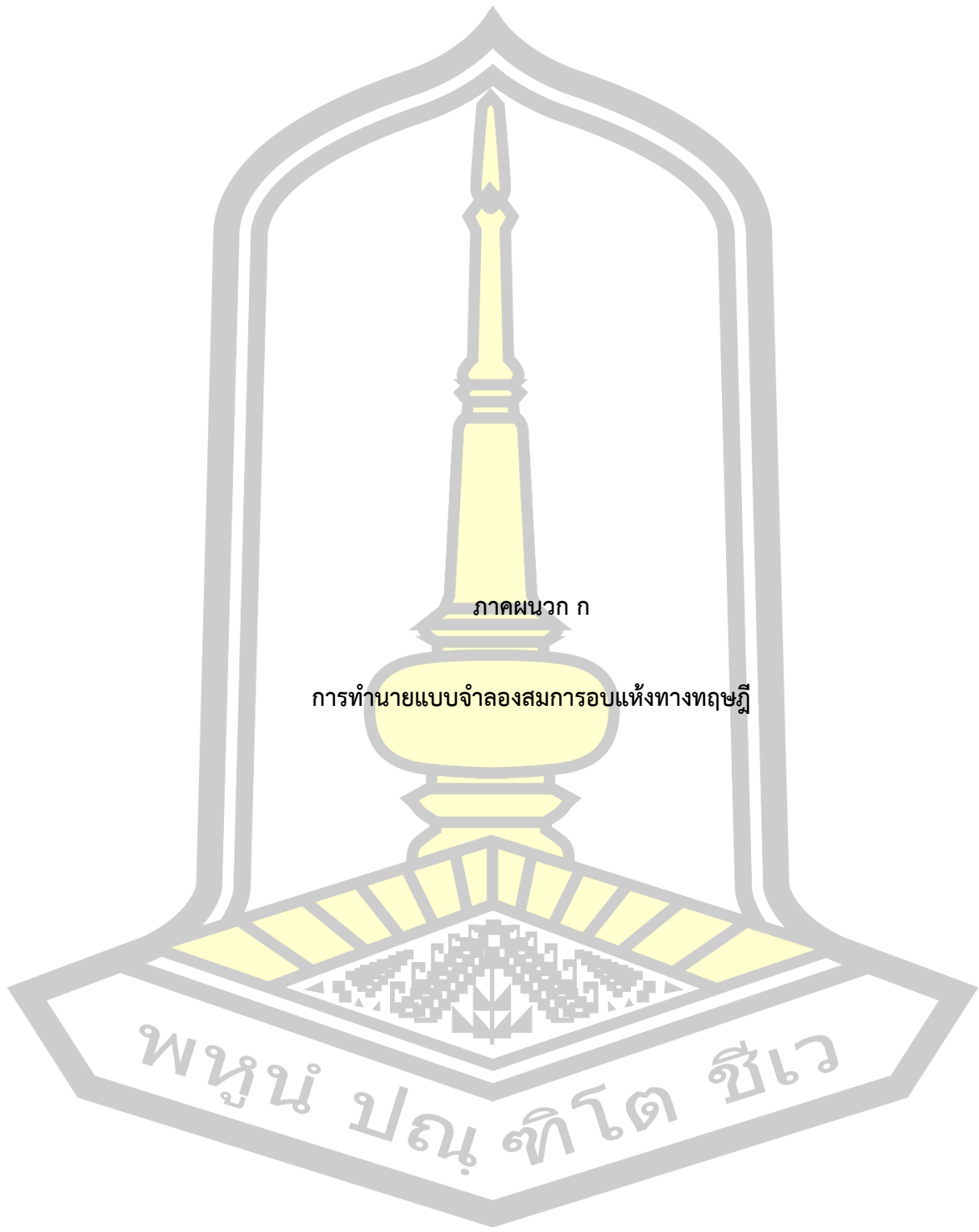
59. Chayjan, R.A., J.A. Parian, and M. Esna-Ashari, *Modeling of moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of high moisture corn in a fixed and fluidized bed convective dryer*. Spanish Journal of Agricultural Research, 2011. 9(1): p. 28-40.
60. Yamsaengsung, R., T. Ariyapuchai, and K. Prasertsit, *Effects of vacuum frying on structural changes of bananas*. Journal of Food Engineering, 2011. 106(4): p. 298-305.
61. Sarsavadia, P.N., R.L.Sawhney,D.R.Pangavhane and S.P.singh., *Drying Behaviour of brined onion slices*. Journal of Food Engineering 1999. 40: p. 219-226.
62. Doymaz, I., *Air Drying Characteristic of tomatoes*. Journal of Food Engineering, 2007. 78: p. 1291-1297.
63. Doymaz, I., *The Kinetics of force convective air drying of pumpkin slices*. Journal of Food Engineering, 2007. 78: p. 1291-1297.
64. Zielinska, M.a.M.M., *Drying Behavior of Carrot Dried in a Spout- Fluidized Bed Dryer*. Drying technology, 2009. 25: p. 261-270.
65. M.J. Perea-Flores, V.G.-F., J.J. Chanona-Pérez*, G. Calderón-Domínguez, and E.P.-G. J.V. Méndez-Méndez, G.F. Gutiérrez-López, *Mathematical modelling of castor oil seeds (Ricinus communis) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures*. Industrial Crops and Products, 2012. 38: p. 64-71.
66. YEE, M.C.F., *AN INVESTIGATION OF THE BIOLOGY ANDCHEMISTRY OF THE CHINESE MEDICINAL PLANT,Amorphophallus konjac*. 2011, University of Wolverhampton. p. 269.





ภาคผนวก

พหุ ประทีป ชัยเว



ภาคผนวก ก

การทำนายแบบจำลองสมการรอบแหงทางทฤษฎี

พหุบัน ปณุ ทิโต ชีเว

ตาราง ก 1 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบด 30 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 6 มม.

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
30	6	0	1	1	1	1	0.99999	1
30	6	5	0.65069	0.64808	0.57757	0.58805	0.51928	0.5312
30	6	10	0.50151	0.50396	0.41937	0.42251	0.34631	0.34045
30	6	15	0.40038	0.40842	0.32442	0.31868	0.23484	0.22963
30	6	20	0.33459	0.3387	0.2576	0.24709	0.16925	0.15958
30	6	25	0.28541	0.28526	0.19333	0.19519	0.1199	0.11323
30	6	30	0.24566	0.24299	0.16469	0.15636	0.08419	0.0816
30	6	35	0.21258	0.20884	0.13338	0.12663	0.0579	0.05955
30	6	40	0.18554	0.18079	0.10678	0.10347	0.03645	0.04391
30	6	45	0.16151	0.15745	0.08604	0.08518	0.02281	0.03266
30	6	50	0.14264	0.13783	0.06847	0.07058	0.01091	0.02447
30	6	55	0.12541	0.12119	0.05384	0.05881	9.92E-04	0.01846
30	6	60	0.11031	0.10698	0.04226	0.04924		
30	6	70	0.08579	0.08421	0.02393	0.03497		
30	6	80	0.06679	0.06705	0.01235	0.0252		
30	6	90	0.05182	0.0539	0.00305	0.01838		
30	6	100	0.04063	0.04368				
30	6	110	0.03283	0.03564				
30	6	120	0.02566	0.02927				
30	6	130	0.02	0.02417				
30	6	140	0.0156	0.02005				
30	6	150	0.00478	0.01672				
30	6	160	0.00101	0.01399				

ตาราง ก 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบด 30 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 10 มม.

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
30	10	0	0.99999	1	1.00001	1	1.00001	1
30	10	5	0.80054	0.80443	0.72	0.75897	0.65	0.6959
30	10	10	0.6926	0.70597	0.63	0.63845	0.57389	0.56231
30	10	15	0.61259	0.63231	0.56	0.55073	0.49049	0.47023
30	10	20	0.55967	0.57287	0.47474	0.48189	0.42847	0.40085
30	10	25	0.51239	0.52304	0.41735	0.42576	0.33535	0.34614
30	10	30	0.47432	0.48028	0.38792	0.37889	0.29994	0.30175
30	10	35	0.43593	0.44299	0.35268	0.3391	0.27	0.26503
30	10	40	0.41062	0.4101	0.30963	0.3049	0.24	0.23418
30	10	45	0.38427	0.3808	0.29528	0.27522	0.2	0.20798
30	10	50	0.35969	0.35453	0.26648	0.24926	0.18	0.1855
30	10	55	0.3395	0.33081	0.24226	0.22641	0.16	0.16608
30	10	60	0.31984	0.30931	0.21	0.20618	0.15	0.14918
30	10	70	0.28804	0.27179	0.18	0.17213	0.13	0.1214
30	10	80	0.26064	0.24023	0.15	0.14479	0.1	0.09974
30	10	90	0.2392	0.21336	0.12	0.12257	0.08	0.08261
30	10	100	0.21765	0.1903	0.09	0.10432	0.07	0.06889
30	10	110	0.19789	0.17035	0.08	0.08921	0.06	0.0578
30	10	120	0.18	0.15297	0.07	0.07661	0.05	0.04874
30	10	130	0.16	0.13777	0.06	0.06604	0.04	0.0413
30	10	140	0.14	0.12439	0.05	0.05711	0.03	0.03514
30	10	150	0.12	0.11257	0.04	0.04955	0.02	0.03001
30	10	160	0.1	0.10209	0.03	0.0431	0.01	0.02572
30	10	170	0.08	0.09277	0.02	0.0376	0	0.02211
30	10	180	0.06	0.08445	0.01	0.03287		
30	10	190	0.04	0.077	0	0.0288		
30	10	200	0.03	0.07032				
30	10	210	0.02	0.06432				
30	10	220	0.01	0.0589				
30	10	230	0.01	0.05401				

ตาราง ก 3 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบด 30 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 15 มม.

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
30	15	0	1	1	0.99999	1	0.99999	1
30	15	5	0.87291	0.90657	0.8334	0.8549	0.78798	0.80588
30	15	10	0.80055	0.84039	0.74395	0.76754	0.68104	0.70383
30	15	15	0.74462	0.78421	0.68162	0.69815	0.60787	0.6269
30	15	20	0.70063	0.7347	0.61	0.63987	0.55209	0.56464
30	15	25	0.66441	0.69025	0.57	0.58954	0.50737	0.51243
30	15	30	0.63186	0.64989	0.54	0.54531	0.47053	0.46769
30	15	35	0.6042	0.61294	0.51	0.50599	0.4382	0.42875
30	15	40	0.57	0.57893	0.48	0.47072	0.40924	0.39449
30	15	45	0.54	0.54748	0.45	0.43886	0.38386	0.36407
30	15	50	0.52	0.5183	0.42	0.40994	0.35	0.33687
30	15	55	0.5	0.49113	0.39	0.38355	0.32	0.31242
30	15	60	0.47	0.46578	0.37	0.35939	0.29	0.29033
30	15	70	0.44	0.41988	0.34	0.31674	0.26	0.25203
30	15	80	0.4	0.37946	0.3	0.28038	0.24	0.22008
30	15	90	0.38	0.34368	0.28	0.24911	0.21	0.19314
30	15	100	0.36	0.31187	0.25	0.22203	0.18	0.17022
30	15	110	0.34	0.28348	0.22	0.19845	0.16	0.15057
30	15	120	0.31	0.25806	0.2	0.17781	0.14	0.13363
30	15	130	0.28	0.23524	0.18	0.15968	0.12	0.11895
30	15	140	0.25	0.2147	0.15	0.14368	0.1	0.10615
30	15	150	0.22	0.19617	0.13	0.12952	0.09	0.09496
30	15	160	0.2	0.17943	0.11	0.11696	0.08	0.08514
30	15	170	0.18	0.16428	0.09	0.10577	0.07	0.07649
30	15	180	0.15	0.15054	0.08	0.0958	0.06	0.06884
30	15	190	0.13	0.13807	0.07	0.08688	0.05	0.06206
30	15	200	0.1	0.12673	0.06	0.07889	0.04	0.05605
30	15	210	0.09	0.11641	0.05	0.07172	0.03	0.05069

ตาราง ก 3 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบต 30 มม. ความหนาผลึกภัณฑ์ 15 มม. (ต่อ)

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
30	15	220	0.08	0.107	0.04	0.06527	0.02	0.04591
30	15	230	0.07	0.09842	0.03	0.05947	0.01	0.04163
30	15	240	0.06	0.09058	0.02	0.05423	0	0.0378
30	15	250	0.05	0.08342	0.01	0.0495		
30	15	260	0.04	0.07687	0	0.04523		
30	15	270	0.02	0.07087				
30	15	280	0.02	0.06537				
30	15	290	0.01	0.06033				
30	15	300	0.01	0.05571				
30	15	310	0	0.05146				

ตาราง ก 4 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบต 60 มม. ความหนาผลึกภัณฑ์ 6 มม.

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
60	6	0	0.99999	1	1.00001	1	1	1
60	6	10	0.6926	0.6746	0.6228	0.59658	0.49347	0.50801
60	6	20	0.55967	0.5548	0.47474	0.47348	0.34546	0.33669
60	6	30	0.47432	0.47431	0.38792	0.39527	0.24772	0.23766
60	6	40	0.41062	0.41405	0.30963	0.33887	0.18178	0.17381
60	6	50	0.35969	0.36641	0.26648	0.29554	0.13416	0.13021
60	6	60	0.31984	0.32747	0.23196	0.26094	0.09751	0.09929
60	6	70	0.28804	0.2949	0.22074	0.23256	0.07189	0.07678
60	6	80	0.26064	0.2672	0.21107	0.20881	0.05232	0.06005
60	6	90	0.2392	0.24332	0.20077	0.18864	0.04325	0.04742
60	6	100	0.21765	0.22253	0.19453	0.1713	0.03413	0.03775
60	6	110	0.19789	0.20426	0.17769	0.15624	0.02456	0.03026

ตาราง ก 4 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบต 60 มม. ความหนาผลึกภัณฑ์ 6 มม. (ต่อ)

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
60	6	120	0.18513	0.18809	0.17072	0.14305	0.01564	0.02442
60	6	130	0.17038	0.17369	0.15606	0.13141	0.01989	0.01981
60	6	140	0.15845	0.16079	0.13724	0.12109		
60	6	150	0.1481	0.1492	0.12945	0.11187		
60	6	160	0.13911	0.13872	0.11291	0.10361		
60	6	170	0.13022	0.12923	0.10751	0.09617		
60	6	180	0.12091	0.12059	0.0994	0.08944		
60	6	190	0.11746	0.11271	0.08994	0.08334		
60	6	200	0.11045	0.1055	0.07704	0.07779		
60	6	210	0.10564	0.09888	0.06789	0.07272		
60	6	220	0.10177	0.0928	0.06123	0.06809		
60	6	230	0.09716	0.0872	0.05759	0.06384		
60	6	240	0.0911	0.08202	0.05112	0.05993		
60	6	250	0.08775	0.07724	0.04113	0.05633		
60	6	260	0.08524	0.0728	0.041	0.053		
60	6	270	0.0789	0.06869	0.03489	0.04993		
60	6	280	0.07123	0.06487	0.03124	0.04708		
60	6	290	0.06458	0.06131	0.02456	0.04444		
60	6	300	0.06122	0.05799	0.02156	0.04199		
60	6	310	0.05789	0.0549				
60	6	320	0.05123	0.05201				
60	6	330	0.04798	0.0493				
60	6	340	0.04156	0.04677				
60	6	350	0.03415	0.0444				
60	6	360	0.03115	0.04217				
60	6	370	0.02146	0.04008				

ตาราง ก 5 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบด 60 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 10 มม.

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
60	10	0	1	1	0.99999	1	1.00001	1
60	10	10	0.66963	0.5995	0.62124	0.60212	0.57389	0.5547
60	10	20	0.46406	0.471	0.46614	0.46075	0.42847	0.42571
60	10	30	0.38568	0.38916	0.36771	0.37054	0.29994	0.34613
60	10	40	0.31364	0.33027	0.30052	0.30617	0.28469	0.2901
60	10	50	0.27077	0.2852	0.24958	0.25754	0.2325	0.24796
60	10	60	0.22418	0.2494	0.2082	0.21949	0.20968	0.21494
60	10	70	0.19992	0.22019	0.17919	0.18895	0.19699	0.18832
60	10	80	0.17851	0.19589	0.15475	0.16399	0.18226	0.16641
60	10	90	0.16116	0.17539	0.13587	0.14329	0.16957	0.14808
60	10	100	0.14654	0.15786	0.12041	0.12592	0.16404	0.13255
60	10	110	0.13279	0.14274	0.11303	0.1112	0.14828	0.11925
60	10	120	0.12245	0.12958	0.09643	0.09863	0.13252	0.10776
60	10	130	0.11338	0.11805	0.08762	0.08782	0.11267	0.09775
60	10	140	0.10481	0.10788	0.07966	0.07846	0.09282	0.08897
60	10	150	0.09768	0.09886	0.07217	0.07031	0.07296	0.08123
60	10	160	0.09128	0.09083	0.06753	0.06319	0.05311	0.07437
60	10	170	0.08575	0.08364	0.06278	0.05693	0.03326	0.06827
60	10	180	0.08106	0.07719	0.05786	0.05142	0.01341	0.0628
60	10	190	0.07661	0.07137	0.05483	0.04654		
60	10	200	0.07353	0.06611	0.05191	0.04221		
60	10	210	0.06965	0.06134	0.04916	0.03835		
60	10	220	0.06748	0.05701	0.04641	0.03491		
60	10	230	0.06491	0.05306	0.0443	0.03183		
60	10	240	0.06302	0.04945	0.04287	0.02907		
60	10	250	0.05971	0.04614				
60	10	260	0.05743	0.04311				
60	10	270	0.0544	0.04032				

ตาราง ก 5 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบต 60 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 10 มม. (ต่อ)

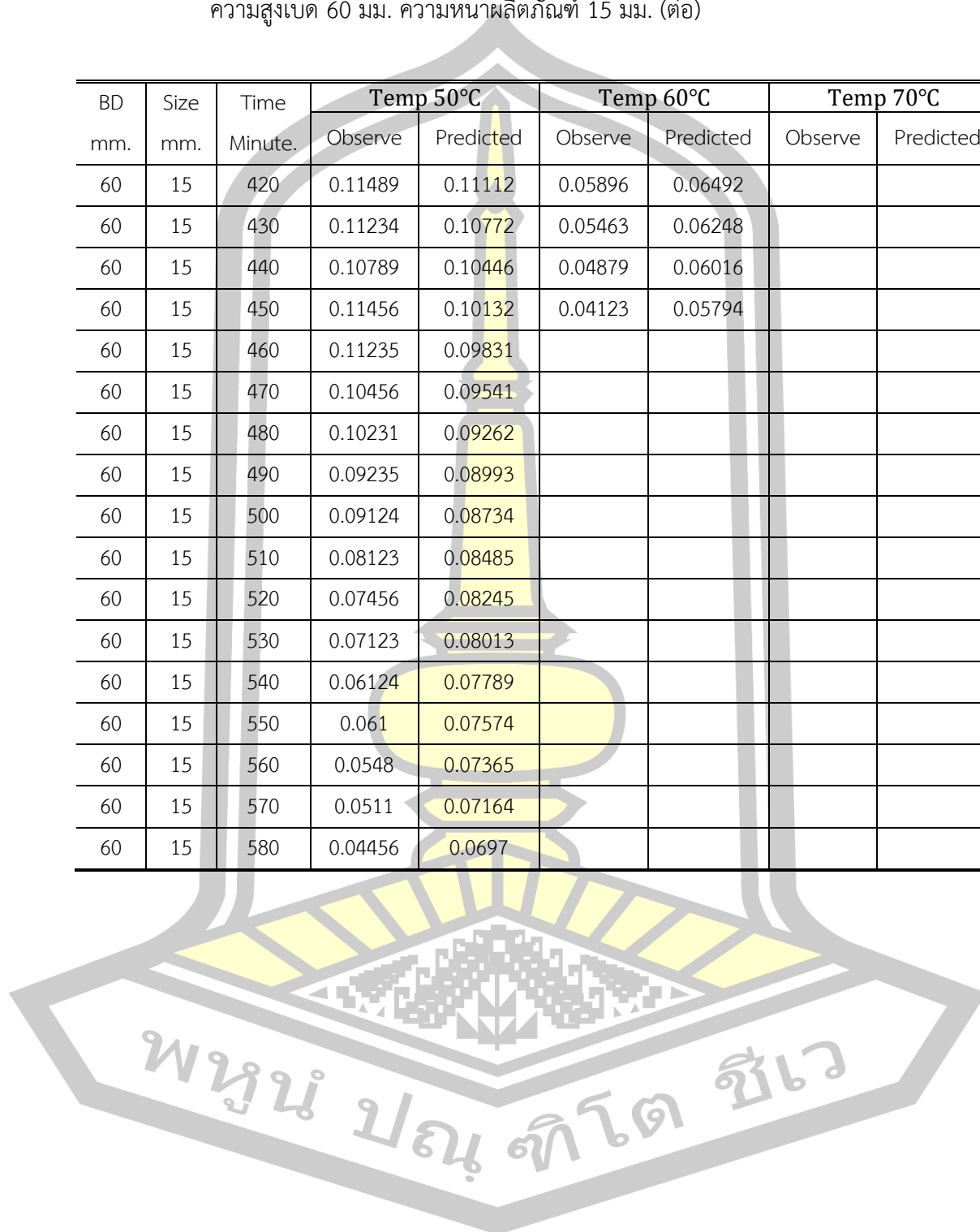
BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
60	10	280	0.05075	0.03776				
60	10	290	0.04972	0.03539				
60	10	300	0.04927	0.03321				
60	10	310	0.04824	0.03119				
60	10	320	0.04744	0.02931				
60	10	330	0.04693	0.02758				
60	10	340	0.04653	0.02597				

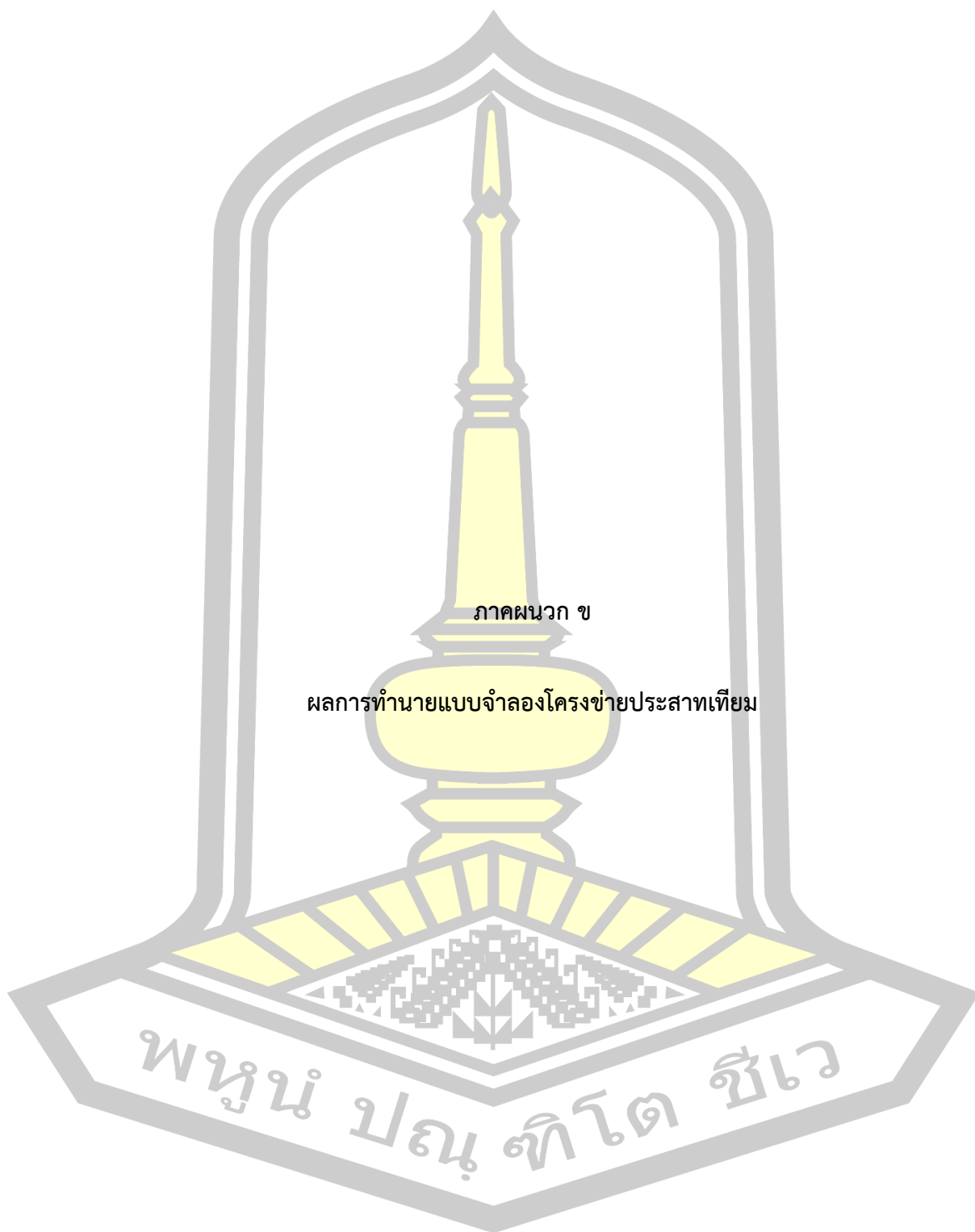
ตาราง ก 6 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบต 60 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 15 มม.

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
60	15	0	1	1	0.99999	1	0.99999	1
60	15	10	0.80055	0.78939	0.74395	0.74097	0.68104	0.68299
60	15	20	0.70063	0.69938	0.63322	0.63653	0.55209	0.55936
60	15	30	0.63186	0.63422	0.55889	0.56319	0.47053	0.47556
60	15	40	0.57902	0.58241	0.50322	0.5063	0.40924	0.41261
60	15	50	0.53642	0.53927	0.45825	0.45994	0.37035	0.36284
60	15	60	0.49851	0.50235	0.41952	0.42102	0.32276	0.32221
60	15	70	0.46805	0.47013	0.38725	0.38765	0.29032	0.2883
60	15	80	0.44029	0.44162	0.3578	0.3586	0.2628	0.25953
60	15	90	0.41501	0.41612	0.33471	0.33303	0.23946	0.23481
60	15	100	0.39261	0.39312	0.31232	0.3103	0.21859	0.21336
60	15	110	0.37231	0.37223	0.29185	0.28994	0.20006	0.19459
60	15	120	0.3531	0.35314	0.2738	0.27159	0.18052	0.17804
60	15	130	0.33529	0.33562	0.25726	0.25496	0.16609	0.16337

ตาราง ก 6 ค่าผลการทำนายแบบจำลองสมการรอบแห้งทางทฤษฎี แบบจำลอง Modified Page
ความสูงเบด 60 มม. ความหนาผลิตภัณฑ์ 15 มม. (ต่อ)

BD mm.	Size mm.	Time Minute.	Temp 50°C		Temp 60°C		Temp 70°C	
			Observe	Predicted	Observe	Predicted	Observe	Predicted
60	15	420	0.11489	0.11112	0.05896	0.06492		
60	15	430	0.11234	0.10772	0.05463	0.06248		
60	15	440	0.10789	0.10446	0.04879	0.06016		
60	15	450	0.11456	0.10132	0.04123	0.05794		
60	15	460	0.11235	0.09831				
60	15	470	0.10456	0.09541				
60	15	480	0.10231	0.09262				
60	15	490	0.09235	0.08993				
60	15	500	0.09124	0.08734				
60	15	510	0.08123	0.08485				
60	15	520	0.07456	0.08245				
60	15	530	0.07123	0.08013				
60	15	540	0.06124	0.07789				
60	15	550	0.061	0.07574				
60	15	560	0.0548	0.07365				
60	15	570	0.0511	0.07164				
60	15	580	0.04456	0.0697				





ภาคผนวก ข

ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

พหุบัณฑิตวิทยาลัย

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก

Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	6	0	1.000004	1.013966
50	30	6	5	0.6507	0.654905
50	30	6	10	0.501511	0.488093
50	30	6	15	0.400379	0.39678
50	30	6	20	0.334593	0.33496
50	30	6	25	0.28541	0.286934
50	30	6	30	0.245661	0.247617
50	30	6	35	0.212579	0.215067
50	30	6	40	0.185535	0.188108
50	30	6	45	0.16151	0.165741
50	30	6	50	0.142642	0.147065
50	30	6	55	0.125409	0.13131
50	30	6	60	0.110315	0.117839
50	30	6	70	0.085787	0.095841
50	30	6	80	0.066793	0.078249
50	30	6	90	0.051824	0.063385
50	30	6	100	0.040629	0.050245
50	30	6	110	0.03283	0.038204
50	30	6	120	0.02566	0.02686
50	30	6	130	0.02	0.015952
50	30	6	140	0.015598	0.005311
50	30	6	150	0.00478	-0.00516
50	30	6	160	0.001006	-0.01548
60	30	6	0	0.999996	0.989504
60	30	6	5	0.577572	0.557602

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	6	10	0.41937	0.369255
60	30	6	15	0.324423	0.273901
60	30	6	20	0.257604	0.212411
60	30	6	25	0.193333	0.165662
60	30	6	30	0.164693	0.128163
60	30	6	35	0.133384	0.098126
60	30	6	40	0.106783	0.074424
60	30	6	45	0.086038	0.055962
60	30	6	50	0.068474	0.041681
60	30	6	55	0.053837	0.030643
60	30	6	60	0.042255	0.022079
60	30	6	70	0.023928	0.010088
60	30	6	80	0.012346	0.002406
60	30	6	90	0.003055	-0.00282
60	30	6	0	0.999993	0.989504
60	30	6	5	0.519277	0.557602
60	30	6	10	0.346309	0.369255
60	30	6	15	0.23484	0.273901
60	30	6	20	0.169249	0.212411
60	30	6	25	0.1199	0.165662
60	30	6	30	0.08419	0.128163
60	30	6	35	0.057904	0.098126
60	30	6	40	0.036454	0.074424
60	30	6	45	0.022814	0.055962
60	30	6	50	0.010911	0.041681

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	6	55	0.000992	0.030643
50	30	10	0	0.999992	0.998906
50	30	10	5	0.800538	0.793696
50	30	10	10	0.6926	0.688862
50	30	10	15	0.612588	0.621178
50	30	10	20	0.559665	0.568132
50	30	10	25	0.51239	0.522586
50	30	10	30	0.474319	0.482442
50	30	10	35	0.435934	0.446945
50	30	10	40	0.410623	0.415558
50	30	10	45	0.384266	0.38773
50	30	10	50	0.359688	0.362905
50	30	10	55	0.339502	0.34057
50	30	10	60	0.319839	0.320282
50	30	10	70	0.288043	0.284469
50	30	10	80	0.26064	0.25339
50	30	10	90	0.239199	0.225802
50	30	10	100	0.217653	0.200971
50	30	10	110	0.197886	0.178437
50	30	10	120	0.18	0.157879
50	30	10	130	0.16	0.139044
50	30	10	140	0.14	0.121706
50	30	10	150	0.12	0.105657
50	30	10	160	0.1	0.0907
50	30	10	170	0.08	0.076655

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	10	180	0.06	0.063365
50	30	10	190	0.04	0.050698
50	30	10	200	0.03	0.038552
50	30	10	210	0.02	0.026862
50	30	10	220	0.01	0.0156
60	30	10	0	1.000015	0.986121
60	30	10	5	0.72	0.729187
60	30	10	10	0.63	0.605771
60	30	10	15	0.56	0.529307
60	30	10	20	0.474742	0.470133
60	30	10	25	0.417349	0.419745
60	30	10	30	0.387924	0.376064
60	30	10	35	0.352677	0.33839
60	30	10	40	0.309632	0.306058
60	30	10	45	0.295284	0.278283
60	30	10	50	0.266483	0.254257
60	30	10	55	0.242258	0.233251
60	30	10	60	0.21	0.214652
60	30	10	70	0.18	0.182837
60	30	10	80	0.15	0.156129
60	30	10	90	0.12	0.133025
60	30	10	100	0.09	0.11271
60	30	10	110	0.08	0.094743
60	30	10	120	0.07	0.078863
60	30	10	130	0.06	0.064886

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	10	140	0.05	0.052642
60	30	10	150	0.04	0.041948
60	30	10	160	0.03	0.032596
60	30	10	170	0.02	0.024363
60	30	10	180	0.01	0.01702
60	30	10	190	0	0.010353
70	30	10	0	1.000013	1.027395
70	30	10	5	0.65	0.714649
70	30	10	10	0.573892	0.571478
70	30	10	15	0.490489	0.484946
70	30	10	20	0.428475	0.417319
70	30	10	25	0.33535	0.359067
70	30	10	30	0.299943	0.308822
70	30	10	35	0.27	0.266475
70	30	10	40	0.24	0.231483
70	30	10	45	0.2	0.202849
70	30	10	50	0.18	0.179429
70	30	10	55	0.16	0.160145
70	30	10	60	0.15	0.144083
70	30	10	70	0.13	0.118864
70	30	10	80	0.1	0.099724
70	30	10	90	0.08	0.08434
70	30	10	100	0.07	0.071386
70	30	10	110	0.06	0.060082
70	30	10	120	0.05	0.049951

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	30	10	130	0.04	0.040683
70	30	10	140	0.03	0.032069
70	30	10	150	0.02	0.023967
70	30	10	160	0.01	0.016277
70	30	10	170	0	0.008932
50	30	15	0	0.999997	0.990071
50	30	15	5	0.872907	0.863519
50	30	15	10	0.800555	0.790502
50	30	15	15	0.744623	0.738262
50	30	15	20	0.700635	0.695255
50	30	15	25	0.664409	0.657674
50	30	15	30	0.631865	0.62423
50	30	15	35	0.604198	0.594316
50	30	15	40	0.57	0.567446
50	30	15	45	0.54	0.543143
50	30	15	50	0.52	0.520947
50	30	15	55	0.5	0.500442
50	30	15	60	0.47	0.48127
50	30	15	70	0.44	0.445815
50	30	15	80	0.4	0.412926
50	30	15	90	0.38	0.38168
50	30	15	100	0.36	0.351647
50	30	15	110	0.34	0.322699
50	30	15	120	0.31	0.294876
50	30	15	130	0.28	0.268296

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	15	140	0.25	0.243093
50	30	15	150	0.22	0.219381
50	30	15	160	0.2	0.197228
50	30	15	170	0.18	0.176652
50	30	15	180	0.15	0.157616
50	30	15	190	0.13	0.140036
50	30	15	200	0.1	0.123792
50	30	15	210	0.09	0.108739
50	30	15	220	0.08	0.09472
50	30	15	230	0.07	0.081574
50	30	15	240	0.06	0.06915
50	30	15	250	0.05	0.057311
50	30	15	260	0.04	0.045942
50	30	15	270	0.02	0.034953
50	30	15	280	0.02	0.024289
50	30	15	290	0.01	0.013926
50	30	15	300	0.01	0.003875
50	30	15	310	0	-0.00582
60	30	15	0	0.999995	1.001019
60	30	15	5	0.833396	0.836153
60	30	15	10	0.743945	0.745316
60	30	15	15	0.681622	0.681372
60	30	15	20	0.61	0.628602
60	30	15	25	0.57	0.582446
60	30	15	30	0.54	0.54167

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	15	35	0.51	0.505724
60	30	15	40	0.48	0.474055
60	30	15	45	0.45	0.446035
60	30	15	50	0.42	0.42103
60	30	15	55	0.39	0.398463
60	30	15	60	0.37	0.377841
60	30	15	70	0.34	0.340914
60	30	15	80	0.3	0.307993
60	30	15	90	0.28	0.277779
60	30	15	100	0.25	0.249573
60	30	15	110	0.22	0.22302
60	30	15	120	0.2	0.197959
60	30	15	130	0.18	0.174328
60	30	15	140	0.15	0.152118
60	30	15	150	0.13	0.13135
60	30	15	160	0.11	0.112056
60	30	15	170	0.09	0.094272
60	30	15	180	0.08	0.078033
60	30	15	190	0.07	0.063355
60	30	15	200	0.06	0.050228
60	30	15	210	0.05	0.038603
60	30	15	220	0.04	0.028384
60	30	15	230	0.03	0.019431
60	30	15	240	0.02	0.011568
60	30	15	250	0.01	0.004597

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	15	260	0	-0.00168
70	30	15	0	0.999994	0.986021
70	30	15	5	0.787976	0.789322
70	30	15	10	0.681036	0.690196
70	30	15	15	0.607867	0.623497
70	30	15	20	0.552095	0.568141
70	30	15	25	0.507375	0.518758
70	30	15	30	0.470534	0.474533
70	30	15	35	0.438196	0.435412
70	30	15	40	0.409236	0.401125
70	30	15	45	0.383857	0.371146
70	30	15	50	0.35	0.344829
70	30	15	55	0.32	0.321542
70	30	15	60	0.29	0.300722
70	30	15	70	0.26	0.264727
70	30	15	80	0.24	0.234184
70	30	15	90	0.21	0.207515
70	30	15	100	0.18	0.183799
70	30	15	110	0.16	0.162483
70	30	15	120	0.14	0.143207
70	30	15	130	0.12	0.125704
70	30	15	140	0.1	0.109752
70	30	15	150	0.09	0.09516
70	30	15	160	0.08	0.08175
70	30	15	170	0.07	0.069366

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	30	15	180	0.06	0.057868
70	30	15	190	0.05	0.047137
70	30	15	200	0.04	0.037074
70	30	15	210	0.03	0.027595
70	30	15	220	0.02	0.018638
70	30	15	230	0.01	0.010151
70	30	15	240	0	0.002096
50	60	6	0	0.999992	1.004685
50	60	6	10	0.6926	0.680954
50	60	6	20	0.559665	0.556184
50	60	6	30	0.474319	0.47946
50	60	6	40	0.410623	0.416349
50	60	6	50	0.359688	0.361364
50	60	6	60	0.319839	0.315418
50	60	6	70	0.288043	0.27938
50	60	6	80	0.26064	0.252457
50	60	6	90	0.239199	0.232501
50	60	6	100	0.217653	0.216962
50	60	6	110	0.197886	0.203705
50	60	6	120	0.185126	0.191379
50	60	6	130	0.170378	0.179382
50	60	6	140	0.158455	0.167629
50	60	6	150	0.148101	0.156285
50	60	6	160	0.139106	0.145577
50	60	6	170	0.130215	0.135681

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	6	180	0.120907	0.126693
50	60	6	190	0.117455	0.118625
50	60	6	200	0.110448	0.111425
50	60	6	210	0.105637	0.105
50	60	6	220	0.101767	0.099235
50	60	6	230	0.097165	0.094004
50	60	6	240	0.091099	0.089182
50	60	6	250	0.087752	0.084651
50	60	6	260	0.085241	0.080297
50	60	6	270	0.0789	0.076018
50	60	6	280	0.07123	0.071721
50	60	6	290	0.06458	0.067321
50	60	6	300	0.06122	0.062742
50	60	6	310	0.05789	0.057917
50	60	6	320	0.05123	0.052787
50	60	6	330	0.04798	0.0473
50	60	6	340	0.04156	0.041412
50	60	6	350	0.03415	0.035088
50	60	6	360	0.03115	0.028303
50	60	6	370	0.021456	0.02104
60	60	6	0	1.000015	1.003916
60	60	6	10	0.6228	0.609023
60	60	6	20	0.474742	0.458694
60	60	6	30	0.387924	0.378058
60	60	6	40	0.309632	0.321854

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	6	50	0.266483	0.27862
60	60	6	60	0.231964	0.245696
60	60	6	70	0.220735	0.221844
60	60	6	80	0.211066	0.205181
60	60	6	90	0.200772	0.193163
60	60	6	100	0.194534	0.183268
60	60	6	110	0.17769	0.173624
60	60	6	120	0.170724	0.163258
60	60	6	130	0.156064	0.151974
60	60	6	140	0.137245	0.140059
60	60	6	150	0.129447	0.127985
60	60	6	160	0.112915	0.1162
60	60	6	170	0.107508	0.105032
60	60	6	180	0.099398	0.094664
60	60	6	190	0.089937	0.08516
60	60	6	200	0.077044	0.076498
60	60	6	210	0.06789	0.068603
60	60	6	220	0.06123	0.06138
60	60	6	230	0.05759	0.054728
60	60	6	240	0.05112	0.048556
60	60	6	250	0.04113	0.042792
60	60	6	260	0.041	0.03738
60	60	6	270	0.03489	0.03229
60	60	6	280	0.03124	0.027512
60	60	6	290	0.02456	0.023048

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	6	300	0.02156	0.018916
70	60	6	0	1.000002	1.002215
70	60	6	10	0.493468	0.538036
70	60	6	20	0.345456	0.350076
70	60	6	30	0.247724	0.247574
70	60	6	40	0.181777	0.179739
70	60	6	50	0.134156	0.130893
70	60	6	60	0.097506	0.095246
70	60	6	70	0.071885	0.069674
70	60	6	80	0.052316	0.051689
70	60	6	90	0.043251	0.039115
70	60	6	100	0.034125	0.030218
70	60	6	110	0.024561	0.023803
70	60	6	120	0.01564	0.019162
70	60	6	130	0.019887	0.015919
50	60	10	0	0.999999	1.012377
50	60	10	10	0.669635	0.65151
50	60	10	20	0.464063	0.478195
50	60	10	30	0.385682	0.376481
50	60	10	40	0.313638	0.31059
50	60	10	50	0.270765	0.265483
50	60	10	60	0.224182	0.232986
50	60	10	70	0.19992	0.208085
50	60	10	80	0.178512	0.187711
50	60	10	90	0.161158	0.170119

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	10	100	0.164042	0.154429
50	60	10	110	0.148283	0.140269
50	60	10	120	0.132523	0.127518
50	60	10	130	0.11267	0.116142
50	60	10	140	0.104812	0.106111
50	60	10	150	0.097676	0.09737
50	60	10	160	0.091283	0.089834
50	60	10	170	0.085745	0.083393
50	60	10	180	0.081064	0.077928
50	60	10	190	0.076611	0.073314
50	60	10	200	0.073529	0.069434
50	60	10	210	0.069647	0.066176
50	60	10	220	0.067477	0.063437
50	60	10	230	0.064908	0.061127
50	60	10	240	0.063024	0.059161
50	60	10	250	0.059713	0.057463
50	60	10	260	0.05743	0.055966
50	60	10	270	0.054404	0.054604
50	60	10	280	0.050751	0.05332
50	60	10	290	0.049723	0.052057
50	60	10	300	0.049266	0.050763
50	60	10	310	0.048239	0.049388
50	60	10	320	0.04744	0.047883
50	60	10	330	0.046926	0.046201
50	60	10	340	0.046526	0.044296

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	10	350	0.04564	0.042124
50	60	10	360	0.04123	0.039642
50	60	10	370	0.03789	0.036808
50	60	10	380	0.03156	0.033583
50	60	10	390	0.02456	0.02993
50	60	10	400	0.02123	0.025817
50	60	10	410	0.01789	0.021216
50	60	10	420	0.01456	0.016107
60	60	10	0	0.999988	0.999494
60	60	10	10	0.621237	0.630149
60	60	10	20	0.466142	0.460197
60	60	10	30	0.367706	0.361548
60	60	10	40	0.300517	0.298128
60	60	10	50	0.249582	0.254954
60	60	10	60	0.209683	0.223783
60	60	10	70	0.196994	0.199553
60	60	10	80	0.182258	0.179225
60	60	10	90	0.169568	0.161167
60	60	10	100	0.146543	0.144664
60	60	10	110	0.132785	0.129509
60	60	10	120	0.122452	0.115714
60	60	10	130	0.113375	0.103336
60	60	10	140	0.092817	0.092391
60	60	10	150	0.072965	0.08283
60	60	10	160	0.067532	0.074552

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	10	170	0.062782	0.067416
60	60	10	180	0.05786	0.061262
60	60	10	190	0.054827	0.055923
60	60	10	200	0.051908	0.05124
60	60	10	210	0.049161	0.04706
60	60	10	220	0.046414	0.043245
60	60	10	230	0.044296	0.039671
60	60	10	240	0.042866	0.036232
60	60	10	250	0.03456	0.032837
60	60	10	260	0.03123	0.029411
60	60	10	270	0.0289	0.0259
60	60	10	280	0.021135	0.022267
60	60	10	290	0.01456	0.018497
70	60	10	0	1.000013	0.996349
70	60	10	10	0.573892	0.584802
70	60	10	20	0.428475	0.410095
70	60	10	30	0.299943	0.316498
70	60	10	40	0.284695	0.261181
70	60	10	50	0.232504	0.226156
70	60	10	60	0.208204	0.201595
70	60	10	70	0.179189	0.181728
70	60	10	80	0.154751	0.163424
70	60	10	90	0.135865	0.145372
70	60	10	100	0.120413	0.127379
70	60	10	110	0.11303	0.109792

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	60	10	120	0.096433	0.093103
70	60	10	130	0.08762	0.077728
70	60	10	140	0.079665	0.063936
70	60	10	150	0.072168	0.05185
70	60	10	160	0.053112	0.041493
70	60	10	170	0.033259	0.03283
70	60	10	180	0.013406	0.025796
50	60	15	0	0.999997	0.998223
50	60	15	10	0.800555	0.792996
50	60	15	20	0.700635	0.692294
50	60	15	30	0.631865	0.625893
50	60	15	40	0.579019	0.575676
50	60	15	50	0.536423	0.534665
50	60	15	60	0.498505	0.499449
50	60	15	70	0.468052	0.468271
50	60	15	80	0.440285	0.440236
50	60	15	90	0.415007	0.414867
50	60	15	100	0.392614	0.391868
50	60	15	110	0.372312	0.371
50	60	15	120	0.353104	0.352039
50	60	15	130	0.335289	0.334759
50	60	15	140	0.319366	0.318935
50	60	15	150	0.303343	0.304356
50	60	15	160	0.288514	0.29083
50	60	15	170	0.276273	0.278189

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	15	180	0.264131	0.266294
50	60	15	190	0.253084	0.255035
50	60	15	200	0.241938	0.24433
50	60	15	210	0.232284	0.234122
50	60	15	220	0.223228	0.22438
50	60	15	230	0.214669	0.215086
50	60	15	240	0.206807	0.20624
50	60	15	250	0.198944	0.197852
50	60	15	260	0.191878	0.189936
50	60	15	270	0.184812	0.182507
50	60	15	280	0.178542	0.175578
50	60	15	290	0.172173	0.169157
50	60	15	300	0.167396	0.163242
50	60	15	310	0.161524	0.157824
50	60	15	320	0.156449	0.152881
50	60	15	330	0.15	0.148384
50	60	15	340	0.15	0.144292
50	60	15	350	0.15	0.140559
50	60	15	360	0.14	0.137132
50	60	15	370	0.134566	0.133953
50	60	15	380	0.132346	0.130961
50	60	15	390	0.13134	0.128096
50	60	15	400	0.12456	0.125297
50	60	15	410	0.121213	0.122504
50	60	15	420	0.11489	0.119658

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	15	430	0.11234	0.116702
50	60	15	440	0.10789	0.113583
50	60	15	450	0.11456	0.11025
50	60	15	460	0.11235	0.106655
50	60	15	470	0.10456	0.102753
50	60	15	480	0.102313	0.098504
50	60	15	490	0.09235	0.093875
50	60	15	500	0.09124	0.088839
50	60	15	510	0.08123	0.083381
50	60	15	520	0.07456	0.077498
50	60	15	530	0.07123	0.071205
50	60	15	540	0.06124	0.064537
50	60	15	550	0.061	0.057555
50	60	15	560	0.0548	0.050345
50	60	15	570	0.0511	0.04302
50	60	15	580	0.04456	0.035715
60	60	15	0	0.999995	1.002092
60	60	15	10	0.743945	0.75731
60	60	15	20	0.633216	0.639406
60	60	15	30	0.558892	0.562376
60	60	15	40	0.503224	0.505251
60	60	15	50	0.458247	0.459668
60	60	15	60	0.419522	0.421321
60	60	15	70	0.387251	0.387933
60	60	15	80	0.357804	0.358329

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	15	90	0.33471	0.331892
60	60	15	100	0.312322	0.308249
60	60	15	110	0.29185	0.28712
60	60	15	120	0.273798	0.268248
60	60	15	130	0.25726	0.251383
60	60	15	140	0.24183	0.236283
60	60	15	150	0.227611	0.222718
60	60	15	160	0.215207	0.210482
60	60	15	170	0.203004	0.199395
60	60	15	180	0.192415	0.189302
60	60	15	190	0.181413	0.180076
60	60	15	200	0.17275	0.171609
60	60	15	210	0.164582	0.163816
60	60	15	220	0.155808	0.156623
60	60	15	230	0.147639	0.149967
60	60	15	240	0.141185	0.143791
60	60	15	250	0.135538	0.138041
60	60	15	260	0.127672	0.132662
60	60	15	270	0.122024	0.127596
60	60	15	280	0.11668	0.122785
60	60	15	290	0.108309	0.118167
60	60	15	300	0.103771	0.113677
60	60	15	310	0.099939	0.109253
60	60	15	320	0.099939	0.104832
60	60	15	330	0.095603	0.100358

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	15	340	0.091972	0.095783
60	60	15	350	0.088947	0.091068
60	60	15	360	0.085518	0.086192
60	60	15	370	0.08456	0.081149
60	60	15	380	0.08123	0.075959
60	60	15	390	0.07423	0.070664
60	60	15	400	0.07123	0.065334
60	60	15	410	0.06123	0.060065
60	60	15	420	0.05896	0.054972
60	60	15	430	0.05463	0.050179
60	60	15	440	0.04879	0.045802
60	60	15	450	0.04123	0.041927
70	60	15	0	0.999994	0.986554
70	60	15	10	0.681036	0.691494
70	60	15	20	0.552095	0.554582
70	60	15	30	0.470534	0.469086
70	60	15	40	0.409236	0.409
70	60	15	50	0.370349	0.363241
70	60	15	60	0.322763	0.325981
70	60	15	70	0.290323	0.294188
70	60	15	80	0.262795	0.266351
70	60	15	90	0.239463	0.241713
70	60	15	100	0.218587	0.219845
70	60	15	110	0.200064	0.200436
70	60	15	120	0.180518	0.183206

ตาราง ข 1 ผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราส่วนความชื้นการอบหัวบุก
Transfer Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-10-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	60	15	130	0.166089	0.167878
70	60	15	140	0.152581	0.154184
70	60	15	150	0.140096	0.141866
70	60	15	160	0.130477	0.130691
70	60	15	170	0.121983	0.120455
70	60	15	180	0.113796	0.110987
70	60	15	190	0.097218	0.102152
70	60	15	200	0.090464	0.093853
70	60	15	210	0.084324	0.086029
70	60	15	220	0.07757	0.078655
70	60	15	230	0.072862	0.07174
70	60	15	240	0.07	0.065327
70	60	15	250	0.063754	0.059488
70	60	15	260	0.059763	0.054313
70	60	15	270	0.055465	0.049897
70	60	15	280	0.052498	0.046327
70	60	15	290	0.050349	0.043652
70	60	15	300	0.046972	0.041869
70	60	15	310	0.044413	0.040902
70	60	15	320	0.040831	0.040596
70	60	15	330	0.039092	0.040736
70	60	15	340	0.039092	0.041062
70	60	15	350	0.037454	0.041308
70	60	15	360	0.03551	0.041237

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้งทุก Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	6	5	1.849822	1.859192
50	30	6	10	0.790021	0.788678
50	30	6	15	0.535562	0.517397
50	30	6	20	0.348382	0.365754
50	30	6	25	0.260454	0.264366
50	30	6	30	0.210495	0.197902
50	30	6	35	0.17519	0.154656
50	30	6	40	0.143216	0.125988
50	30	6	45	0.127229	0.106296
50	30	6	50	0.099918	0.092146
50	30	6	55	0.091259	0.081474
50	30	6	60	0.079935	0.073041
50	30	6	70	0.064947	0.060201
50	30	6	80	0.050292	0.050503
50	30	6	90	0.039634	0.042722
50	30	6	100	0.029642	0.03631
50	30	6	110	0.02065	0.030971
50	30	6	120	0.018984	0.026508
50	30	6	130	0.014988	0.022771
50	30	6	140	0.011657	0.019637
50	30	6	150	0.028643	0.017006
50	30	6	160	0.009992	0.014794
60	30	6	5	2.224944	2.223556
60	30	6	10	0.833265	0.847094
60	30	6	15	0.500093	0.534354

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบหุ้มทุก Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	6	20	0.351942	0.378579
60	30	6	25	0.338535	0.278726
60	30	6	30	0.150832	0.212043
60	30	6	35	0.16491	0.166291
60	30	6	40	0.140106	0.134078
60	30	6	45	0.10927	0.110831
60	30	6	50	0.09251	0.093631
60	30	6	55	0.077092	0.080574
60	30	6	60	0.061003	0.070396
60	30	6	70	0.048266	0.055589
60	30	6	80	0.030502	0.045266
60	30	6	90	0.024468	0.037586
70	30	6	5	2.5458	2.546203
70	30	6	10	0.916015	0.913561
70	30	6	15	0.590321	0.563921
70	30	6	20	0.347363	0.382505
70	30	6	25	0.261343	0.262524
70	30	6	30	0.189113	0.184864
70	30	6	35	0.139208	0.134013
70	30	6	40	0.113599	0.099992
70	30	6	45	0.072231	0.076848
70	30	6	50	0.063038	0.060877
70	30	6	55	0.052531	0.049673
50	30	10	5	0.86362	0.871663
50	30	10	10	0.46736	0.448632

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	10	15	0.346444	0.329123
50	30	10	20	0.229151	0.261487
50	30	10	25	0.204697	0.211692
50	30	10	30	0.164844	0.174392
50	30	10	35	0.166203	0.146845
50	30	10	40	0.109594	0.126448
50	30	10	45	0.114123	0.111018
50	30	10	50	0.106424	0.098936
50	30	10	55	0.087404	0.089104
50	30	10	60	0.085139	0.08081
50	30	10	70	0.068836	0.067237
50	30	10	80	0.059326	0.056344
50	30	10	90	0.046419	0.047379
50	30	10	100	0.046645	0.039966
50	30	10	110	0.042796	0.033853
50	30	10	120	0.027625	0.028833
50	30	10	130	0.031927	0.024729
50	30	10	140	0.025814	0.02139
50	30	10	150	0.022417	0.018692
50	30	10	160	0.019473	0.016533
50	30	10	170	0.019247	0.014837
50	30	10	180	0.020153	0.013551
50	30	10	190	0.007472	0.012652
50	30	10	200	0.015171	0.012145
50	30	10	210	0.010416	0.012071

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	10	220	0.008378	0.012513
50	30	10	230	0.009963	0.013582
50	30	10	240	0.013133	0.015371
50	30	10	250	0.007246	0.017817
50	30	10	260	0.005434	0.020414
60	30	10	5	1.200483	1.196418
60	30	10	10	0.568547	0.522743
60	30	10	15	0.472977	0.388169
60	30	10	20	0.221373	0.312547
60	30	10	25	0.269158	0.246957
60	30	10	30	0.137992	0.19374
60	30	10	35	0.165298	0.154062
60	30	10	40	0.201868	0.125682
60	30	10	45	0.067289	0.105531
60	30	10	50	0.135067	0.090971
60	30	10	55	0.113612	0.080079
60	30	10	60	0.048273	0.071565
60	30	10	70	0.026331	0.058705
60	30	10	80	0.022674	0.048951
60	30	10	90	0.024136	0.041046
60	30	10	100	0.014628	0.034516
60	30	10	110	0.039496	0.029144
60	30	10	120	0.016335	0.024807
60	30	10	130	0.034376	0.021434
60	30	10	140	0.044128	0.018998

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	10	150	0.018285	0.017527
60	30	10	160	0.038765	0.017108
60	30	10	170	0.012678	0.017863
60	30	10	180	0.019017	0.019866
60	30	10	190	0.022186	0.022927
60	30	10	200	0.030231	0.026162
60	30	10	210	0.063876	0.027561
70	30	10	5	1.611357	1.611394
70	30	10	10	0.573498	0.57813
70	30	10	15	0.427631	0.427029
70	30	10	20	0.317969	0.359767
70	30	10	25	0.477478	0.286544
70	30	10	30	0.181547	0.21605
70	30	10	35	0.005772	0.159418
70	30	10	40	0.072409	0.118208
70	30	10	45	0.145342	0.089651
70	30	10	50	0.122255	0.070291
70	30	10	55	0.072933	0.057244
70	30	10	60	0.044075	0.048414
70	30	10	70	0.032531	0.038179
70	30	10	80	0.037778	0.033189
70	30	10	90	0.032531	0.030908
70	30	10	100	0.014167	0.030383
70	30	10	110	0.040402	0.031159
70	30	10	120	0.040402	0.032659

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	30	10	130	0.050896	0.033748
50	30	15	5	0.255352	0.255662
50	30	15	10	0.145373	0.147458
50	30	15	15	0.112379	0.106987
50	30	15	20	0.088383	0.085775
50	30	15	25	0.072786	0.072451
50	30	15	30	0.065388	0.063238
50	30	15	35	0.05559	0.056488
50	30	15	40	0.05059	0.051332
50	30	15	45	0.043992	0.047252
50	30	15	50	0.041592	0.043913
50	30	15	55	0.038393	0.041093
50	30	15	60	0.037793	0.038642
50	30	15	70	0.030594	0.034488
50	30	15	80	0.027895	0.030998
50	30	15	90	0.025395	0.027957
50	30	15	100	0.022496	0.025237
50	30	15	110	0.020396	0.022762
50	30	15	120	0.019296	0.020496
50	30	15	130	0.017897	0.01843
50	30	15	140	0.015997	0.016566
50	30	15	150	0.016097	0.014909
50	30	15	160	0.014897	0.013456
50	30	15	170	0.012298	0.012202
50	30	15	180	0.012198	0.011133

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	30	15	190	0.011098	0.010233
50	30	15	200	0.011198	0.009484
50	30	15	210	0.009698	0.008869
50	30	15	220	0.009098	0.00837
50	30	15	230	0.008598	0.007971
50	30	15	240	0.007899	0.007658
50	30	15	250	0.007899	0.007419
50	30	15	260	0.007099	0.007242
50	30	15	270	0.007099	0.007118
50	30	15	280	0.006299	0.00704
50	30	15	290	0.006399	0.006999
50	30	15	300	0.004799	0.006991
50	30	15	310	0.005899	0.00701
60	30	15	5	0.3304	0.296812
60	30	15	10	0.1774	0.175123
60	30	15	15	0.1236	0.126228
60	30	15	20	0.096	0.098243
60	30	15	25	0.079	0.079703
60	30	15	30	0.0684	0.066494
60	30	15	35	0.0578	0.056644
60	30	15	40	0.0526	0.0491
60	30	15	45	0.046	0.043258
60	30	15	50	0.0432	0.038729
60	30	15	55	0.0402	0.035229
60	30	15	60	0.0366	0.03253

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	30	15	70	0.032	0.028813
60	30	15	80	0.0292	0.026451
60	30	15	90	0.0229	0.024756
60	30	15	100	0.0222	0.023337
60	30	15	110	0.0203	0.021984
60	30	15	120	0.0179	0.020606
60	30	15	130	0.0164	0.019186
60	30	15	140	0.0153	0.017748
60	30	15	150	0.0141	0.016331
60	30	15	160	0.0123	0.014972
60	30	15	170	0.0121	0.0137
60	30	15	180	0.0105	0.012536
60	30	15	190	0.01091	0.011486
60	30	15	200	0.00859	0.010554
60	30	15	210	0.0081	0.009735
60	30	15	220	0.0087	0.009022
60	30	15	230	0.0081	0.008406
60	30	15	240	0.0064	0.007878
60	30	15	250	0.0056	0.007428
60	30	15	260	0.0078	0.007047
70	30	15	5	0.414398	0.414414
70	30	15	10	0.209017	0.214972
70	30	15	15	0.143012	0.14201
70	30	15	20	0.109009	0.104634
70	30	15	25	0.087407	0.083297

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบ Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	30	15	30	0.072006	0.070221
70	30	15	35	0.063205	0.061342
70	30	15	40	0.056605	0.054522
70	30	15	45	0.049604	0.048742
70	30	15	50	0.026402	0.04357
70	30	15	55	0.057605	0.038849
70	30	15	60	0.035403	0.034534
70	30	15	70	0.031703	0.02712
70	30	15	80	0.026902	0.021339
70	30	15	90	0.022802	0.017111
70	30	15	100	0.020402	0.014236
70	30	15	110	0.018102	0.01244
70	30	15	120	0.019102	0.011428
70	30	15	130	0.014101	0.010937
70	30	15	140	0.013201	0.010755
70	30	15	150	0.012201	0.010725
70	30	15	160	0.009401	0.010746
70	30	15	170	0.008301	0.010752
70	30	15	180	0.008001	0.010712
70	30	15	190	0.016201	0.010613
70	30	15	200	0.006601	0.010453
70	30	15	210	0.006001	0.010239
70	30	15	220	0.006601	0.009981
70	30	15	230	0.0046	0.00969
70	30	15	240	0.022343	0.009378

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบ Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	6	10	0.464603	0.466587
50	60	6	20	0.200922	0.229705
50	60	6	30	0.128995	0.1406
50	60	6	40	0.096272	0.097112
50	60	6	50	0.076986	0.072904
50	60	6	60	0.060229	0.057754
50	60	6	70	0.048057	0.047285
50	60	6	80	0.041418	0.03952
50	60	6	90	0.032407	0.033502
50	60	6	100	0.032565	0.028721
50	60	6	110	0.029878	0.024871
50	60	6	120	0.019286	0.021747
50	60	6	130	0.02229	0.019199
50	60	6	140	0.018021	0.017115
50	60	6	150	0.01565	0.015403
50	60	6	160	0.013595	0.013994
50	60	6	170	0.013437	0.012829
50	60	6	180	0.014069	0.011863
50	60	6	190	0.005217	0.011057
50	60	6	200	0.010591	0.010382
50	60	6	210	0.007272	0.009814
50	60	6	220	0.005849	0.00933
50	60	6	230	0.006956	0.008917
50	60	6	240	0.009169	0.008559
50	60	6	250	0.005059	0.008246

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบ Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	6	260	0.003794	0.007969
50	60	6	270	0.009585	0.007721
50	60	6	280	0.011593	0.007496
50	60	6	290	0.010051	0.007289
50	60	6	300	0.005078	0.007097
50	60	6	310	0.005033	0.006915
50	60	6	320	0.010066	0.006742
50	60	6	330	0.004912	0.006576
50	60	6	340	0.009703	0.006414
50	60	6	350	0.0112	0.006256
50	60	6	360	0.004534	0.006102
50	60	6	370	0.014652	0.005949
60	60	6	10	0.612197	0.597405
60	60	6	20	0.240289	0.267849
60	60	6	30	0.1409	0.156826
60	60	6	40	0.127063	0.103042
60	60	6	50	0.070028	0.073574
60	60	6	60	0.056022	0.055704
60	60	6	70	0.018224	0.043841
60	60	6	80	0.015693	0.035404
60	60	6	90	0.016705	0.029132
60	60	6	100	0.010125	0.024353
60	60	6	110	0.027336	0.020667
60	60	6	120	0.011306	0.017813
60	60	6	130	0.023793	0.0156

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	6	140	0.030542	0.013888
60	60	6	150	0.012656	0.012567
60	60	6	160	0.02683	0.011552
60	60	6	170	0.008775	0.010775
60	60	6	180	0.013162	0.010184
60	60	6	190	0.015356	0.009738
60	60	6	200	0.020924	0.009403
60	60	6	210	0.014857	0.009154
60	60	6	220	0.010809	0.00897
60	60	6	230	0.005908	0.008835
60	60	6	240	0.0105	0.008738
60	60	6	250	0.016213	0.008667
60	60	6	260	0.000211	0.008615
60	60	6	270	0.009916	0.008576
60	60	6	280	0.005924	0.008544
60	60	6	290	0.010841	0.008517
60	60	6	300	0.004869	0.008491
70	60	6	10	0.680074	0.685871
70	60	6	20	0.290389	0.283649
70	60	6	30	0.188093	0.170629
70	60	6	40	0.131695	0.116943
70	60	6	50	0.082797	0.087073
70	60	6	60	0.061698	0.068219
70	60	6	70	0.044498	0.054867
70	60	6	80	0.037599	0.044582

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบ Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	60	6	90	0.025199	0.036272
70	60	6	100	0.013299	0.029424
70	60	6	110	0.031199	0.023767
70	60	6	120	0.017199	0.019129
70	60	6	130	0.0112	0.015379
50	60	10	10	0.578613	0.575593
50	60	10	20	0.360046	0.259852
50	60	10	30	0.137279	0.160373
50	60	10	40	0.126181	0.113205
50	60	10	50	0.075089	0.08542
50	60	10	60	0.081588	0.066324
50	60	10	70	0.042494	0.051999
50	60	10	80	0.037494	0.040813
50	60	10	90	0.030395	0.031945
50	60	10	100	-0.00505	0.024889
50	60	10	110	0.027602	0.019297
50	60	10	120	0.027602	0.01492
50	60	10	130	0.034771	0.01159
50	60	10	140	0.013763	0.009215
50	60	10	150	0.012498	0.007776
50	60	10	160	0.011198	0.007338
50	60	10	170	0.009699	0.008046
50	60	10	180	0.008199	0.010093
50	60	10	190	0.007799	0.013604
50	60	10	200	0.005399	0.018329

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	10	210	0.006799	0.02307
50	60	10	220	0.003799	0.025245
50	60	10	230	0.004499	0.022096
50	60	10	240	0.0033	0.014283
50	60	10	250	0.005799	0.006649
50	60	10	260	0.003999	0.002891
50	60	10	270	0.005299	0.002593
50	60	10	280	0.006399	0.003747
50	60	10	290	0.0018	0.005024
50	60	10	300	0.0008	0.005979
50	60	10	310	0.0018	0.006594
50	60	10	320	0.0014	0.006967
50	60	10	330	0.0009	0.00719
50	60	10	340	0.0007	0.007326
50	60	10	350	0.001552	0.007415
50	60	10	360	0.007724	0.007476
50	60	10	370	0.00585	0.007521
50	60	10	380	0.011087	0.007556
50	60	10	390	0.01226	0.007581
50	60	10	400	0.005832	0.007595
50	60	10	410	0.00585	0.007597
50	60	10	420	0.005832	0.007585
60	60	10	10	0.66175	0.669483
60	60	10	20	0.27098	0.266932
60	60	10	30	0.171987	0.151689

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบ Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	10	40	0.117391	0.100658
60	60	10	50	0.088993	0.07429
60	60	10	60	0.06971	0.058103
60	60	10	70	0.022171	0.046774
60	60	10	80	0.025747	0.038411
60	60	10	90	0.022171	0.032355
60	60	10	100	0.040229	0.028406
60	60	10	110	0.024038	0.026537
60	60	10	120	0.018053	0.026711
60	60	10	130	0.015859	0.0286
60	60	10	140	0.035919	0.031111
60	60	10	150	0.034687	0.032013
60	60	10	160	0.009492	0.028833
60	60	10	170	0.008299	0.021619
60	60	10	180	0.008599	0.013832
60	60	10	190	0.0053	0.008644
60	60	10	200	0.0051	0.006325
60	60	10	210	0.0048	0.005623
60	60	10	220	0.0048	0.005483
60	60	10	230	0.0037	0.005421
60	60	10	240	0.0025	0.005302
60	60	10	250	0.014511	0.005126
60	60	10	260	0.005818	0.004924
60	60	10	270	0.004071	0.004725
60	60	10	280	0.013567	0.004547

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	10	290	0.011488	0.004398
70	60	10	10	0.753452	0.751042
70	60	10	20	0.257122	0.283033
70	60	10	30	0.227266	0.152534
70	60	10	40	0.026961	0.091556
70	60	10	50	0.092282	0.064652
70	60	10	60	0.042966	0.051644
70	60	10	70	0.051305	0.042828
70	60	10	80	0.043209	0.034629
70	60	10	90	0.033394	0.027628
70	60	10	100	0.027322	0.024006
70	60	10	110	0.013054	0.024006
70	60	10	120	0.029346	0.025433
70	60	10	130	0.015584	0.02613
70	60	10	140	0.014066	0.025371
70	60	10	150	0.013256	0.023438
70	60	10	160	0.033694	0.02087
70	60	10	170	0.035103	0.01811
70	60	10	180	0.035103	0.015438
50	60	15	10	0.350104	0.406659
50	60	15	20	0.175402	0.181184
50	60	15	30	0.12072	0.117247
50	60	15	40	0.092767	0.088056
50	60	15	50	0.074773	0.071179
50	60	15	60	0.066562	0.060196

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบหุ้มทุก Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	15	70	0.053459	0.052414
50	60	15	80	0.048742	0.046403
50	60	15	90	0.044375	0.041377
50	60	15	100	0.039308	0.036946
50	60	15	110	0.035639	0.032953
50	60	15	120	0.033718	0.02935
50	60	15	130	0.031272	0.02613
50	60	15	140	0.027952	0.023286
50	60	15	150	0.028127	0.020804
50	60	15	160	0.026031	0.01866
50	60	15	170	0.021488	0.016824
50	60	15	180	0.021314	0.015261
50	60	15	190	0.019392	0.013938
50	60	15	200	0.019567	0.012823
50	60	15	210	0.016946	0.011886
50	60	15	220	0.015898	0.011101
50	60	15	230	0.015024	0.010444
50	60	15	240	0.013802	0.009895
50	60	15	250	0.013802	0.009438
50	60	15	260	0.012404	0.009057
50	60	15	270	0.012404	0.008741
50	60	15	280	0.011006	0.008479
50	60	15	290	0.011181	0.008262
50	60	15	300	0.008386	0.008083
50	60	15	310	0.010307	0.007936

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบุก Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	15	320	0.00891	0.007817
50	60	15	330	0.005604	0.00772
50	60	15	340	0.003549	0.007643
50	60	15	350	0.002385	0.007584
50	60	15	360	0.017556	0.007538
50	60	15	370	0.009319	0.007506
50	60	15	380	0.003897	0.007485
50	60	15	390	0.001765	0.007475
50	60	15	400	0.011902	0.007474
50	60	15	410	0.005875	0.007482
50	60	15	420	0.009893	0.0075
50	60	15	430	0.008889	0.007528
50	60	15	440	0.006168	0.007567
50	60	15	450	0.003511	0.007621
50	60	15	460	0.003511	0.007693
50	60	15	470	0.002633	0.007793
50	60	15	480	0.002633	0.007931
50	60	15	490	0.002194	0.008127
50	60	15	500	0.019748	0.00841
50	60	15	510	0.011006	0.008821
50	60	15	520	0.00488	0.009418
50	60	15	530	0.010691	0.010269
50	60	15	540	0.004143	0.011428
50	60	15	550	0.002756	0.012861
50	60	15	560	0.021416	0.014285

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้งทุก Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ้อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
50	60	15	570	0.018607	0.014946
50	60	15	580	0.022943	0.013705
60	60	15	10	0.413582	0.431806
60	60	15	20	0.178855	0.179365
60	60	15	30	0.120051	0.115937
60	60	15	40	0.089916	0.087179
60	60	15	50	0.07265	0.07065
60	60	15	60	0.06255	0.060202
60	60	15	70	0.052125	0.053148
60	60	15	80	0.047564	0.047941
60	60	15	90	0.037302	0.043647
60	60	15	100	0.036162	0.039772
60	60	15	110	0.033067	0.036115
60	60	15	120	0.029158	0.032638
60	60	15	130	0.026714	0.029369
60	60	15	140	0.024922	0.026348
60	60	15	150	0.022968	0.023605
60	60	15	160	0.020036	0.021152
60	60	15	170	0.01971	0.018986
60	60	15	180	0.017104	0.017092
60	60	15	190	0.017771	0.015449
60	60	15	200	0.013992	0.014033
60	60	15	210	0.013194	0.012818
60	60	15	220	0.014172	0.01178
60	60	15	230	0.013194	0.010897

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

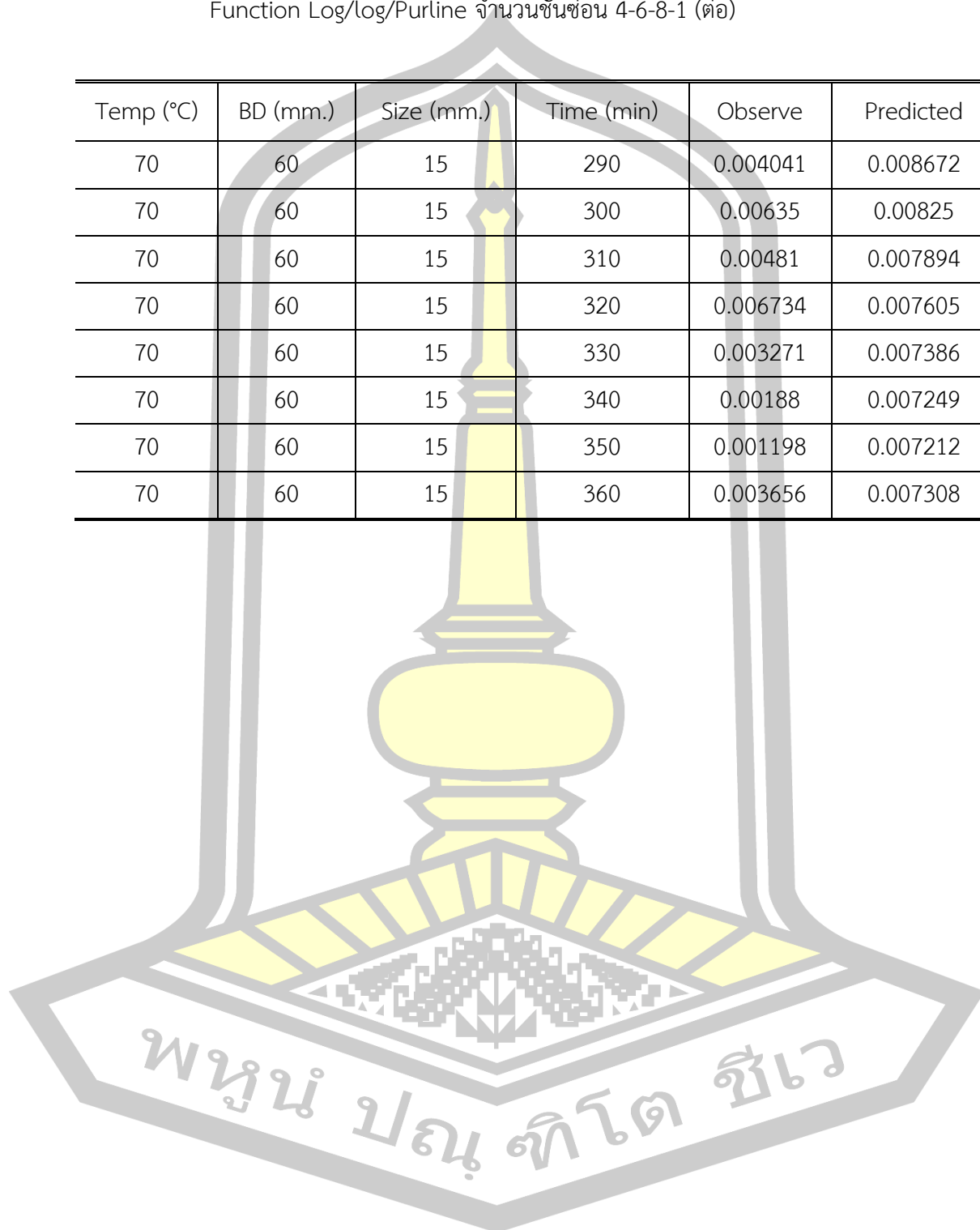
Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
60	60	15	240	0.010425	0.010146
60	60	15	250	0.009122	0.009511
60	60	15	260	0.012706	0.008973
60	60	15	270	0.009122	0.008519
60	60	15	280	0.008633	0.008136
60	60	15	290	0.01352	0.007813
60	60	15	300	0.00733	0.007541
60	60	15	310	0.00619	0.007313
60	60	15	320	0.001615	0.007121
60	60	15	330	0.005389	0.006961
60	60	15	340	0.005864	0.006827
60	60	15	350	0.004887	0.006718
60	60	15	360	0.005538	0.00663
60	60	15	370	0.001547	0.006563
60	60	15	380	0.005379	0.00652
60	60	15	390	0.011307	0.006503
60	60	15	400	0.004846	0.006521
60	60	15	410	0.016152	0.006589
60	60	15	420	0.003667	0.006728
60	60	15	430	0.006994	0.006974
60	60	15	440	0.009433	0.00738
60	60	15	450	0.012211	0.008018
70	60	15	10	0.599705	0.598786
70	60	15	20	0.242436	0.234765
70	60	15	30	0.15335	0.158694

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราครอบห้วบ Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	60	15	40	0.115253	0.120621
70	60	15	50	0.073116	0.094937
70	60	15	60	0.08947	0.076175
70	60	15	70	0.060994	0.06228
70	60	15	80	0.051758	0.052016
70	60	15	90	0.043869	0.044446
70	60	15	100	0.039252	0.038819
70	60	15	110	0.034826	0.034542
70	60	15	120	0.03675	0.031177
70	60	15	130	0.02713	0.028416
70	60	15	140	0.025398	0.026059
70	60	15	150	0.023474	0.023982
70	60	15	160	0.018086	0.022111
70	60	15	170	0.01597	0.020404
70	60	15	180	0.015393	0.018838
70	60	15	190	0.03117	0.017398
70	60	15	200	0.012699	0.016079
70	60	15	210	0.011545	0.014872
70	60	15	220	0.012699	0.013774
70	60	15	230	0.008851	0.012779
70	60	15	240	0.005381	0.011882
70	60	15	250	0.011743	0.011078
70	60	15	260	0.007504	0.01036
70	60	15	270	0.008081	0.009723
70	60	15	280	0.00558	0.009162

ตาราง ข 2 ค่าผลการทำนายแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมอัตราการอบแห้ง Transfer
Function Log/log/Purline จำนวนชั้นซ่อน 4-6-8-1 (ต่อ)

Temp (°C)	BD (mm.)	Size (mm.)	Time (min)	Observe	Predicted
70	60	15	290	0.004041	0.008672
70	60	15	300	0.00635	0.00825
70	60	15	310	0.00481	0.007894
70	60	15	320	0.006734	0.007605
70	60	15	330	0.003271	0.007386
70	60	15	340	0.00188	0.007249
70	60	15	350	0.001198	0.007212
70	60	15	360	0.003656	0.007308



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายมนตรี มนตรีพิลา
วันเกิด	วันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ. 2501
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 57/6-7 ถนนดำรงราษฎร์วิถึ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณีย์ 45000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ครูชำนาญการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิทยาลัยเทคนิคร้อยเอ็ด เลขที่ 1 ถนนเทวภิบาล ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณีย์ 45000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2521 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ป.ว.ช.) สาขาวิชาช่างท่อและประสาน วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทคนิคขอนแก่น พ.ศ. 2523 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ป.ว.ส.) สาขาวิชาช่างท่อและประสาน วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทคนิคขอนแก่น พ.ศ. 2529 ปริญญาครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2548 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ์ ปณุ์ ทิโต ชีเว