

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ระดับการประเมินคุณภาพ

<input type="checkbox"/> ดีเยี่ยม	<input checked="" type="checkbox"/> ดีมาก
<input type="checkbox"/> พอ	<input type="checkbox"/> ปานกลาง





การกำหนดสถานะที่เหมาะสมในการเร่งความเก่าของข้าวสาร
โดยวิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว

นาฏชนก ปรางปรู

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร
สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร

ชื่อเรื่อง

การกำหนดสถานะที่เหมาะสมในการเร่งความแก่ของข้าวสาร
โดยวิธีผลตอบสนองของแบบโครงร่างพื้นผิว

โดย

นางุชนก ปรางปรู

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สิบคำ)

วันที่ 27 เดือน กันยายน พ.ศ. 2553

กรรมการที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชยา พิมพ์พิไล)

วันที่ 28 เดือน กันยายน พ.ศ. 2553

กรรมการที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.พูนพัฒน์ พูนน้อย)

วันที่ 28 เดือน กันยายน พ.ศ. 2553

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุรงศ์ วาฤทธิ)

วันที่ 28 เดือน กันยายน พ.ศ. 2553

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จำเนียร ยศราช)

ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

วันที่ 30 เดือน กันยายน พ.ศ. 2553

ชื่อเรื่อง	การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความแก่ของข้าวสาร โดยวิธีผลตอบแบบโครงร่างพื้นผิว
ชื่อผู้เขียน	นางสาวนาฏชนก ปรางปรู
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูป ผลผลิตเกษตร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร ธิบคำ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความแก่ของข้าวสารด้วยวิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface methodology) โดยเลือกใช้แผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) เพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระ 4 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน (X_1) 60-80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน (X_2) 60-120 นาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน (X_3) 30-40 รอบต่อนาที และความดัน (X_4) 2-10 บาร์ ต่อตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าสี (y_1) ค่าปริมาณอะไมโลส (y_2) ค่าความใหม่-เก่าของข้าว (y_3) ค่าปริมาณการแตกหัก (y_4) ค่าความหนืด (y_5) และค่าการสลายเมล็ดในค้าง (y_6) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความแก่ของข้าวสารคือ อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน 79.19 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 67.88 นาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน 33.74 รอบต่อนาที และความดัน 9.19 บาร์ เมื่อทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่สภาวะดังกล่าวพบว่าค่า breakdown ค่า final viscosity ค่า setback from trough และค่า pasting temperature แตกต่างจากค่าจริง 38.78, 13.03, 13.72 และ 3.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Title	Determination of Optimum Condition in Milled Rice Aging by Response Surface Methodology
Author	Miss Nardchanok Prangpru
Degree of	Master of Engineering in Agro-Process Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Sunate Surbkar

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the optimum condition of milled rice aging using response surface methodology. Central Composite Design (CCD) of four factors and five levels (four-variable design) was used in the analysis. The four independent variables investigated in this experiment were air temperature in the pressure vessel (X_1) at 60-80 degree celsius, heating time (X_2) of 60-120 minutes, movement speed of pressure vessel (X_3) at 30-40 revolutions per minute and vessel pressure (X_4) at 2-10 bar. Dependent variables included color (y_1), amylose content (y_2), aging rice (y_3), broken rice (y_4), viscosity (y_5) and alkali spreading value (y_6). Results showed that optimum process conditions consisted of air temperature in the pressure vessel at 79.19 degree celsius, heating time of 67.88 minutes, movement speed of pressure vessel at 33.74 revolutions per minute and vessel pressure of 9.19 bar. The test validation of models for breakdown, final viscosity, setback from trough viscosity and pasting temperature were 38.78, 13.03, 13.72 and 3.34 percent, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการศึกษาดังแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการให้คำปรึกษาในการวางแผนการทดลอง ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขจนกระทั่งได้วิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชยา พิมพ์พิไล และอาจารย์ ดร.พูนพัฒน์ พูนน้อย กรรมการที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ เสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา อีกทั้งกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.พิชญา บุญประสม พูลลาภ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีเนื้อหาที่สมบูรณ์ครบถ้วน เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

ขอขอบพระคุณอาจารย์ อิศรพงศ์ พงษ์ศิริกุล และอาจารย์นงเยาว์ ชูสุข ที่กรุณาให้คำปรึกษา พร้อมทั้งแนะนำและเสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัย และขอขอบพระคุณกลุ่มเกษตรอินทรีย์ดอกคำ อำเภอรั่ว จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุนข้าวขาวดอกมะลิ 105

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ทุกท่าน ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือ ให้การศึกษาสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อไพโรจน์ และคุณแม่สุทิน ปรากฏพรุ รวมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิต ตลอดจนให้การสนับสนุน อุปการะเลี้ยงดู ข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

นาฏชนก ปรากฏพรุ

กันยายน 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
สารบัญตารางผนวก	(12)
สารบัญภาพผนวก	(13)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	5
ข้าว	5
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว	5
โครงสร้างของเมล็ดข้าว	5
องค์ประกอบทางเคมีของข้าวสาร	8
องค์ประกอบของสสารภายในเมล็ดข้าว	11
ชนิดของข้าว	15
กระบวนการสีข้าว	17
คุณภาพของข้าวสาร	23
คุณลักษณะของข้าวสารใหม่และข้าวสารเก่า	28
กลไกในการกลายเป็นข้าวสารเก่า	29
เทคโนโลยีการทำข้าวเปลือกใหม่ให้เป็นข้าวเก่า	32
เทคโนโลยีการทำข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวเก่า	35

	หน้า
ทฤษฎีของ Response Surface Methodology	37
การสร้างแผนการทดลองแบบ Response Surface Methodology	39
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
สรุปกรอบแนวความคิด	46
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	47
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	47
วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	47
อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ	47
อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ	48
วัสดุและวิธีการดำเนินการวิจัย	50
การเตรียมตัวอย่างข้าวสาร	50
การวางแผนการทดลอง	50
การเปลี่ยนสภาพข้าวด้วยชุดให้ความร้อนและความดัน	53
การตรวจวัดคุณภาพข้าว	54
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	58
สถานที่ดำเนินการวิจัย	61
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง	62
ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตอบสนอง	62
การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป	62
การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสาร	65
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	74
สรุป	74
ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก วิธีการตรวจวัดคุณภาพข้าวสาร	83
ภาคผนวก ข ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณภาพของข้าว	90
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	96
ภาคผนวก ง ตัวอย่างและผลการวิเคราะห์ข้อมูล	103

ภาคผนวก จ ประวัติผู้วิจัย



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของข้าวหุงสุกในปริมาณ 100 กรัม	8
2	ขนาดเมล็ดแบ่งตามความยาว	24
3	รูปร่างเมล็ดแบ่งตามสัดส่วนความยาว/ความกว้าง	24
4	การแบ่งประเภทข้าวตามความคงตัวของแป้งสุก	26
5	การประเมินค่าการสลายเมล็ดในค้าง	28
6	ความสัมพันธ์ของค่าการสลายเมล็ดในค้างกับอุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชัน	28
7	การเข้ารหัสของตัวแปรอิสระ 4 ตัว โดยในแต่ละตัวแปร มี 5 ระดับ	40
8	จำนวนการทดลองที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัว	41
9	ค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนของตัวแปรอิสระ	50
10	จำนวนสิ่งทดลองที่ต้องศึกษาเมื่อวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design	51
11	เกณฑ์ของค่าผลตอบที่ต้องการ	59
12	การทดสอบการถอดอยแบบกำลังสองเต็มรูปของแบบจำลองต่าง ๆ ในแบบถดถอย	63
13	การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลองทางสถิติของ สถานะที่เหมาะสมสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสาร	70
14	การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของตัวอย่างข้าวเมื่อทำการหุงต้ม	72
15	การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มเมื่อทำการหุงต้ม	72

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 โครงสร้างของส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว	6
2 โครงสร้างของส่วนเนื้อผล	7
3 โครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	11
4 ลักษณะโครงสร้างและอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C	13
5 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน	14
6 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินในบริเวณสาย A และ B1	14
7 ลักษณะเมล็ดข้าวแบ่งตามขนาดและรูปร่าง	15
8 เครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่าและลูกกลิ้งหมุนแบบเยอรมัน	18
9 เครื่องกะเทาะเปลือกแบบหิน โม่	19
10 เครื่องกะเทาะเปลือกแบบลูกกลิ้ง	20
11 เครื่องขัดขาวแนวตั้งแบบขูดผิวเมล็ดข้าว	21
12 เครื่องคัดขนาดโดยใช้ความหนาของเมล็ดข้าวแบบลูกกลิ้ง	22
13 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช	30
14 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม	31
15 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	32
16 ขั้นตอนการหาผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว	39
17 ชุดให้ความร้อนและความดันแก่ข้าวสาร	53
18 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	56
19 กระบวนการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง	61
20 สภาวะที่เหมาะสมของผลตอบสนองสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสาร ที่อุณหภูมิ 79.19 องศาเซลเซียส เวลา 67.88 นาที ความเร็วรอบ 33.74 รอบต่อนาที และความดัน 9.19 บาร์	65
21 ผลตอบสนองของค่า breakdown ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์	66
22 ผลตอบสนองของค่า final viscosity ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์	67

ภาพ		หน้า
23	ผลตอบสนองของค่า setback from trough ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์	68
24	ผลตอบสนองของค่า pasting temperature ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์	69
25	ลักษณะการขยายปริมาตรของตัวอย่างข้าวชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการหุงต้ม	73



สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก		หน้า
1	การตรวจวัดคุณภาพข้าวจากแผนการทดลองแบบ CCD	97
2	การขยายปริมาตรของข้าวจากแผนการทดลองแบบ RCBD	99
3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้าวเมื่อทำการหุงต้ม	102
4	Response Surface Regression: L*	112
5	Response Surface Regression: a*	113
6	Response Surface Regression: b*	114
7	Response Surface Regression: amylose	115
8	Response Surface Regression: aging	116
9	Response Surface Regression: broken	117
10	Response Surface Regression: peak viscosity	118
11	Response Surface Regression: trough viscosity	119
12	Response Surface Regression: breakdown	120
13	Response Surface Regression: final viscosity	121
14	Response Surface Regression: setback from trough	122
15	Response Surface Regression: peak time	123
16	Response Surface Regression: pasting temperature	124
17	Response Optimization	129

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวก		หน้า
1	เครื่องวัดค่าสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE plus & Colorflex ประเทศสหรัฐอเมริกา	91
2	เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน	91
3	เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 2 ประเทศเยอรมัน	92
4	เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว ยี่ห้อ Newport Scientific รุ่น RVA-4SA ประเทศออสเตรเลีย	92
5	เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7 ประเทศสหรัฐอเมริกา	93
6	เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยอินฟราเรด ยี่ห้อ AND รุ่น AD-4714A ประเทศญี่ปุ่น	93
7	เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น 50 ประเทศเยอรมนี	94
8	เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Vortex-genie 2 รุ่น G-560E ประเทศสหรัฐอเมริกา	94
9	เครื่องบดละเอียด ยี่ห้อ Haopeng รุ่น ST-04 ประเทศจีน	95
10	เครื่องนึ่งไฟฟ้า ยี่ห้อ Tefal รุ่น VC1001 ประเทศจีน	95
11	การกรอกตัวแปรลงใน Worksheet	104
12	การเลือกคำสั่งเพื่อทำการวิเคราะห์	105
13	การเลือกตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์	105
14	การเลือกคำสั่งเพื่อทำการหาสถานะที่เหมาะสม	106
15	การเลือกตัวแปรที่มีค่า Sig มาทำการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม	107
16	การระบุค่าตอบสนองในช่วงที่ต้องการเพื่อทำการหาสถานะที่เหมาะสม	107
17	การเลือกคำสั่งเพื่อทำการหาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟ	108
18	การเลือกตัวแปรมาทำการวิเคราะห์หาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟ	109

ภาพผนวก		หน้า
19	การระบุค่าตอบสนองในช่วงสูงและต่ำมาทำการวิเคราะห์หาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟ	109
20	การเลือกคำสั่งเพื่อทำการสร้างกราฟ Contour Plot และ Surface Plots	110
21	การเลือกลักษณะของกราฟ	111
22	การเลือกตัวแปรที่จะสร้างกราฟ	111
23	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืดของน้ำแป้ง breakdown	125
24	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืดของน้ำแป้ง final viscosity	126
25	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืดของน้ำแป้ง setback from trough	127
26	กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืด pasting temperature	128
27	กราฟสถานะที่เหมาะสม	129
28	การกรอกตัวแปรลงใน Data View	130
29	การเลือกคำสั่งเพื่อทดสอบลักษณะการแจกแจงของข้อมูล	131
30	การเลือกคำสั่งเพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ	132
31	การเลือกตัวแปร	132
32	การเลือกข้อมูลที่แสดงในผลลัพธ์	133
33	การเลือกคำสั่งเปรียบเทียบเชิงซ้อน	133
34	ลักษณะการแจกแจงของข้อมูล	134
35	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม	134
36	การเปรียบเทียบซ้อนแบบ Duncan	134

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ลาติน

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	การดูดกลืนแสง	นาโนเมตร
a*	ความเป็นสีแดง	ไร้หน่วย
b*	ความเป็นสีเหลือง	ไร้หน่วย
cP	หน่วยของค่าความหนืดที่อ่านได้จากเครื่อง RVA	เซนติพอยด์
f	ฟังก์ชันของการตอบสนอง	ไร้หน่วย
L*	ความสว่าง	ไร้หน่วย
M ₀	ค่าจากการทดลอง	ไร้หน่วย
M _p	ค่าจากการทำนาย	ไร้หน่วย
N	จำนวนค่าสังเกต	ไร้หน่วย
P	ความดัน	บาร์
RMRE	ความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์
RSM	ผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว	ไร้หน่วย
RVA	การวัดความหนืดแบบรวดเร็ว	ไร้หน่วย
R ² _{adj}	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ	ไร้หน่วย
S	ความเร็วรอบ	รอบต่อนาที
T	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส
t	ระยะเวลา	นาที

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์กรีก โรมัน

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
ϵ	เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม	ไร้หน่วย
β_0	จุดตัด	ไร้หน่วย
β_1	ผลเชิงเส้นตรง	ไร้หน่วย
β_{ii}	ผลเชิงเส้นโค้ง	ไร้หน่วย
β_{iii}	ผลของปฏิกริยาสัมพันธ์	ไร้หน่วย

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและเป็นอาหารหลักของประเทศไทย แบ่งออกตามอายุการเก็บรักษาได้เป็น 2 ประเภท คือข้าวใหม่และข้าวเก่า (ประพาส, 2526) โดยข้าวสารที่ได้จากการสีข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวไม่นานจะเรียกว่า ข้าวใหม่ ส่วนข้าวสารที่ได้จากการสีข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวไม่น้อยกว่า 4-6 เดือนจะเรียกว่า ข้าวเก่า ความแตกต่างของข้าวใหม่และข้าวเก่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีภายในของเมล็ดข้าว ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และน้ำหรือความชื้น โดยข้าวใหม่เมื่อนำมาหุงต้มจะให้ข้าวสุกที่มีลักษณะไม่ขึ้นหม้อ มีกลิ่นหอม อุ่นน้ำได้น้อยทำให้ขยายปริมาตรได้น้อย เมื่อนำมาบริโภคแล้วไม่อิ่มท้อง เมล็ดข้าวสุกเหนียวเกาะติดกันเป็นก้อนและแฉะ ส่วนข้าวเก่าเมื่อนำมาหุงต้มจะให้ข้าวสุกที่มีลักษณะขึ้นหม้อ ไม่มีกลิ่นหอม อุ่นน้ำได้มากทำให้ขยายปริมาตรได้มาก เมื่อนำมาบริโภคแล้วอิ่มท้อง เมล็ดข้าวสุกร่วนไม่เกาะติดกันเป็นก้อนและไม่แฉะ (อรอนงค์, 2550) ดังนั้นผู้บริโภคส่วนใหญ่จึงนิยมบริโภคข้าวเก่ามากกว่าข้าวใหม่ นอกจากนี้แล้วในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าว เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทเส้นก๋วยเตี๋ยว เส้นขนมจีน ขนมปังกรอบ เป็นต้น ก็นิยมใช้ข้าวเก่าเนื่องจากแป้งข้าวเก่าที่นำมาแปรรูปจะมีการคืนสภาพของน้ำแป้งได้ดีกว่าแป้งข้าวใหม่ จึงทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ภายหลังจากการแปรรูปมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดี (Moritaka *et al.*, 1972)

การเก็บรักษาข้าวเปลือกเพื่อรอให้ข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากข้าวใหม่เป็นข้าวเก่าด้วยวิธีทางธรรมชาติจะใช้เวลาประมาณ 4-6 เดือน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและอุณหภูมิ (จิรศักดิ์และคณะ, 2547) ทำให้สูญเสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการเก็บ จึงมีความพยายามในการเร่งความเก่า ของข้าวด้วยวิธีการต่าง ๆ โดย Watanabe *et al.* (1991) ใช้วิธีรีดที่ข้าวด้วยความดันสูง 100 เมกะปาสกาลร่วมกับเอนไซม์ actinase ทำให้สมบัติของข้าวในแง่การหุงต้มดีขึ้น วินิตและภูมิสิทธิ์ (2545) พบว่าควรเร่งความเก่าของข้าวเปลือกหอมมะลิโดยการอบในภาชนะปิดด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสขึ้นไป ใจทิพย์และผดุงศักดิ์ (2547) ใช้วิธีอบข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนจนข้าวเปลือกมีอุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส และมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 30 เช่นเดียวกับ Gujral and Kumar (2003) ที่อบข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลานาน 30 นาที ที่สภาวะความดันบรรยากาศ ขณะที่ Wiset *et al.* (2005) กระตุ้นความเก่าของข้าว 2 ขั้นตอน คือการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดเซชัน จนความชื้นของ

ข้าวเหล็ร้อยละ 18 จากนั้นนำไปอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 100, 125 และ 150 องศาเซลเซียส Saponronnarit *et al.* (2008) และ Jaisut *et al.* (2009) เเร่งความเก่าด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกหอมมะลิ ที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบร่ร่วมกับการเทมเปอร์และการระบายอากาศ พชรวรรณและคณะ (2550) ใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 นาที

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าเป็นการเร่งความเก่าของข้าว จากข้าวเปลือกเท่านั้น แต่การรับซื้อข้าวของโรงสีเกือบทั้งหมดจะซื้อข้าวเปลือกซึ่งต้องลด ความชื้นลงทันทีเพื่อป้องกันความเสียหาย ขณะที่การเร่งความเก่าของข้าวเปลือกโดยการใช้ไอน้ำ ร้อนนั้น เป็นการเพิ่มความชื้นให้กับข้าวทำให้ผู้ประกอบการต้องลดความชื้นซ้ำอีกครั้ง เป็นการ สิ้นเปลืองพลังงาน สูเนตรและคณะ (2552) จึงได้ประยุกต์ใช้ความร้อนและความดันในการเปลี่ยน ข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวสารเก่า พบว่าความดัน 800 กิโลปาสกาล และความร้อน 80 องศาเซลเซียส สามารถเร่งความเก่าของข้าวสารได้ แต่พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเร่งความเก่าของข้าวมีหลาย ปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความดัน การเคลื่อนไหวของเมล็ดข้าว มวลของข้าวเริ่มค่น เป็นต้น แต่ การทดลองที่มีหลายปัจจัยนั้นเป็นการสิ้นเปลืองทั้งงบประมาณและเวลา ดังนั้นการกำหนดสภาวะที่ เหมาะสม โดยการนำวิธีการทางสถิติมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลอง (experimental design) เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่มีความถูกต้องสมเหตุสมผล ด้วยวิธีผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology, RSM) จะสามารถกำหนดสภาวะการเร่งความเก่าของข้าวสารได้ อย่างเหมาะสม และประหยัดเวลารวมถึงค่าใช้จ่ายในการวิจัย ข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการ ออกแบบเครื่องมือและอุปกรณ์ในการเร่งความเก่าของข้าวสาร ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อ อุตสาหกรรมข้าวของประเทศ และเกษตรกรผู้ผลิต ตลอดจนผู้บริโภค

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงสภาพข้าวจากข้าวสารใหม่เป็นข้าวสารเก่าโดยมีวัตถุประสงค์ย่อยคือ

1. เพื่อกระตุ้นข้าวโดยใช้อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน และระดับความดันในถัง เป็นพารามิเตอร์ในการศึกษา
2. เพื่อตรวจวัดคุณภาพของข้าวภายหลังการกระตุ้นเปรียบเทียบกับข้าวควบคุมซึ่งปล่อยให้เก่าเองตามธรรมชาติ และข้าวก่อนการกระตุ้น

ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษานี้มีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. ข้าวสารที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ซึ่งเก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2552 เริ่มทำการทดลองในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 โดยข้าวสารถูกนำมาบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดผนึกบริเวณปากถุงแบบสุญญากาศ จากนั้นนำมาเก็บรักษาไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 15 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 45 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้าวสารมีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก
2. ข้าวควบคุม คือ ข้าวสารเก่าที่นำมาเปรียบเทียบกับข้าวสารที่ได้จากการทดลอง โดยทั้งข้าวสารเก่าและข้าวสารที่ใช้ในการทดลองเป็นข้าวพันธุ์เดียวกัน แต่ข้าวเก่าเก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2551 โดยข้าวควบคุมถูกนำมาบรรจุใส่ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์และปิดผนึกบริเวณปากถุงแบบธรรมดา จากนั้นนำมาเก็บรักษาไว้ในสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งข้าวสารมีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ภายหลังเสร็จสิ้นการดำเนินงานคาดว่าจะได้รับผล ดังนี้

1. ลดความเสียหายของข้าวที่เกิดขึ้นจากการเก็บไว้ให้เป็นข้าวเก่าตามธรรมชาติ
2. ลดระยะเวลาการเปลี่ยนสภาพข้าวจากข้าวใหม่เป็นข้าวเก่า
3. ลดต้นทุนแก่ผู้ประกอบการในด้านการสิ้นเปลืองพลังงานในการอบซ้ำ
4. เพิ่มวัตถุดิบให้แก่อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารจำพวกแป้ง
5. ผู้ประกอบการสามารถผลิตข้าวได้อย่างรวดเร็วและตรงตามรายการสั่งซื้อ
6. เกษตรกรสามารถรวมกลุ่มกันผลิตและขายข้าวได้ในราคาที่สูงขึ้น
7. ผู้บริโภคได้บริโภคผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น
8. ได้องค์ความรู้จากเทคนิคใหม่เพื่อนำไปใช้พัฒนาในอุตสาหกรรมข้าวต่อไป

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ข้าว

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

ข้าว เป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียก เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain, rice seed) ในการเจริญเติบโตของต้นข้าวสามารถแบ่งออกได้เป็นสองระยะคือ ระยะที่ข้าวเจริญเติบโตทางลำต้น และระยะที่ข้าวเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ ซึ่งระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นนี้เกิดขึ้นตั้งแต่ที่ข้าวเริ่มงอกออกมาจากเมล็ดจนเป็นต้นกล้าใช้เวลาประมาณ 5-6 วัน จากนั้นต้นกล้าที่ได้จะนำไปเพาะต่อซึ่งใช้เวลาประมาณ 25-30 วัน จึงจะนำไปปักดำได้ โดยระยะเวลาตั้งแต่ปักดำจนถึงข้าวแตกกอและออกเป็นช่อดอกใช้เวลาประมาณ 45-60 วัน หลังจากนั้นข้าวก็จะเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ซึ่งระยะนี้เกิดขึ้นตั้งแต่ที่ข้าวเริ่มตั้งท้องใช้เวลาประมาณ 25-30 วัน จากนั้นข้าวก็จะใช้เวลาในการสร้างเมล็ดประมาณ 25-30 วัน ก็จะได้เมล็ดข้าวที่แก่เต็มที่ รวมเวลาในการปลูกข้าวทั้งสิ้นประมาณ 120-150 วัน (อรอนงค์, 2550)

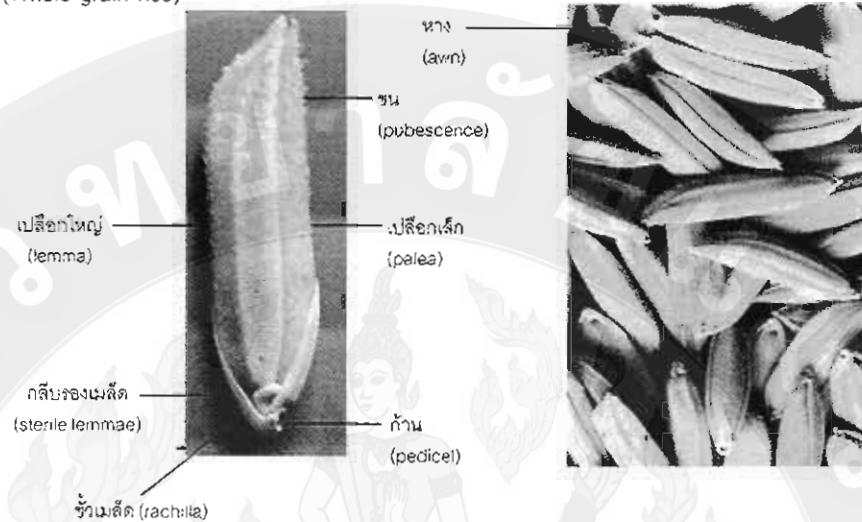
โครงสร้างของเมล็ดข้าว

อรอนงค์ (2550) รายงานว่าเมล็ดข้าวมีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว (ผล) นิยมเรียกว่า แกลบ (hull or husk) และส่วนเนื้อผล (ผลแท้) นิยมเรียกว่า ข้าวกล้อง (caryopsis or brown rice) โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้

1. แกลบหรือส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว

ส่วนภายนอกซึ่งห่อหุ้มเมล็ดข้าวนี้ประกอบด้วย เปลือกใหญ่ (lemma) เปลือกเล็ก (palea) ขี้เม็ล็ด (rachilla) ขน (pubescence) หาง (awn) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmas) ดังแสดงในภาพ 1

ข้าวเปลือก
(Whole grain rice)



ภาพ 1 โครงสร้างของส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว
ที่มา: อรอนงค์ (2550)

1.1 เปลือกใหญ่ เป็นเปลือกหุ้มเนื้อผลด้านท้อง มีขนาดใหญ่อาจมีหางหรือไม่มีก็ได้ มีลักษณะเป็นรอยเส้นประมาณ 5 เส้นตามความยาวของเปลือก ห่อหุ้มเปลือกเล็กไว้ทั้ง 2 ด้านในลักษณะขบอยู่ข้างบนอย่างแน่นสนิท ประมาณ 2/3 ของเปลือกทั้งหมดตามแนวยาวของเมล็ด

1.2 เปลือกเล็ก เป็นเปลือกหุ้มเมล็ดเนื้อผลด้านหลัง มีขนาดเล็กกว่าเปลือกใหญ่ประมาณ 1/3 ของเปลือกทั้งหมด มีลักษณะเป็นรอยเส้นประมาณ 3 เส้นตามความยาวของเปลือก จะขบอยู่ใต้เปลือกใหญ่ตามแนวยาวทำให้เปลือกทั้ง 2 ติดกันสนิท

1.3 ชั่วเมล็ด เป็นก้านสั้นอยู่ระหว่างกลีบรองเมล็ดกับเปลือกใหญ่ ที่ยังคงติดอยู่กับเมล็ดข้าวเปลือก

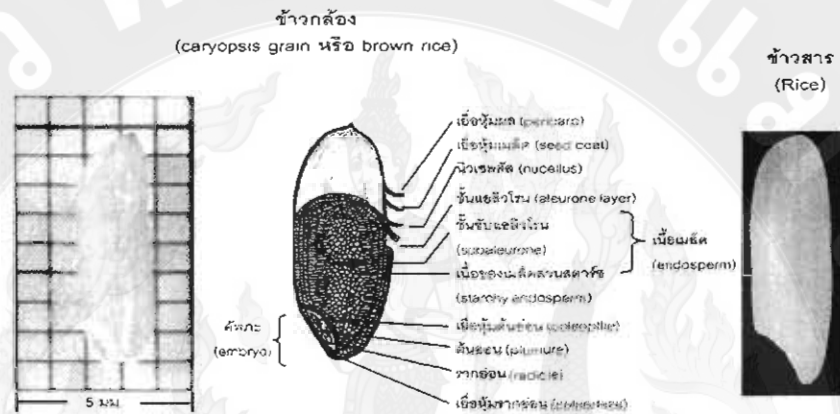
1.4 ขน เป็นส่วนเซลล์ผิวด้านนอก อยู่บนบริเวณเปลือกใหญ่และเปลือกเล็ก ทำหน้าที่ลดการระเหยของน้ำ ป้องกันอันตรายต่อเมล็ดจากสภาวะภายนอกเมล็ดและเพื่อการกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ โดยช่วยให้เมล็ดติดไปกับคน สัตว์ หรือสิ่งของต่างๆ ที่มีโอกาสสัมผัสเมล็ดจนทำให้เมล็ดหลุดติดไปด้วย

1.5 หาง เป็นส่วนปลายของเปลือกใหญ่ที่ยาวออกมาเกินตำแหน่งยอดดอก ทำหน้าที่ในการกระจายพันธุ์คล้ายขน อาจมีขนาดสั้น ยาว หรือไม่มี แตกต่างกันตามพันธุ์ข้าว

1.6 กลีบรองเมล็ด เป็นกลีบเล็ก 2 กลีบ อยู่ตรงข้ามกันบริเวณชั่วเมล็ด

2. ข้าวกล้องหรือเนื้อผล

ส่วนของเนื้อผลนี้ประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) นิวเคลลัส (nucellus) เยื่อหุ้มชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) คัพภะ (embryo) และเนื้อเมล็ด (endosperm) ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 โครงสร้างของส่วนเนื้อผล

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

2.1 เยื่อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกมีความหนาประมาณ 10 ไมครอนห่อหุ้มผลอยู่ภายใน พืชเซลล์มี 6 ชั้น มีสารสีปนอยู่ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ เช่น สีน้ำตาลอ่อนหรือสีน้ำตาลแก่ นอกจากนี้ยังมีโปรตีนเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด เป็นเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยเซลล์รูปยาว 2 ชั้นเรียงตามขวาง และมีผนังบางกัน ภายในเซลล์มีไขมัน และสารสีเช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผลจึงทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ

2.3 เยื่อหุ้มชั้นนิวเคลลัส เป็นเนื้อเยื่อที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด มีความหนาอยู่ประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน แต่พื้นที่ระหว่างนิวเคลลัสกับเยื่อหุ้มเมล็ดไม่ติดกันแน่นมาก ทำให้สามารถแยกออกจากกันได้ง่าย

2.4 เยื่อชั้นแอลิวโรน เป็นเนื้อเยื่อที่ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น โดยเยื่อหุ้มด้านหลังของเมล็ดจะหนากว่าเยื่อหุ้มด้านท้องซึ่งความหนาแตกต่างกันไปตามพันธุ์ข้าว

2.5 คัพภะ เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตไปเป็นต้นอ่อน โดยอยู่บริเวณโคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ประกอบด้วย เยื่อหุ้มคัพภะ คัพภะ รากอ่อน เยื่อหุ้ม รากอ่อน ท่อน้ำท่ออาหาร และใบเลี้ยงซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว จึงอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน วิตามิน และแร่ธาตุ

2.6 เนื้อเมล็ด เป็นส่วนของเซลล์ที่มีผนังบาง และมีมากที่สุดใเมล็ดข้าว ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ชั้นแอลิวโลน (subaleurone layer) และสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (starchy endosperm)

ใจทิพย์และผดุงศักดิ์ (2547) รายงานว่าภายหลังจากกระบวนการเก็บเกี่ยวเมล็ดข้าว เสร็จสิ้นลง ข้าวใหม่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นข้าวเก่าภายในระยะเวลา 3-6 เดือน เนื่องจาก บริเวณส่วนที่เรียกว่าเอนโดสเปิร์มหรือเนื้อเมล็ดเกิดการเปลี่ยนแปลงและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นทำให้สามารถต้านทานการแตกหักได้สูงขึ้นขณะที่มีการขัดสีส่งผลให้คุณภาพการสีดีขึ้น โดยตลอดระยะเวลา 3-6 เดือนนั้นองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวซึ่งประกอบไปด้วย แป้ง ไขมัน และโปรตีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจนทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวเปลี่ยนไปเป็นข้าวเก่า

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวสาร

องค์ประกอบหลักสำคัญที่พบในเมล็ดข้าวประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เยื่อใยอาหาร และแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตาราง 1

ตาราง 1 เปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของข้าวหุงสุกในปริมาณ 100 กรัม

องค์ประกอบสารอาหาร	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว
น้ำ (กรัม)	73.09	68.44
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	111	130
พลังงาน (กิโลจูล)	464	544
โปรตีน (กรัม)	2.58	2.69
ไขมัน (กรัม)	0.90	0.28
เถ้า (กรัม)	0.46	0.41
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	22.96	28.17
กากใยอาหาร (กรัม)	1.80	0.4
น้ำตาล (กรัม)	0.35	0.05
แร่ธาตุ		
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	10	10
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.42	1.20
แมกนีเซียม (มิลลิกรัม)	43	12
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม)	83	43

ตาราง 1 (ต่อ)

องค์ประกอบสารอาหาร	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว
แร่ธาตุ		
โพแทสเซียม (มิลลิกรัม)	43	35
โซเดียม (มิลลิกรัม)	5	1
สังกะสี (มิลลิกรัม)	0.63	0.49
ทองแดง (มิลลิกรัม)	0.10	0.06
แมงกานีส (มิลลิกรัม)	0.90	0.47
ซีลีเนียม (ไมโครกรัม)	9.80	7.5
วิตามิน		
ไทอะมีน (มิลลิกรัม)	0.096	0.163
ไรโบเฟลวิน (มิลลิกรัม)	0.025	0.013
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	1.528	1.476
กรดแพนโทเทนิค (มิลลิกรัม)	0.285	0.39
วิตามินบี 6 (มิลลิกรัม)	0.145	0.093
โฟเลต, ทั้งหมด (มิลลิกรัม)	4	58
กรดโฟลิก (ไมโครกรัม)	0	55
โฟเลต, อาหาร (ไมโครกรัม)	4	3
โฟเลต, DFE (ไมโครกรัม DFE)	4	97
วิตามินบี 12 (ไมโครกรัม)	0	0
วิตามินเอ, IU (IU)	0	0
วิตามินเอ, RAE (ไมโครกรัม RAE)	0	0
รีทีนอล (ไมโครกรัม)	0	0
วิตามินอี (แอลฟา-โทโคเฟอรอล) (มิลลิกรัม)	0.03	0.04
วิตามินเค (ฟีโลควาโนล) (ไมโครกรัม)	0.6	0
ไขมัน		
กรดไขมัน, อิ่มตัวทั้งหมด (กรัม)	0.180	0.077
4:0 (กรัม)	0	0
6:0 (กรัม)	0	0
8:0 (กรัม)	0	0
10:0 (กรัม)	0	0
12:0 (กรัม)	0.001	0
14:0 (กรัม)	0.003	0.002
16:0 (กรัม)	0.154	0.069

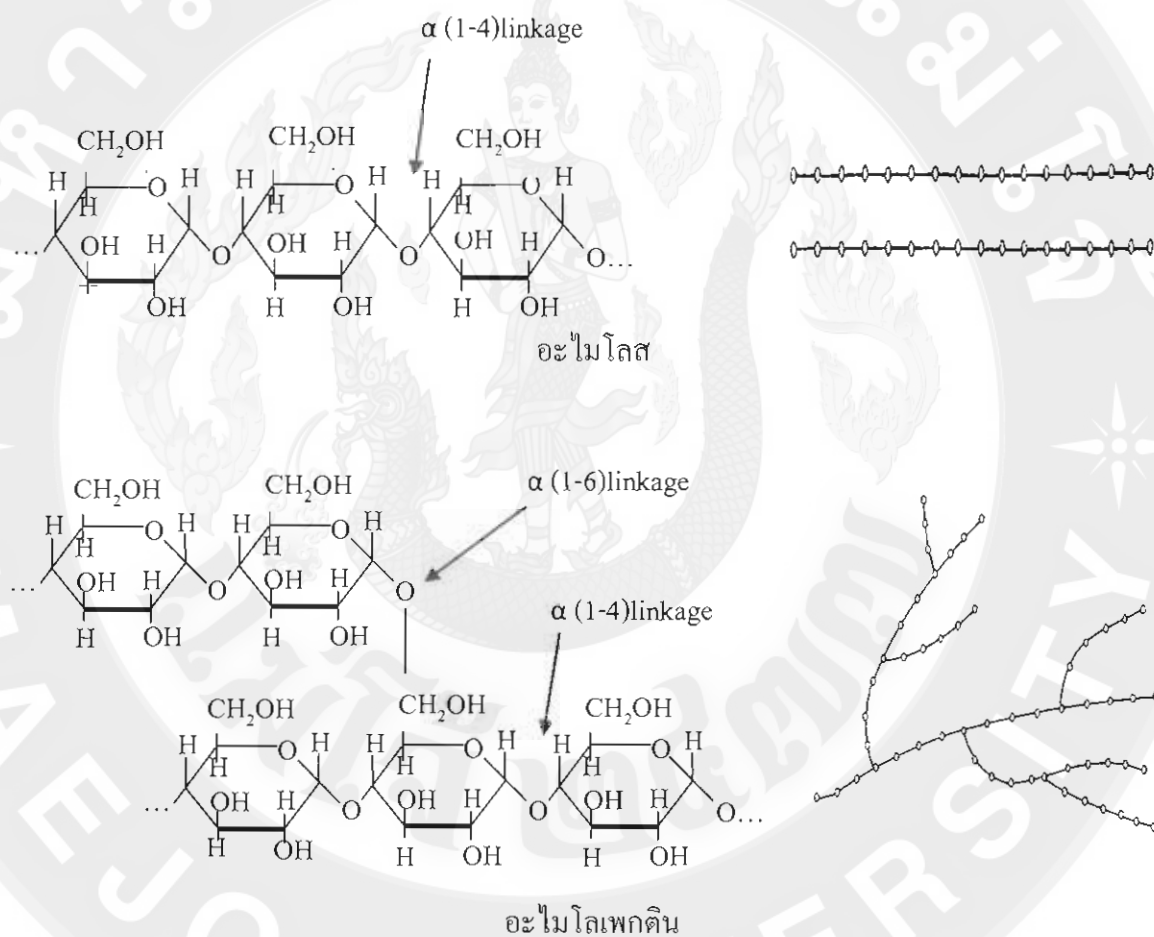
ตาราง 1 (ต่อ)

องค์ประกอบสารอาหาร	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว
ไขมัน		
18:0 (กรัม)	0.016	0.005
กรดไขมัน, มอโนอันแซททูเรตทั้งหมด (กรัม)	0.327	0.088
16:1 (กรัม)	0.003	0.001
18:1 (กรัม)	0.323	0.087
กรดไขมัน, พอลิอันแซททูเรตทั้งหมด (กรัม)	0.323	0.076
18:2 (กรัม)	0.309	0.062
18:3 (กรัม)	0.014	0.013
คลอเลสเตอรอล (มิลลิกรัม)	0	0
กรดแอมิโน		
ทริปโทเฟน (กรัม)	0.033	0.031
ทรีโอนิน (กรัม)	0.095	0.096
ไอโซลิวซีน (กรัม)	0.109	0.116
ลิวซีน (กรัม)	0.214	0.222
ไลซีน (กรัม)	0.099	0.097
เมไทโอนิน (กรัม)	0.058	0.063
ซีสทีน (กรัม)	0.031	0.055
เฟนิลอะลานีน (กรัม)	0.133	0.144
ไทโรซีน (กรัม)	0.097	0.090
วาเลอีน (กรัม)	0.151	0.164
อาร์จินีน (กรัม)	0.196	0.224
ฮิสทีดีน (กรัม)	0.066	0.063
อะลานีน (กรัม)	0.151	0.156
กรดแอสพาร์ติก (กรัม)	0.242	0.253
กรดกลูตามิก (กรัม)	0.526	0.524
ไกลซีน (กรัม)	0.127	0.122
โพรลีน (กรัม)	0.121	0.127
เซอรีน (กรัม)	0.134	0.141

ที่มา: อรอนงค์ นัยวิกุล (2550)

องค์ประกอบของสตาร์ชภายในเมล็ดข้าว

ภายในเมล็ดข้าวมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือแป้งซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูงทั่วไป นิยมเรียกว่า สตาร์ช (starch) พบมากในใบ และส่วนที่ใช้เป็นแหล่งสะสมอาหาร โดยภายในสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสทั้งหมด 2 ชนิดคือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกทิน) ดังแสดงในภาพ 3



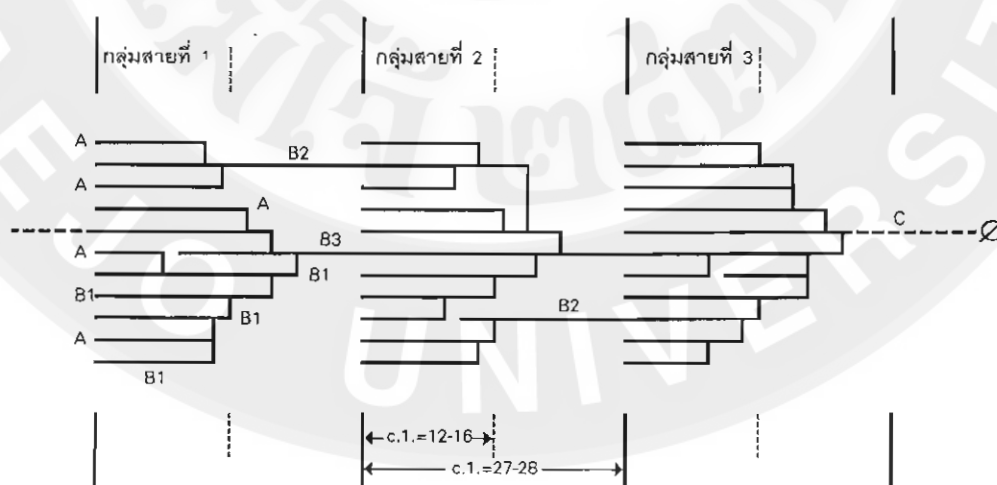
ภาพ 3 โครงสร้างอะไมโลสและอะไมโลเพกทิน

ที่มา: สุนีย์ (2546)

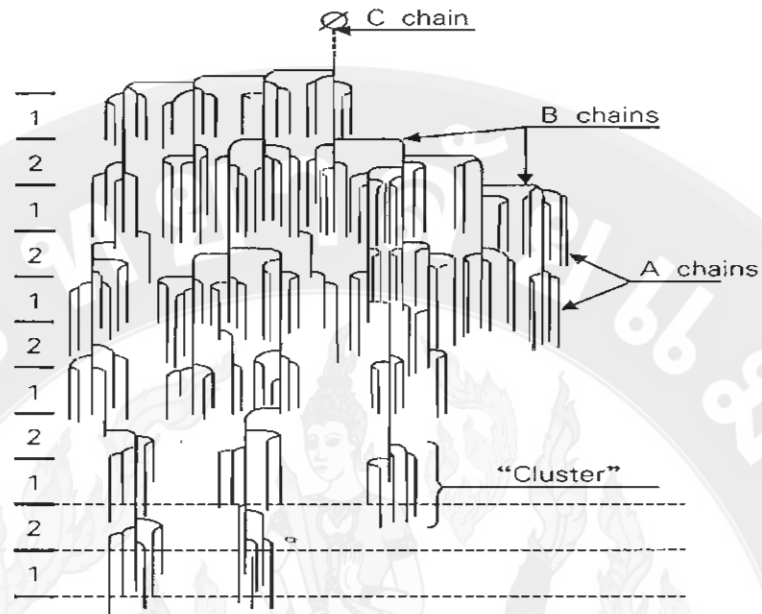
1. อะไมโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบไปด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4 (α -1,4) ไจทิพย์และผดุงศักดิ์ (2547) รายงานว่าในส่วนของอะไมโลสจะเป็นส่วนที่มีผลทำให้ข้าวสุกนุ่มและแข็งกระด้าง อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ โดยอะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystal line) ในแป้งสาลีพบอะไมโลส อยู่ในส่วนอสัณฐาน ในแป้งมันฝรั่งพบอะไมโลสอยู่ร่วมกับอะไมโลเพกทินในส่วนผลึก โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบคือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) ลักษณะเป็นเกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวอย่างอะไมโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะไมโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดของโมเลกุลด้วย อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500-160,000 จะอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวคู่ที่แข็ง ส่วนอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะอยู่ในลักษณะเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้

2. อะไมโลเพกทิน (amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งที่ประกอบไปด้วยกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วย โดยมีส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 ซึ่งหน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพกทินทั้งหมด ไจทิพย์และผดุงศักดิ์ (2547) รายงานว่าในส่วนของอะไมโลเพกทินจะเป็นส่วนที่มีผลทำให้ข้าวสุกเหนียวและติดกันเป็นก้อน ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 - 10^9 คาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวที่ต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง โดยลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพกทินจะประกอบด้วยสายโซ่ทั้งหมด 3 ชนิดคือ สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ อยู่ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะไมโลเพกทินประกอบไปด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วนประมาณ 0.8-0.9 : 1 สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่วิวติง 1 หมู่ ในอะไมโลเพกทินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

Hizukuri (1986 อ้างโดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550) แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างของอะไมโลเพกตินดังภาพ 4 มีอัตราส่วนของสาย A และสาย B เท่ากับ 0.8-0.9 : 1 และมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการย่อย (amylolysis) ของอะไมโลเพกติน จากโครงสร้างของอะไมโลเพกติน ลักษณะสาย A และสาย B1 จะประกอบเป็นกลุ่มเดี่ยว สำหรับสาย B2 และสาย B3 มีความยาวของสายแผ่ออกไปทำให้เกิดเป็นกลุ่มสาย 2 และ 3 ตามลำดับ โดยสาย A, B1 และ B2 จะมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 6-12, 13-24 และ 25-45 ตามลำดับ ขณะที่ Robin *et al.* (1974 อ้างโดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพกตินโดยใช้เอนไซม์ที่ย่อยพันธะกิ่ง (debranching enzyme) และเบต้าอะไมเลส (β -amylase) ที่ย่อยอะไมโลเพกตินจากมันฝรั่ง แสดงโครงสร้างของอะไมโลเพกตินดังภาพ 5 โดยส่วนที่หนึ่งแสดงถึงส่วนผลึก (crystallite region) ส่วนที่สองที่เป็นส่วนที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งเชื่อมแสดงถึงส่วนอสัณฐาน สำหรับอะไมโลเพกตินของแป้งข้าวเจ้า ข้าวเหนียว มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง สายส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80-90 ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยว ๆ และสายที่เหลืออีกร้อยละ 10-20 จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบด้วยสายประมาณ 22-25 สายทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะไมโลเพกตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้ง มีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาคัด้วยกรดเอนไซม์ ลักษณะโครงสร้างที่เป็นเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินบริเวณสาย A และสาย B1 แสดงดังภาพ 6

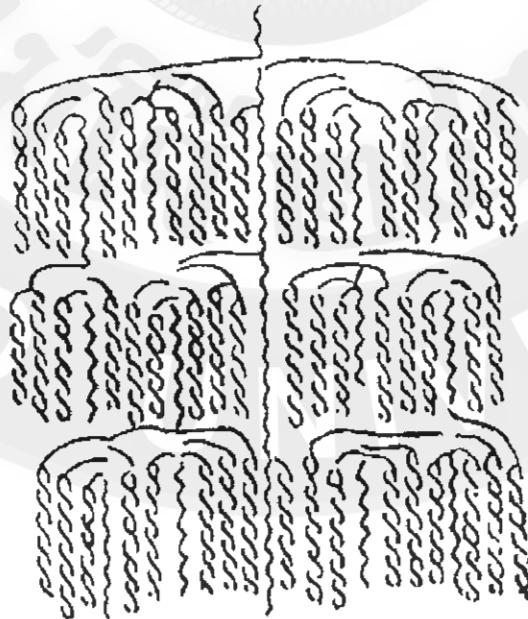


ภาพ 4 ลักษณะโครงสร้างและอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C
ที่มา: Hizukuri (1986 อ้างโดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)



ภาพ 5 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน
(1 = ส่วนผลึก, 2 = ส่วนอสัณฐาน)

ที่มา: Robin *et al.* (1974 อ้างโดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)



ภาพ 6 ลักษณะโครงสร้างเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินในบริเวณสาย A และ B1

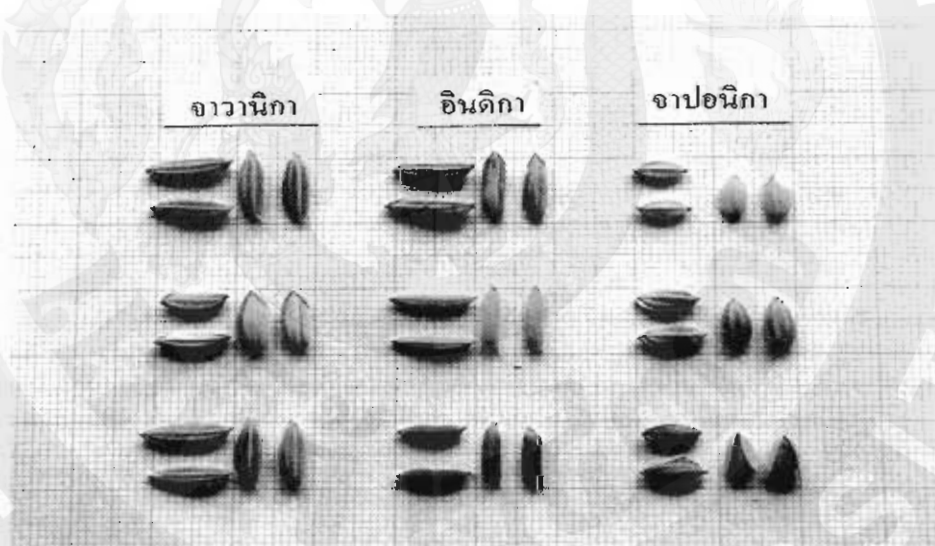
ที่มา: Hizukuri (1986 อ้างโดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)

ชนิดของข้าว

พีชยา (2541) รายงานว่าข้าวเป็นธัญชาติชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในตระกูล Gramineae ซึ่งมีสปีชีส์มากกว่า 60 ชนิด แต่ที่รู้จักกันทั่วไปคือ สปีชีส์ *Oryza sativa* โดยชนิดของข้าวสามารถแบ่งตามลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

1. แบ่งตามขนาดและรูปร่างของเมล็ด

ขนาดและรูปร่างเป็นสิ่งจำเป็นและแยกออกจากกันไม่ได้ในการนำมาอธิบายลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ โดยจะแตกต่างกันไปตามสภาพบรรยากาศของภูมิภาคภูมิอากาศ และวิธีการเพาะปลูก ขนาดของเมล็ด หมายถึง ความยาว ความกว้าง และความหนา เช่น ยาว ปานกลาง สั้น เป็นต้น ส่วนรูปร่าง หมายถึง ความยาว และความกว้าง เช่น กลม เป็น เหลี่ยม เป็นต้น โดยแบ่งได้ ดังนี้



ภาพ 7 ลักษณะเมล็ดข้าวแบ่งตามขนาดและรูปร่าง
ที่มา: อรอนงค์ (2550)

1.1 กลุ่มข้าวจาวานิกา (javanica rice) ได้แก่ ข้าวที่มีเมล็ดยาว และป้อม ปลูกทั่วไปบริเวณเส้นศูนย์สูตร เช่น ประเทศอินโดนีเซีย พม่า เป็นต้น

1.2 กลุ่มข้าวอินดิกา (indica rice) ได้แก่ ข้าวที่มีเมล็ดยาว และเรียวยาว ปลูกทั่วไปบริเวณเขตร้อน เช่น ประเทศไทย อินเดีย เป็นต้น

1.3 กลุ่มข้าวจาปอนิกา (japonica rice) ได้แก่ ข้าวที่มีเมล็ดสั้น และป้อม ปลูกทั่วไปบริเวณเขตกึ่งร้อน เขตอบอุ่น และเขตอากาศเย็น เช่น ประเทศญี่ปุ่น เกาหลี เป็นต้น

ขณะที่ Sharp (1991) แบ่งชนิดของข้าวตามความยาวเป็น 3 ระดับคือ ข้าวเมล็ดยาว ข้าวเมล็ดยาวปานกลาง และข้าวเมล็ดสั้น โดยข้าวเมล็ดยาวมีความยาวของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาวมากกว่า 3.4, 3.1 และ 3.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนข้าวเมล็ดยาวปานกลางมีความยาวอยู่ในช่วง 2.3-3.3, 2.1-3.0 และ 2.0-2.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับข้าวเมล็ดสั้นมีความยาวต่ำกว่า 2.2, 2.0 และ 1.9 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวมีผลต่ออัตราการดูดซึมน้ำในระหว่างการหุงต้มของข้าว ดังผลการวิจัยของ Ali *et al.* (1994) ซึ่งศึกษาขนาดและรูปร่างของเมล็ดพบว่าเมล็ดข้าวที่มีพื้นที่ผิวต่ำกว่า 14 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม มีอัตราการดูดซึมน้ำน้อยกว่าเมล็ดข้าวที่มีพื้นที่ผิว 16-17 และ 17-19 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

2. แบ่งตามอายุข้าว

ข้าวที่ปลูกจะมีอายุการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน โดยดูได้จากช่วงเวลาของการออกดอก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

2.1 ข้าวเบา หมายถึง ข้าวที่มีอายุสั้นประมาณ 90-100 วัน ซึ่งจะออกดอกให้เก็บเกี่ยวได้ในตอนต้นปีของฤดูการทำนาระหว่างเดือนกันยายน-ตุลาคม

2.2 ข้าวกลาง หมายถึง ข้าวที่มีอายุปานกลางประมาณ 100-120 วัน ซึ่งจะออกดอกให้เก็บเกี่ยวได้ในตอนกลางปีของฤดูการทำนาระหว่างเดือนตุลาคม-พฤศจิกายน

2.3 ข้าวหนัก หมายถึง ข้าวที่มีอายุมากประมาณ 120 วันขึ้นไป ซึ่งจะออกดอกให้เก็บเกี่ยวได้ในตอนปลายปีของฤดูการทำนาระหว่างเดือนธันวาคม-มกราคม

3. แบ่งตามความไวของแสง

ข้าวที่ปลูกจะมีความไวต่อแสงที่แตกต่างกัน โดยดูได้จากช่วงเวลาของการออกดอกซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

3.1 ข้าวไวแสง หมายถึง ข้าวที่มีกำหนดการออกดอกอย่างแน่นอน หรือเกิดการคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย เป็นข้าวปลูกในฤดูนาปีเท่านั้น เพราะจะออกดอกในเวลากลางวันสั้นกว่ากลางวัน ต้องปลูกในฤดูฝนเพื่อให้ออกดอกต้นฤดูหนาว หรือระหว่างฤดูหนาวซึ่งช่วงเวลากลางวันสั้นกว่า 12 ชั่วโมง จึงจัดอยู่ในกลุ่มพืชวันสั้น ซึ่งมี 2 แบบคือ ข้าวที่มีความไวต่อแสงมาก และข้าวที่มีความไวต่อแสงน้อย มีอายุการเก็บเกี่ยวต่างกัน เป็นข้าวเบา ข้าวกลาง และข้าวหนัก ซึ่งข้าวพันธุ์พื้นเมืองของประเทศไทยเกือบทุกพันธุ์มีลักษณะดังกล่าว

3.2 ข้าวไม่ไวแสง หมายถึง ข้าวที่มีกำหนดการออกดอกตามอายุ สามารถปลูกได้ตลอดปีเมื่อมีน้ำเพียงพอ ไม่มีอิทธิพลของช่วงแสงมาเกี่ยวข้องกับการออกดอก มีกำหนดของวันปลูกและวันเก็บเกี่ยวแน่นอน สามารถปลูกได้ดีในฤดูนาปรัง หรือช่วงฤดูร้อน เพราะมีแสงแดดมากกว่าฤดูอื่น ๆ มีอายุการปลูกตั้งแต่ 110-150 วัน

4. แบ่งตามฤดูกาลผลิต

ข้าวที่ปลูกจะมีฤดูกาลผลิตที่แตกต่างกัน โดยดูได้จากช่วงเวลาของการทำนาซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

4.1 ข้าวนาปี คือนาข้าวที่ทำในช่วงเดือนเมษายนจนถึงกุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นฤดูกาลทำนาปกติ พันธุ์ข้าวนาปีจะออกดอกตามวันและเดือนที่แน่นอน เนื่องจากช่วงของแสงต่อวันบังคับ โดยตามปกติจะสามารถแบ่งวันหนึ่งออกได้เป็น กลางวัน 12 ชั่วโมง กลางคืน 12 ชั่วโมง แต่เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก จึงทำให้แต่ละส่วนของโลก ได้รับแสงอาทิตย์ในแต่ละวันไม่เท่ากัน ทำให้เมื่อช่วงของวันยาวขึ้นข้าวก็จะเจริญเติบโตทางลำต้น ไม่ออกรวง หรือถ้าออกรวงได้ก็ไม่พร้อมกันในคืนเดียว บางรวงก็แก่โน้มลง บางรวงก็เพิ่งตั้งท้อง จนเมื่อช่วงของวันเริ่มสั้นลง ข้าวพวกนี้จะออกรวง ดังนั้นการทำนาลำช้า เช่น ปักดำในเดือนตุลาคม ต้นข้าวจะเตี้ย แดกกอน้อย รวงของข้าวเล็ก เพราะยังไม่ทันเจริญทางลำต้นก็ต้องมาเจริญทางพันธุ์ นั่นคือ วันสั้นยาวมีผลต่อการออกรวงของข้าวจึงเรียกข้าวประเภทนี้ว่า ข้าวนาปี หรือ ข้าวไวแสง ซึ่งเป็นข้าวที่ออกตามฤดูกาล

4.2 ข้าวนาปรัง คือนาข้าวที่ทำในช่วงนอกฤดูทำนาเพราะในฤดูทำนาจะมีน้ำมากเกินไป โดยข้าวที่ใช้จะเป็นข้าวที่แสงไม่มีอิทธิพลต่อการออกดอก ดังนั้นเราจึงเรียกข้าวนาปรังว่าเป็นข้าวไม่ไวแสง ซึ่งเป็นข้าวที่ออกตามอายุ ไม่ว่าจะปลูกเมื่อใด พอครบอายุก็จะเก็บเกี่ยวได้

กระบวนการสีข้าว

คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร (2546) รายงานไว้ว่า กระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนคือ การทำความสะอาด (cleaning) การกะเทาะเปลือก (hulling) การขัดขาว (whitening) และการคัดคุณภาพ (grading) โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้

1. การทำความสะอาด

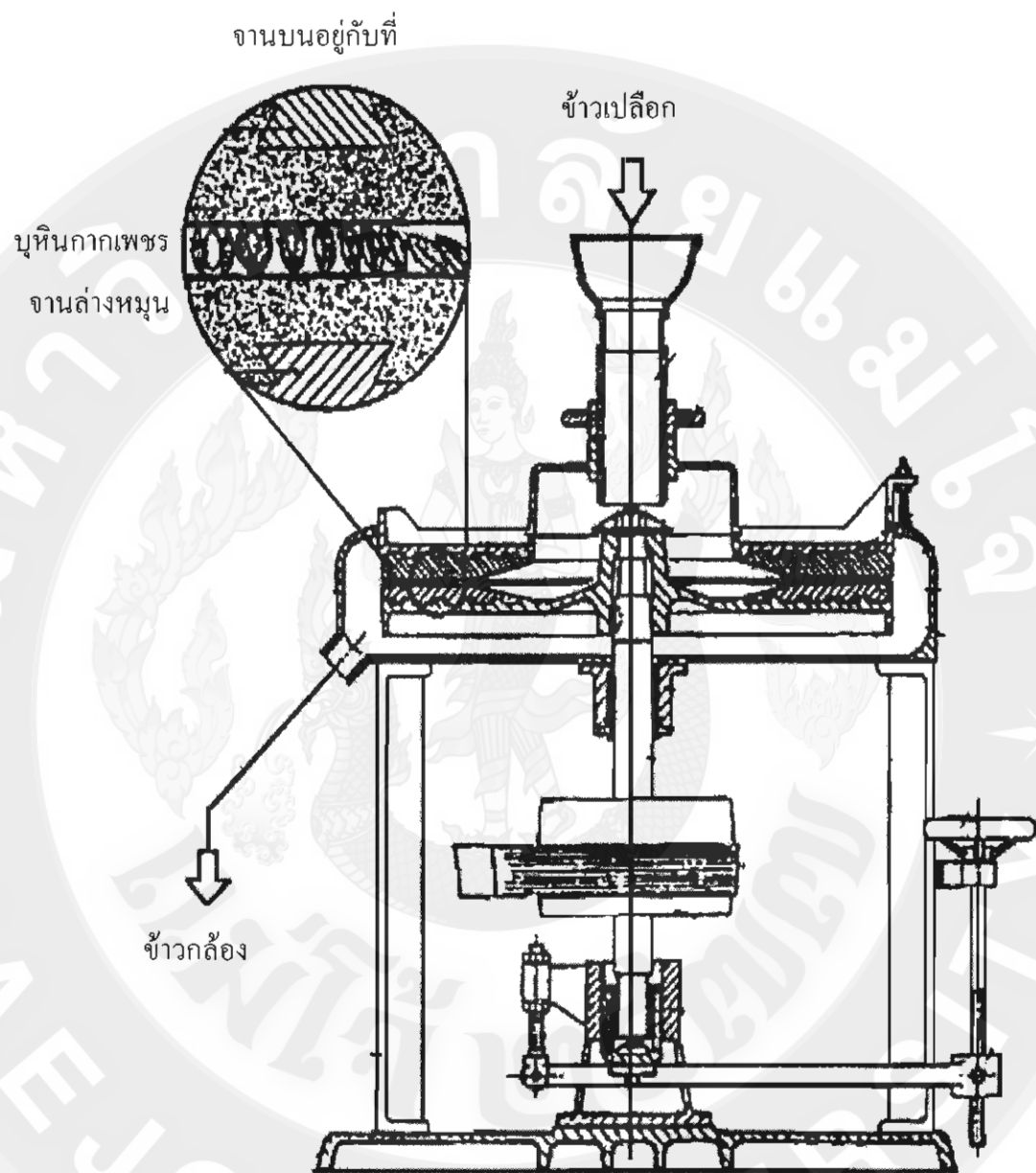
ความหมายของการทำความสะอาดนั้น หมายถึง การกำจัดแร่แข็ง ใบข้าว เมล็ดวัชพืช และสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เมล็ดข้าวเปลือกออก โดยเครื่องทำความสะอาดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ เครื่องลมเป่าใช้เพื่อคัดฝุ่นผงหรือสิ่งเจือปนที่เบากว่าข้าวเปลือกออก และตะแกรงใช้เพื่อแยกส่วนที่หนักหรือส่วนที่มีรูปร่างไม่เหมือนเมล็ดข้าวออก ขณะที่เครื่องลมเป่าคัดสิ่งเจือปนที่เบาออกไปนั้น ข้าวเปลือกและสิ่งเจือปนที่หนักก็จะตกลงสู่ลูกกลิ้งทรงกระบอกวางในแนวนอน ซึ่งที่ผิวลูกกลิ้งจะมีลักษณะเป็นตะแกรงมีช่องขนาดเล็กให้สิ่งที่เป็นผงขนาดเล็กแต่หนักลมเป่าไม่ได้ลอดผ่านออกไป ส่วนที่เหลือจะตกลงสู่ลูกกลิ้งตะแกรงชั้นล่างที่มีช่องให้ข้าวเปลือกผ่านได้แต่สิ่งเจือปนที่ใหญ่กว่าข้าวเปลือกผ่านไม่ได้ ทำให้ได้ข้าวเปลือกที่สะอาดและแยกออกมา ดังแสดงในภาพ 8 นอกจากนี้กระบวนการทำความสะอาดยังสามารถช่วยป้องกันและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องกะเทาะเปลือกได้อีกด้วย



ภาพ 8 เครื่องทำความสะอาดด้วยลมเป่าและลูกกลิ้งหมุนแบบเยอรมัน
ที่มา: Shengyan (1998 อ้างโดย อรอนงค์, 2550)

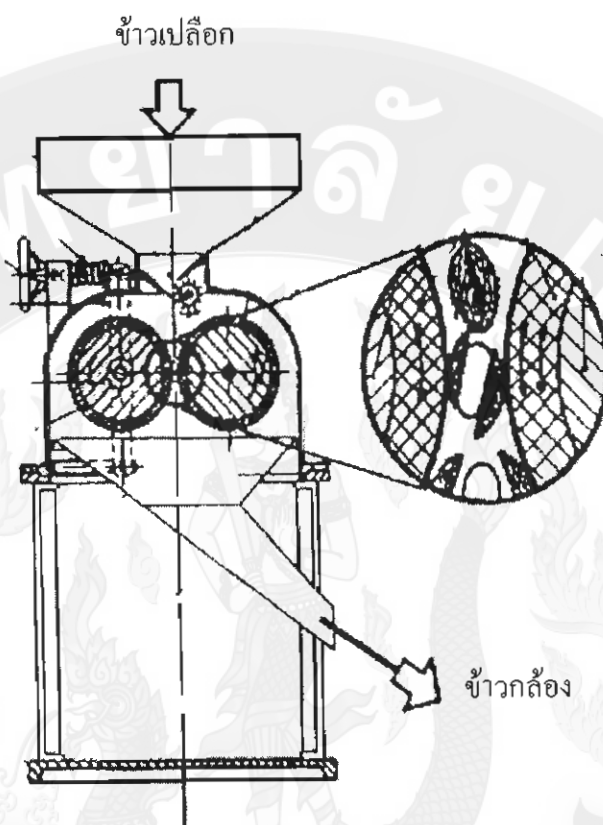
2. การกะเทาะเปลือก

ความหมายของการกะเทาะเปลือกนั้น หมายถึง การแยกเปลือกแข็งที่หุ้มเมล็ดออก โดยใช้เครื่องกะเทาะเปลือกซึ่งประกอบด้วยลูกกลิ้งยางทั้งหมด 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยอัตราเร็วที่ไม่เท่ากันทำให้เกิดแรงดึงแยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าว ดังแสดงในภาพ 9 หรือใช้เครื่องกะเทาะเปลือกที่ทำด้วยแผ่นเหล็กหรือจานเหล็ก 2 แผ่นประกบกัน ด้านในของแผ่นจานบุด้วยหินหยาบทั้ง 2 แผ่น เมื่อใช้งานแผ่นล่างจะหมุนขณะที่แผ่นบนอยู่กับที่ทำให้เกิดแรงดึงแยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าว ดังแสดงในภาพ 10 ซึ่งขั้นตอนของการกะเทาะเปลือกข้าวนี้จะได้ข้าวกล้องและเกลบออกมาโดยจะมีปริมาณของเกลบอยู่ประมาณร้อยละ 20-24 ของข้าวเปลือก



ภาพ 9 เครื่องกะเทาะเปลือกแบบหินโม

ที่มา: Hadziyev (1991 อ้างโดย อรอนงค์, 2550)

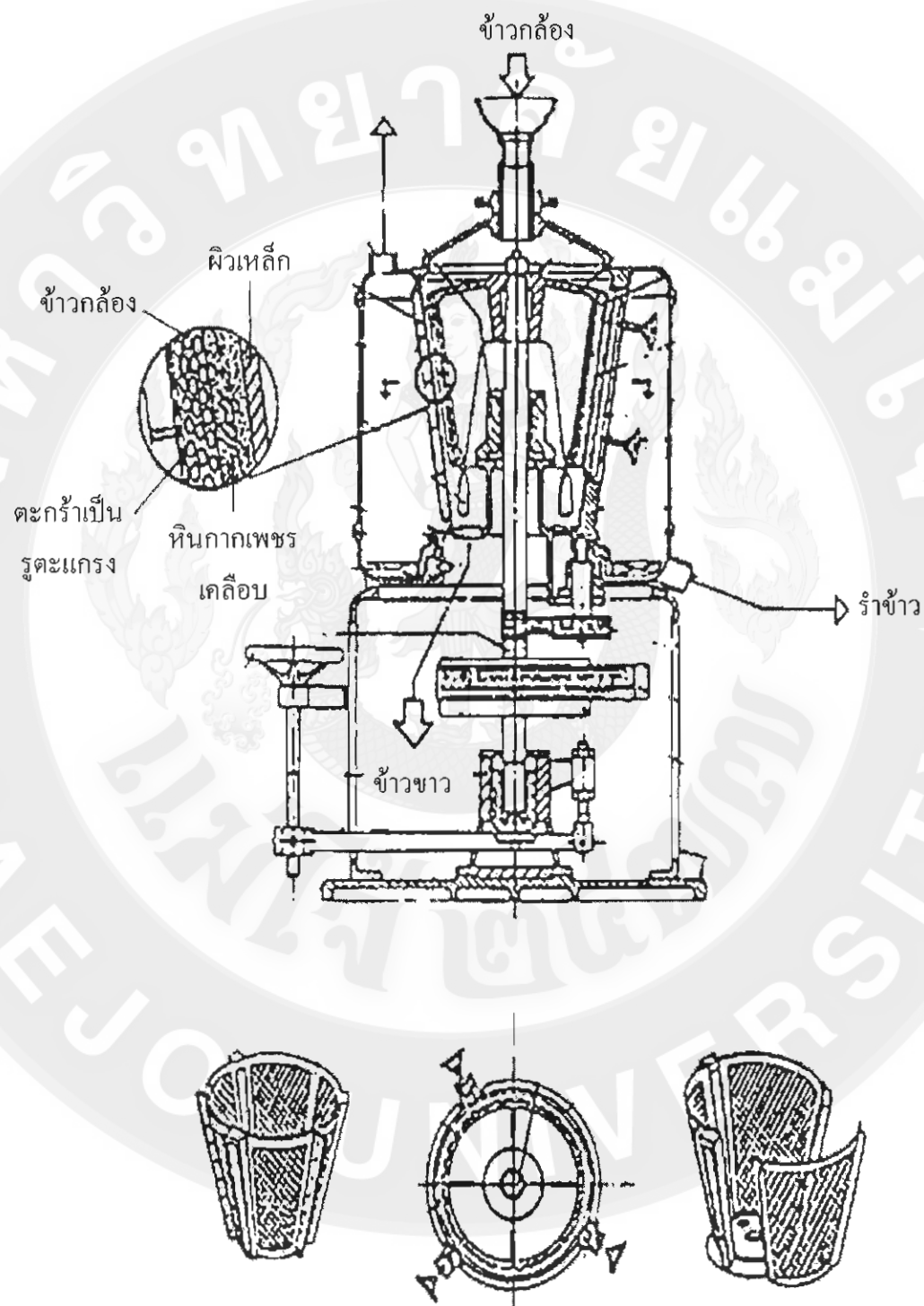


ภาพ 10 เครื่องกะเทาะเปลือกแบบลูกกลิ้ง

ที่มา: Hadziyev (1991 อ้างโดย อรอนงค์, 2550)

3. การขัดขาว

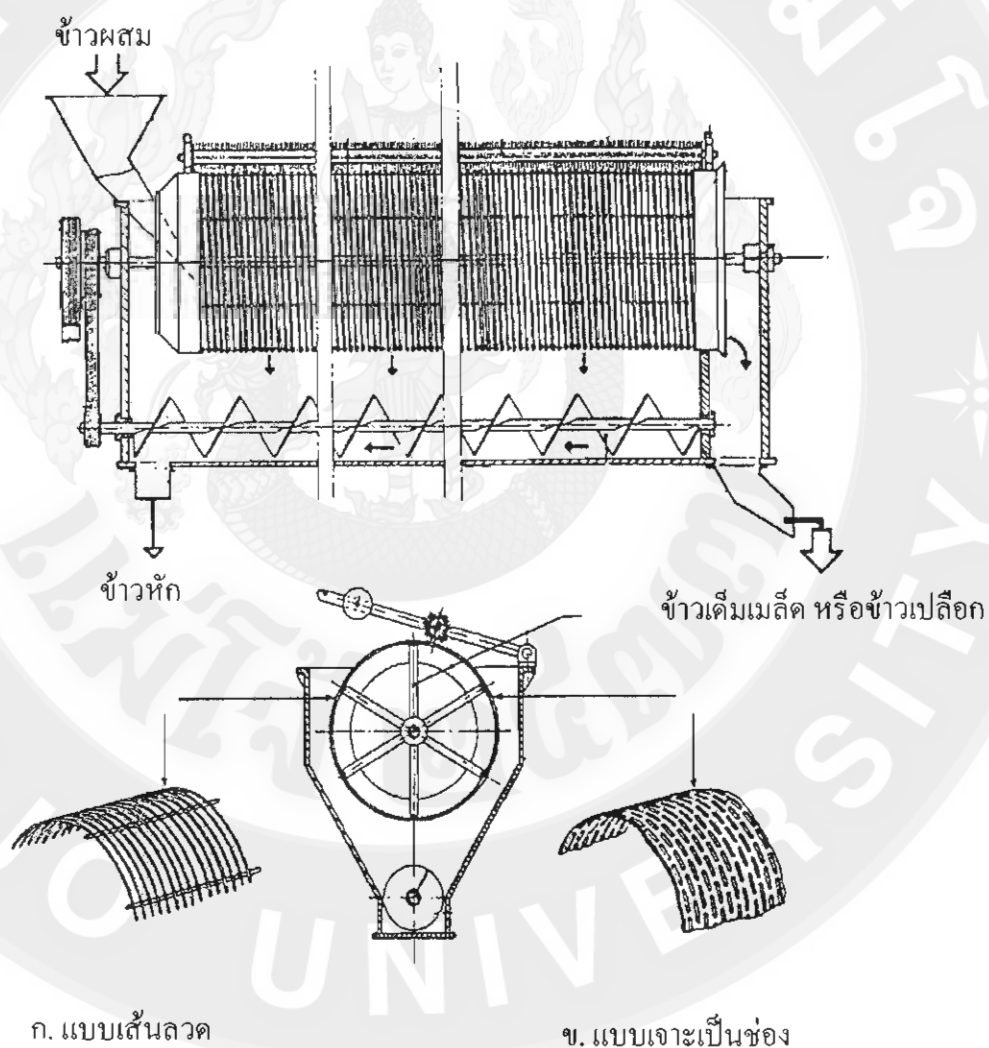
ความหมายของการขัดขาวนั้น หมายถึง การทำให้รำหลุดออกจากเมล็ดข้าวกล้อง เนื่องจากผู้บริโภคนิยมรับประทานข้าวขาวมากกว่าข้าวกล้อง จึงต้องทำการขัดผิวข้าวกล้องให้ขาวด้วยเครื่องขัดผิว ซึ่งใช้หลักการหมุนเหวี่ยงเมล็ดข้าวกับผิวเครื่อง โดยเครื่องขัดขาวนี้จะมีลักษณะคล้ายกรวยหมุนเมื่อเครื่องทำงานกรวยจะหมุนและเกิดเป็นแรงเหวี่ยงเพื่อแยกเมล็ดข้าวและรำออกจากกัน ดังแสดงในภาพ 11 ในการขัดขาวนั้นควรใช้เครื่องขัดผิว 3-4 ชุดต่อกัน เพื่อลดอัตราการขัดผิวข้าวไม่ให้มีมากเกินไปจนทำให้เกิดข้าวหักหรือทำให้เกิดความร้อนเพิ่มมากขึ้นจนไปทำลายคุณภาพของข้าว ในการขัดขาวนี้จะได้ข้าวสารและรำออกมาโดยจะมีปริมาณของข้าวสารและรำอยู่ประมาณร้อยละ 68-70 และ 8-10 ของข้าวเปลือก ตามลำดับ



ภาพ 11 เครื่องขัดข้าวแนวตั้งแบบชุดฟิวเหล็กข้าว
ที่มา: Hadziyev (1991 อ้างโดย อรอนงค์, 2550)

4. การคัดคุณภาพ

ความหมายของการคัดคุณภาพนั้น หมายถึง การแยกข้าวสารเต็มเมล็ดออกจากข้าวหัก และปลายข้าว โดยใช้หลักการของความหนาที่มีในเมล็ดข้าวแยกเมล็ดข้าวออกเป็นขนาดต่าง ๆ โดยลูกกลิ้งจะหมุนเพื่อแยกส่วนที่ค้างอยู่บนร่องออกจากส่วนที่ผ่านร่องไปได้ ดังแสดงในภาพ 12 ทำให้ได้ข้าวสารที่มีคุณภาพแตกต่างกัน เช่น ข้าวสารเจ้า 100 เปอร์เซ็นต์ ข้าวสารเจ้า 5 เปอร์เซ็นต์ ข้าวสารละ เป็นต้น



ภาพ 12 เครื่องคัดขนาดโดยใช้ความหนาของเมล็ดข้าวแบบลูกกลิ้ง
ที่มา: Van Ruiten (1981 อ้างโดย อรอนงค์, 2550)

คุณภาพของข้าวสาร

ในขั้นตอนการผลิตข้าวนอกจากจะต้องคำนึงถึงผลผลิตที่ได้แล้วยังต้องคำนึงถึงคุณภาพของเมล็ดข้าวที่ได้ด้วย ซึ่งคุณสมบัติของเมล็ดข้าวนั้น หมายถึง คุณภาพทั่วไปของเมล็ดข้าว ทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางเคมีกายภาพ สุนีย์ (2546) รายงานว่าคุณภาพข้าวสารแบ่งออกเป็นคุณภาพทางกายภาพ ทางเคมี และทางเคมีกายภาพ โดยแสดงรายละเอียดของแต่ละส่วนไว้ ดังนี้

1. คุณภาพทางกายภาพ

คุณภาพทางกายภาพ เป็นคุณสมบัติภายนอกต่าง ๆ ที่สามารถมองเห็น ชั่งตวง หรือ วัดได้ ประกอบด้วย น้ำหนักเมล็ด (grain weight) สีของเมล็ดข้าวเปลือก (hull color) ขนาดและรูปร่างเมล็ด (grain dimension) ลักษณะท้องไข (chalkiness) ความขาวของเมล็ด (whiteness of milled rice) ความใสขุ่นของเมล็ด (grain translucency) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้

1.1 น้ำหนักเมล็ด เป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางพันธุกรรม และสามารถแปรปรวนได้ตามสภาพแวดล้อม เช่น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย สภาพภูมิอากาศ เป็นต้น การประเมินน้ำหนักข้าวสามารถทำได้ 2 วิธีคือ น้ำหนักต่อปริมาตรประเมินโดยการชั่งน้ำหนักข้าวด้วยปริมาตรที่คงที่เป็นกรัมต่อลิตร หรือ กิโลกรัมต่อถัง และน้ำหนักต่อจำนวนเมล็ดประเมินโดยการชั่งน้ำหนักข้าวด้วยจำนวนเมล็ดที่คงที่ เป็นกรัมต่อ 100 เมล็ด หรือ กรัมต่อ 1,000 เมล็ด

1.2 สีของเมล็ดข้าวเปลือก เป็นลักษณะเฉพาะของข้าวแต่ละพันธุ์ สีของเมล็ดข้าวเปลือกจะมีลักษณะแตกต่างกันตามความอ่อนแก่ เช่น เมล็ดข้าวเมื่อยยังอ่อนมีเปลือกสีขาวเมื่อสุกมีเปลือกสีเหลืองทอง หรือเมล็ดข้าวเมื่ออ่อนจะมีสีเปลือกแตกต่างกันแต่เมื่อแก่เปลือกจะเปลี่ยนเป็นสีเดียวกันทั้งหมด สีของเมล็ดข้าวเปลือกที่พบโดยทั่วไปมีทั้งสีขาว สีฟาง สีน้ำตาลอ่อนถึงเข้ม ร่องสีน้ำตาล สีกระน้ำตาล สีน้ำตาลแดง สีม่วงจนถึงสีดำ

1.3 ขนาดและรูปร่างเมล็ด เป็นลักษณะเฉพาะของข้าวในแต่ละพันธุ์ มีลักษณะแตกต่างกันตามพันธุ์ และสภาพพื้นที่ปลูก มักใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการซื้อขายข้าวโดยวัดขนาดเป็นความยาว วัดรูปร่างเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง ซึ่งขนาดและรูปร่างเมล็ดประกอบด้วย ความยาว (length) ความกว้าง (width) และความหนา (thickness) โดยการแบ่งขนาดเมล็ดแสดงไว้ดังตาราง 2 และการแบ่งรูปร่างเมล็ดแสดงไว้ดังตาราง 3

ตาราง 2 ขนาดเมล็ดแบ่งตามความยาว

ขนาดเมล็ด	ความยาว (มิลลิเมตร)
ยาวมาก	มากกว่า 7.50
ยาว	7.06-7.50
ค่อนข้างยาว	6.61-7.06
ปานกลาง	6.10-6.61
ค่อนข้างสั้น	5.51-6.10
สั้น	น้อยกว่า 5.50

ที่มา: สุนีย์ เสริมศิริ โสภณ (2546)

ตาราง 3 รูปร่างเมล็ดแบ่งตามสัดส่วนความยาว/ความกว้าง

รูปร่างเมล็ด	ความยาว/ความกว้าง (มิลลิเมตร)
เรียวยาว	มากกว่า 3.00 ขึ้นไป
ปานกลาง	2.10-3.00
ป้อม	น้อยกว่า 2.00

ที่มา: สุนีย์ เสริมศิริ โสภณ (2546)

1.4 ลักษณะท้องไข่ เป็นข้าวที่มีลักษณะเป็นจุดขุนขาวคล้ายชอล์ก เกิดขึ้นที่บริเวณของเนื้อเมล็ดบริเวณส่วนที่เป็นแป้ง โดยเกิดจากการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ ของเม็ดแป้งกับโปรตีนมีทั้งหมด 3 ลักษณะคือ จุดขาวขุนตรงกลางของเนื้อเมล็ดข้าวสาร (white center) จุดขาวขุนด้านข้างหรือด้านท้องของเมล็ด ซึ่งเป็นด้านเดียวกับคัพพะ (white belly) และจุดขาวขุนด้านหลังของเมล็ดข้าวสาร ซึ่งเป็นด้านตรงข้ามกับคัพพะ (white back) ข้าวท้องไข่ไม่มีผลต่อคุณภาพในการหุงต้มและการรับประทาน แต่มีผลต่อความต้องการทางการค้าเนื่องจากเมื่อนำข้าวท้องไข่ไปขัดสีจะทำให้มีข้าวหักมากส่งผลให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดน้อย

1.5 ความขาวของเมล็ด เป็นลักษณะของข้าวที่ผ่านการขัดสีจนเป็นข้าวสารซึ่งจะมีสีเป็นสีขาวเสมอ เพราะเหลือแต่ส่วนของเนื้อเมล็ดที่เป็นแป้งเท่านั้น (endosperm) แต่ข้าวสารอาจมีความขาวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการสี องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดข้าว ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวเปลือก เป็นต้น

1.6 ความใสขุ่นของเมล็ด เป็นลักษณะของความทึบแสงหรือความโปร่งใสของเนื้อข้าวสารทั้งเมล็ดเกิดจากพันธู์ข้าวและสภาพพื้นที่ปลูก ซึ่งแตกต่างกับลักษณะท้องไข่ลักษณะนี้สามารถสังเกตความแตกต่างได้ในเมล็ดข้าวเจ้า เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีเมล็ดใสกว่าที่ปลูกในภาคกลาง

2. คุณภาพทางเคมี

คุณภาพทางเคมี เป็นคุณสมบัติภายในที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวทั้งในลักษณะข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้

2.1 คาร์โบไฮเดรต เป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสตาร์ช เป็นองค์ประกอบหลักพบมากที่สุด ในเนื้อของเมล็ดข้าว ประกอบด้วย อะไมโลส และอะไมโลเพกติน อะไมโลส ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์แบบเชิงเส้น และเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติต่างกัน ส่วนปริมาณอะไมโลเพกติน ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นแบบพอลิเมอร์เชิงกิ่ง เป็นส่วนประกอบหลักในแป้งข้าวที่มีผลต่อคุณภาพและเนื้อสัมผัสของข้าวสุก โดยอะไมโลเพกตินที่มีสายยาวจะมีความสามารถในการจับกับองค์ประกอบอื่นที่อยู่ในเมล็ดข้าวได้มากกว่าอะไมโลเพกตินสายสั้นจึงมีผลต่อการยับยั้งความนุ่มของข้าวสุก (สุนีย์, 2546) กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ อะไมโลเพกตินที่มีสายสั้นจะทำให้ข้าวสุกมีความนุ่มมากกว่าอะไมโลเพกตินที่มีสายยาว

2.2 โปรตีน เป็นสารพอลิเมอร์ของกรดอะมิโนที่สำคัญต่อลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร โดยทั่วไปโปรตีนที่มีอยู่ในข้าวจะเกิดขึ้นตามส่วนต่าง ๆ ของเมล็ด และมีมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด ปริมาณโปรตีนที่มีจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธู์ของข้าว โปรตีนในข้าวมีลักษณะโครงสร้างอยู่ทั้งหมด 3 แบบคือ แบบผลึก แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และแบบรูปร่างกลมขนาดใหญ่ เนื่องจากโปรตีนที่มีอยู่ในเนื้อเมล็ดจะแทรกอยู่ระหว่างเมล็ดสตาร์ช ทำให้มีผลต่อการเกิดเจลลาทีไนซ์ของเมล็ดสตาร์ช โดยทำให้การพองตัวของเมล็ดสตาร์ชไม่เสียรูปร่างได้ง่าย และทำให้โมเลกุลของอะไมโลสไม่ซึมผ่านออกไป มีผลต่อลักษณะความอ่อนหรือแข็งของเจลเมื่อเย็นลง และส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกที่มีลักษณะนุ่ม เหนียว หรือร่วน (อรอนงค์, 2550)

2.3 ไขมัน เป็นสารอินทรีย์ที่ทำให้อาหารมีกลิ่นรส และเนื้อสัมผัสที่ดี ประเภทของไขมันที่พบในข้าวส่วนใหญ่คือ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) รองลงมาคือ ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ไกลโคลิพิด (glycolipids) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) โดยทั่วไปไขมันจะอยู่ในรูปของกรดไขมันอิ่มตัวประมาณร้อยละ 0.3-0.5 พบมากในส่วนองร่า โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ไขมันที่อยู่ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย กรดไขมันอิสระร้อยละ 32 และ

lysophosphatidyl choline ร้อยละ 68 ส่วนไขมันที่กระจายอยู่ในเอนโดสเปิร์มประกอบด้วย triglycerides ร้อยละ 73-82 phospholipids ร้อยละ 7-10 และ glycolipids ร้อยละ 2-8 (Morrison *et al.*, 1984 อ้างโดย สุณีย์, 2546)

3. คุณภาพทางเคมีกายภาพ

คุณภาพทางเคมีกายภาพ เป็นคุณสมบัติทั้งภายในและภายนอกที่มีผลต่อคุณภาพของข้าว ประกอบไปด้วย ความคงตัวของแป้งสุก (gel consistency) การเกิดเจลลิตินเซชันของแป้ง (gelatinization) ความหนืดของน้ำแป้ง (viscosity) อัตราการยืดของเมล็ดข้าวสุก (elongation ratio) และค่าการสลายเมล็ดในด่าง (alkali spreading value) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละส่วน ดังนี้

3.1 ความคงตัวของแป้งสุก เป็นค่าที่ใช้ในการแบ่งประเภทของข้าว ซึ่งข้าวบางสายพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสเท่ากัน แต่เมื่อนำไปหุงสุกกลับมีความแข็งของข้าวสุกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งสุกจะมีอัตราการคืนตัวที่ไม่เท่ากันทำให้แป้งสุกมีความแข็งและอ่อนแตกต่างกัน สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute; IRRI) จึงได้คิดหาวิธีการทดสอบคุณภาพในการรับประทานของข้าวที่เรียกว่า gel consistency test โดยอาศัยหลักการทำให้แป้งใสด้วยการต้มในสารละลายด่างแล้วทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาวัดระยะทางของแป้งสุกที่ไหลไปได้เมื่อวางบนพื้นราบ จากนั้นทำการแบ่งประเภทของข้าวตามความคงตัวของแป้งสุกดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 การแบ่งประเภทข้าวตามความคงตัวของแป้งสุก

ความคงตัวของแป้งสุก	ระยะทางที่แป้งไหล (มิลลิเมตร)
แข็ง	ต่ำกว่า 35
ค่อนข้างแข็ง	36-40
ปานกลาง	41-60
อ่อน	มากกว่า 60

ที่มา: Juliano (1985 อ้างโดย สุณีย์, 2546)

3.2 การเกิดเจลลิตินเซชันของแป้ง เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่คุณสมบัติของสตาร์ช โดยการนำแป้งข้าวมาผสมกับน้ำและให้ความร้อน ขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น สตาร์ชจะเกิดการพองตัวและอุ้มน้ำเข้าไปเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนไปทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกาะเกี่ยวกันในโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกตินคลายตัวลง สามารถมาจับกับโมเลกุลของน้ำในส่วนผสม หรือ อุ้มน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ชทำให้พองตัว และหนืดข้นขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินเซชันสามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

3.3 ความหนืดของน้ำแป้ง เป็นปรากฏการณ์ที่แป้งเกิดการพองตัวหลายครั้ง จนกระทั่งสารละลายมีความใสเพิ่มมากขึ้น ความเหนียวของน้ำแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงจุดสูงสุด จากนั้นจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลสละลายออกมา และแพร่ออกจากเม็ดแป้งที่แตก เมื่อยืนตัวลงจะเกิดเป็นมวลของแป้งเปียกหรือเจล ความหนืดของแป้งสามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Rapid Viscosity Analyzer (RVA) โดยการแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้งเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเมื่อให้ความร้อนเม็ดแป้งจะเริ่มพองตัว ความหนืดเพิ่มขึ้นและถึงจุดสูงสุด เรียกความหนืดที่จุดสูงสุดนี้ว่า peak viscosity หลังจากเกิดความหนืดสูงสุดแล้วความหนืดจะเริ่มลดลงเนื่องจากการแตกตัวของเม็ดแป้งทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพกตินบางส่วนถูกปล่อยออกมา ความหนืดเปลี่ยนแปลงไปสู่ขั้นสลายตัว หรือ breakdown เมื่อน้ำแป้งเย็นตัวลงความหนืด จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งจากการคืนตัวของแป้ง (retrogradation) ช่วงที่แป้งเกิดการคืนตัวเรียกว่า setback ซึ่งคำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด ค่านี้สามารถใช้ในการคาดคะเนความแข็งแรงกระด้างของข้าวสุก อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสต่ออะไมโลเพกตินมีผลต่อค่า setback โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะทำให้ค่า setback สูงขึ้น

3.4 อัตราการยืดของเมล็ดข้าวสุก เป็นการวัดค่าอัตราการยืดเมล็ดข้าวสุก ซึ่งในระหว่างการหุงต้ม เมล็ดข้าวจะมีการขยายตัวอกรอบด้าน โดยเฉพาะด้านยาว ดังนั้นการหาระยะการยืดของเมล็ดข้าวสุกจึงหาได้จากสัดส่วนของความยาวของข้าวสุกต่อความยาวของข้าวก่อนหุงต้ม พันธุ์ข้าวที่มีอัตราการยืดของเมล็ดข้าวสุกมากจะทำให้ข้าวสุกมีลักษณะไม่เหนียวติดกัน เนื้อภายในโปร่งไม่อัดแน่น และช่วยให้ข้าวนุ่มมากกว่าข้าวพันธุ์ที่มีอัตราการยืดของเมล็ดข้าวสุกน้อย จึงจัดเป็นข้าวที่หุงขึ้นหม้อ

3.5 ค่าการสลายเมล็ดในด่าง เป็นการทดสอบการแตกตัวของเมล็ดข้าว โดยการแช่เมล็ดข้าวในสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 23 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง การประเมินค่าการสลายเมล็ดในด่าง แสดงดังตาราง 5 และความสัมพันธ์ของค่าการสลายเมล็ดในด่างกับอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน แสดงดังตาราง 6

ตาราง 5 การประเมินค่าการสลายเมล็ดในค้าง

คะแนน	ลักษณะการสลายของเมล็ด
1	เมล็ดไม่เปลี่ยนแปลง
2	เมล็ดพองตัว
3	เมล็ดพองตัว มีแป้งกระจายออกจากเมล็ด แต่ไม่โดยรอบหรือแคบ
4	เมล็ดพองตัว มีแป้งกระจายออกจากเมล็ด โดยรอบและกว้าง
5	เมล็ดแตกปริทางขวางหรือทางยาว แป้งกระจายออกโดยรอบและกว้าง
6	เมล็ดสลายรวมกับแป้งที่กระจายออกมา
7	เมล็ดสลายจนหมด แป้งใส

ที่มา: Juliano (1985 อ้างโดย สุณีัย, 2546)

ตาราง 6 ความสัมพันธ์ของค่าการสลายเมล็ดในค้างกับอุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชัน

ค่าการสลายเมล็ดในค้าง	อุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชัน	องศาเซลเซียส
1-3	สูง มากกว่า	74
4-5	ปานกลาง	70-74
6-7	ต่ำ	น้อยกว่า 69

ที่มา: Juliano (1985 อ้างโดย สุณีัย, 2546)

คุณลักษณะของข้าวสารใหม่และข้าวสารเก่า

ข้าวเป็นอาหารหลักและเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น การผลิตเส้นขนมจีนและเส้นก๋วยเตี๋ยว ซึ่งการผลิตเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ข้าวเก่าเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี เนื่องจากคุณลักษณะของข้าวใหม่และข้าวเก่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังนี้

1. คุณลักษณะของข้าวใหม่

1.1 เมื่อหุงต้มจะมีลักษณะเหนียวหรือแฉะติดกันเป็นก้อน

2. คุณลักษณะของข้าวเก่า

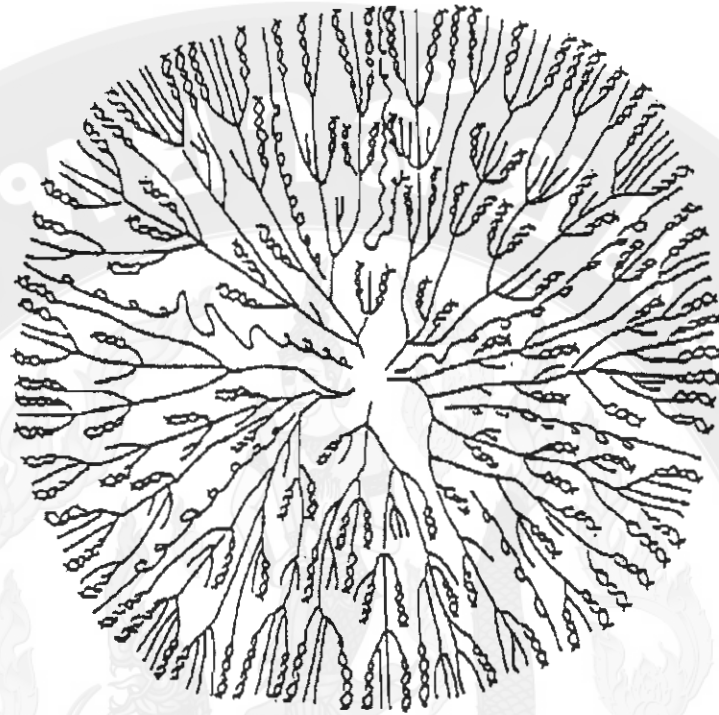
- 2.1 เมื่อหุงต้มจะมีลักษณะแข็งร่วนและไม่เหนียวติดกัน
- 2.2 มีสมบัติด้านการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น
- 2.3 มีอัตราการขยายปริมาตรเพิ่มขึ้น
- 2.4 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำในข้าวสุกลดลง
- 2.5 มีค่าความชื้นลดลง
- 2.6 มีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้น
- 2.7 มีการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุกเพิ่มขึ้น
- 2.8 มีการเกิดกลิ่นเหม็นหืนในเมล็ดข้าว
- 2.9 มีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index) สูง

กลไกในการกลายเป็นข้าวสารเก่า

1. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ช

ข้าวมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือสตาร์ช ซึ่งมีอยู่มากถึงร้อยละ 80 ภายในสตาร์ชประกอบด้วยอะไมโลเพกตินเป็นส่วนหลักและอะไมโลสเป็นส่วนรองโดยคิดเป็นสัดส่วนทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินนั้นจะมีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามแหล่งที่ปลูกกับชนิดของพืช ดังนั้นข้าวที่มาจากแหล่งแตกต่างกันจึงมีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแตกต่างกันมีผลทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้มและการบริโภคต่างกัน

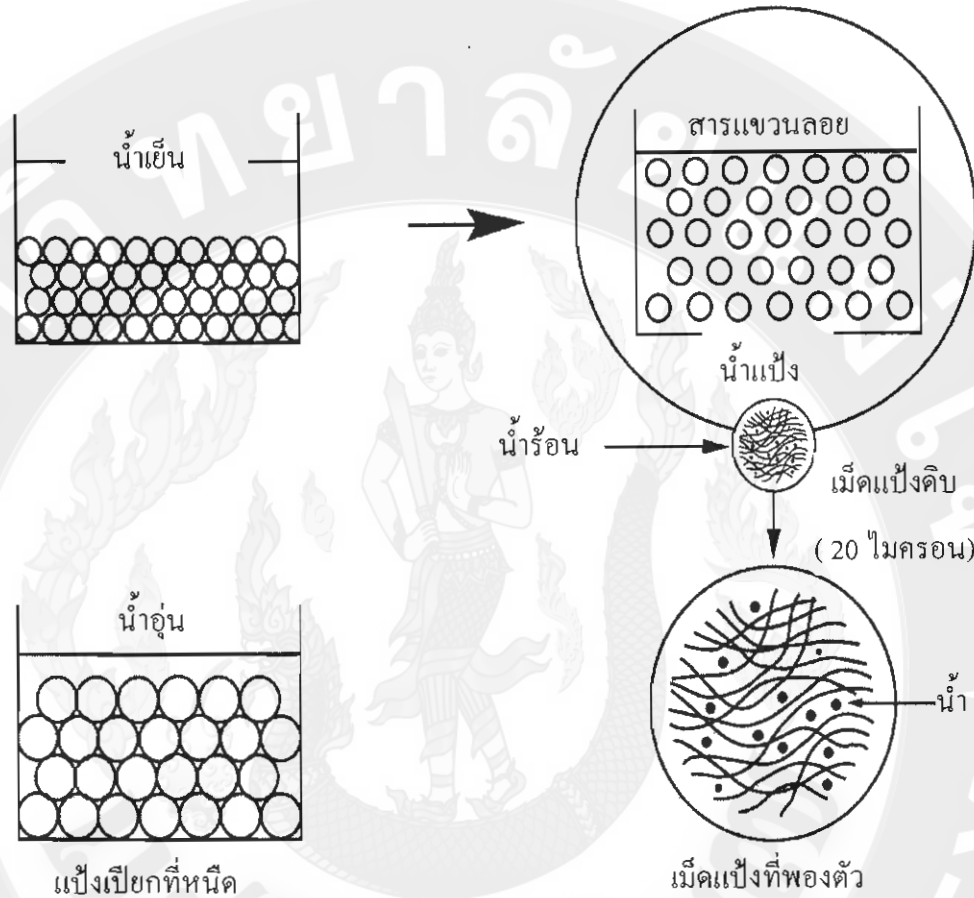
Juliano (1985) รายงานว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันคือร้อยละ 9-20, 20-25 และ 25-33 เมื่อนำมาหุงต้มจะให้ลักษณะข้าวสุกที่เหนียวนุ่มนุ่มค่อนข้างเหนียว และร่วนแข็ง ตามลำดับ เช่นเดียวกับกับ พืชยา (2541) ที่รายงานว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกันคือร้อยละ 10-20, 20-25 และ 25-34 เมื่อนำมาหุงต้มจะให้ลักษณะข้าวสุก ที่นุ่มค่อนข้างเหนียว ค่อนข้างนุ่มแต่ไม่เหนียว และร่วนแข็ง ตามลำดับ ซึ่งพันธุ์ข้าวที่มีลักษณะดังกล่าวนี้ได้แก่ ข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ข้าวพันธุ์กข 7 และข้าวพันธุ์เหลืองประทิว 123 ตามลำดับ ขณะทีปราณี (2549) รายงานว่าโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินจะอัดกันอยู่แน่นภายในเม็ดสตาร์ช ดังแสดงในภาพ 13 โดยส่วนของอะไมโลเพกตินจะรวมตัวกันอยู่ในลักษณะที่เป็น crystalline และอะไมโลสจะรวมตัวกันอยู่ในลักษณะที่เป็น amorphous ในส่วนของอะไมโลสนั้นจะสามารถรวมตัวกับโมเลกุลของไขมันและกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนได้ซึ่งมีผลช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ชทำให้สตาร์ชของตัวได้เข้า ความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำลดลง ส่งผลให้ข้าวสุกมีลักษณะแข็งและร่วนขึ้น (ไชยรัตน์ และคณะ, 2543)



ภาพ 13 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช
ที่มา: Lineback (1984 อ้างโดย อรอนงค์, 2550)

2. การเกิดเจลาตินในเซชัน

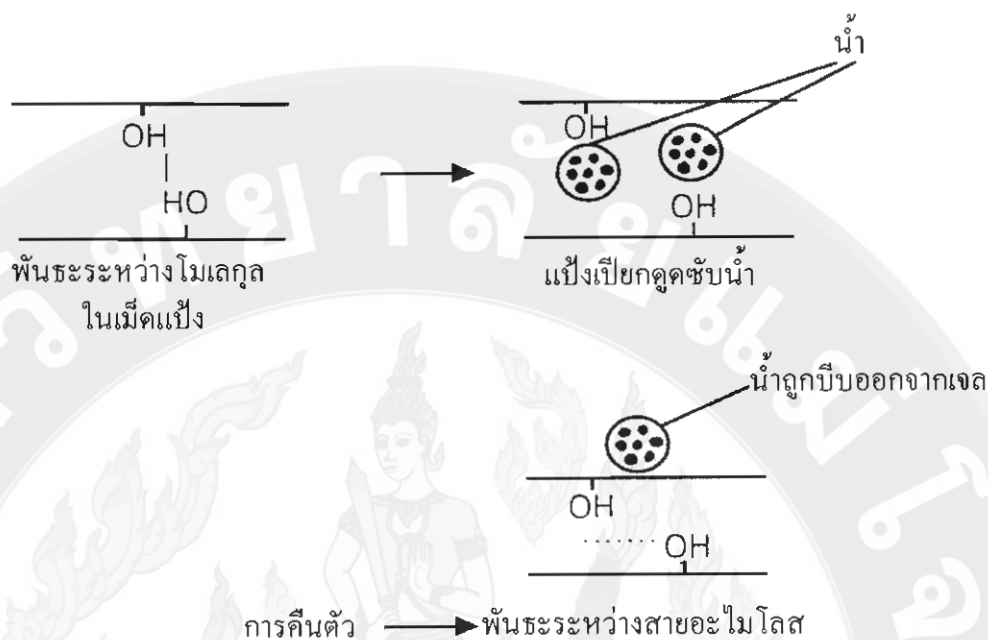
กล้าณรงค์และเกื้อกุล (2550) กล่าวว่าโมเลกุลของแป้งประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เมื่อได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงทำให้การจับตัวกันของโมเลกุลภายในเม็ดแป้งไม่แน่นเหมือนเดิม น้ำจึงสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย มีผลทำให้เม็ดแป้งคูดน้ำและพองตัวมากขึ้น เมื่อนำมาหุงต้มค่าการดูดซับน้ำก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ที่เม็ดแป้งได้รับความร้อนและเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็วแบบผันกลับไม่ได้นี้ว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)



ภาพ 14 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม
ที่มา: Sanders (1996 อ้าง โดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)

3. การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสกระจายตัวออกจากเม็ดแป้งทำให้ค่าความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นร่างแหสามมิติขึ้น ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่สามารถดูดน้ำเข้ามาได้อีก ทั้งยังทำให้แป้งมีความหนืดคงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเป็นเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือสลิก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว



ภาพ 15 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

ที่มา: Fruton and Simmonds (1958 อ้างโดย อ้างโดย กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2550)

เทคโนโลยีการทำข้าวเปลือกใหม่ให้เป็นข้าวเก่า

เทคโนโลยีของการทำข้าวเปลือกใหม่ให้กลายเป็นข้าวเก่านั้นเป็นเทคโนโลยีที่มีการค้นคว้าและวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน และการทำเป็นข้าวฉ่ำ ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละวิธี ดังนี้

1. การอบแห้งด้วยลมร้อน เป็นเทคนิคที่ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน ส่วนมากนิยมนำมาใช้ในกระบวนการลดความชื้นซึ่งมีหลักการทำงานคือใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังวัสดุที่ชื้นเพื่อไล่ความชื้นออกด้วยการระเหย โดยของเหลวที่อยู่ภายในวัสดุจะเคลื่อนที่ออกมายังผิววัสดุ ซึ่งช่วงแรกของการอบแห้งจะเป็นช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นรอบ ๆ ผิววัสดุเท่านั้น ความร้อนกับอากาศร้อนจะถ่ายเทไปยังผิววัสดุโดยการนำความร้อนผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซไปยังผิวของวัสดุและเมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลงมาก การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นภายในมวลวัสดุด้วย โดยน้ำภายในวัสดุจะเคลื่อนที่มายังผิววัสดุในรูปของเหลวหรือไอน้ำแล้วระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากอากาศ การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวจะช้ากว่าการพาความร้อนขึ้นจากผิวไปยังอากาศทำให้เกิดเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และที่อุณหภูมิกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศคงที่ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงจนถึงจุดหนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงที่จุดนี้ความดันไอน้ำของน้ำในวัสดุจะมีค่าเท่ากับ

ความดันไอของอากาศที่อยู่รอบ ๆ และอุณหภูมิของวัสดุก็เท่ากับอุณหภูมิของอากาศรอบ ๆ ทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกจากวัสดุได้ (สมชาติ, 2540; ชีรเดชและธีรยุทธ, 2549) ซึ่งพชรวรรณและคณะ (2550) ศึกษาเทคโนโลยีการปรับสภาพข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่าโดยใช้การอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 นาทีสามารถทำให้ข้าวมีสมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปโดยทำให้ข้าวมีค่าการขยายปริมาตรและปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นเหมือนกับข้าวเก่า

2. การอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิด ไคเซชัน เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับวัสดุอบแห้งที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบาซึ่งมีหลักการการทำงานคือใช้ลมร้อนเป่าให้วัสดุแขวนลอยอยู่ในอากาศหรือกล่าวได้ว่าเทคนิคฟลูอิด ไคเซชันนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้ของแข็งสัมผัสกับของไหลแล้วของแข็งเหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายของเหลว โดยของแข็งเหล่านี้เริ่มต้นจะถูกวางไว้บนตะแกรงในห้องอบแห้งจากนั้นของไหลจะไหลผ่านชั้นของของแข็งและไหลออกด้านบนของห้องอบแห้งด้วยความเร็วระดับหนึ่ง เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นของแข็งก็จะเกิดการขยับและลอยตัวขึ้นไปอย่างเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ซึ่งการอบแห้งด้วยเทคนิคเช่นนี้จะทำให้วัสดุแห้งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งคลฤดีและคณะ (2550) ศึกษาการเร่งความแก่ข้าวกล้องหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิด ไคเซชันร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ โดยการนำข้าวกล้องหอมมะลิที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 28.2-33.3 มาเก็บในถังปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน และนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วอากาศ 2.6 เมตรต่อวินาที และนำไปเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานาน 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเป็นร้อยละ 16 พบว่าระยะเวลาเมื่อการเก็บในที่อับอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการหุงต้มของข้าว โดยข้าวจะมีค่าการดูดซับน้ำและค่าการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้การจับตัวกันภายในของเม็ดแป้งคลายตัวลง ดังนั้นเมื่อนำมาหุงต้มจะทำให้ข้าวสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้การยึดตัวของเมล็ดข้าวกล้องสุกเพิ่มขึ้น

3. การทำข้าวนึ่ง เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวแปรรูปชนิดหนึ่งหมายถึง ข้าวที่ผ่านการทำให้สุกด้วยกระบวนการให้ความร้อนชื้น โดยการนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำ และทำให้น้ำซึมเข้าสู่เมล็ดจนอิมตัว แล้วจึงแยกน้ำออกจากข้าวเปลือก จากนั้นทำการนึ่งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำเพื่อให้เนื้อในเมล็ดสุกบางส่วน แล้วนำข้าวเปลือกไปนึ่งให้แห้งจนมีความชื้นใกล้เคียงกับข้าวเปลือกธรรมดาประมาณร้อยละ 16 และเก็บรักษาหรือพักข้าวไว้อย่างน้อย 7 วัน ก่อนนำไปผ่านกระบวนการสีข้าวเหมือนข้าวเปลือกธรรมดาเพื่อทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มขึ้น โดยเฉลิมพร (2546) ศึกษาการรวมกระบวนการผลิตของการนึ่งและการอบแห้งข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอม ด้วยการนำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนแช่ 15.7 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง แช่น้ำอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5-3 ชั่วโมง แล้วระบายน้ำออก จากนั้นนำมาอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไคซ์เบคมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็น

ตัวกลาง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0.5-7 นาที ความเร็วของไอน้ำร้อนหวด ยิ่งเท่ากับ 3.0 เมตรต่อวินาที และความสูงของเบด 10 เซนติเมตร พบว่าการแช่และการอบแห้งทำให้ ปริมาณต้นข้าวเพิ่มมากขึ้นเมื่อข้าวผ่านกระบวนการขัดสี และเมื่อทำการหุงต้มข้าวจะให้ข้าวสุกที่มี ลักษณะแข็งและร่วนขึ้น และเวลาในการอบแห้งที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า peak viscosity มีค่าลดลง ขณะที่ค่า pasting temperature มีค่าสูงขึ้น และสรุปขั้นตอนในการทำข้าวหนึ่ง ดังนี้

3.1 การแช่ข้าวเปลือก มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ข้าวเปลือกนั้นมีความชื้นที่ไม่ ต่ำกว่าร้อยละ 30 ซึ่งจะช่วยให้สตาร์ชในเมล็ดข้าวเกิดการเจลาทิไนซ์ในขณะหนึ่ง การแช่ข้าวเปลือกจะ ทำให้น้ำที่แช่ซึมผ่านผิวเปลือกแข็งเข้าสู่เนื้อในเมล็ด โดยเข้าแทนที่รูอากาศภายในเมล็ด สตาร์ชดูดซึมน้ำโดยสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของสตาร์ชและเกิด การพองตัวขึ้น ซึ่งหากแช่น้ำที่อุณหภูมิต่ำเมล็ดสตาร์ชจะสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้เพียงระดับ หนึ่ง แต่หากแช่น้ำที่อุณหภูมิสูงเมล็ดสตาร์ชจะสามารถดูดซึมน้ำและพองตัวได้ดี เนื่องจากอากาศใน ช่องว่างของข้าวเปลือกถูกแทนที่ด้วยน้ำ โดยเมื่อน้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอากาศจะกระจายตัวและออก จากช่องว่าง จากนั้นน้ำก็จะเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างเป็นผลให้น้ำซึมเข้าไปได้

3.2 การนึ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สตาร์ชในข้าวเปลือกเกิดการเจลาทิไนซ์ ด้วยไอน้ำร้อน ความร้อนที่ใช้ในการนึ่งอาจใช้การพ่นไอน้ำร้อนลงบนข้าว หรืออาจใช้การนึ่งในหม้อ นึ่งอัดโนมัต โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของข้าวหนึ่งคือ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำที่ดูดซึมเข้าไป และ ระยะเวลาในการนึ่ง การควบคุมเวลาและอุณหภูมิให้สัมพันธ์กันกับการเกิดเจลาทิไนซ์ของสตาร์ชนั้น เป็นสิ่งสำคัญ โดยเวลาในการให้ความร้อนจะต้องนานพอที่จะทำให้สตาร์ชนั้นเกิดเจลาทิไนซ์ได้ อย่างสมบูรณ์ ส่วนอุณหภูมิที่ใช้จะส่งผลต่อลักษณะของสีและปริมาณผลผลิตหลังการขัดสี ซึ่งถ้า อุณหภูมิสูงสีของข้าวหนึ่งจะเข้มแต่ถ้าอุณหภูมิต่ำสีของข้าวหนึ่งจะอ่อน นอกจากนี้การนึ่งยังช่วยเพิ่ม ปริมาณผลผลิตหลังการขัดสีเนื่องจากเนื้อสัมผัสของเนื้อเมล็ดมีลักษณะคล้ายแป้งเปียก (pasty) ซึ่ง เป็นผลจากการที่สตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ทำให้ข้าวมีความแน่นมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อนำไปขัดสี ปริมาณข้าวแตกหักจึงลดลง

3.3 การทำแห้ง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นให้เหมาะสมต่อการเก็บ รักษาข้าวและเพื่อให้ได้ปริมาณข้าวหลังการขัดสีมากที่สุด การทำแห้งข้าวเปลือกหนึ่งต่างจากการทำ แห้งข้าวเปลือกธรรมดา เนื่องจากข้าวอาจเกิดการแตกร้าวได้ง่าย การทำแห้งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่ง ทำการลดความชื้นของข้าวจากร้อยละ 45-50 จนเหลือร้อยละ 16 และพักข้าวไว้เป็น เวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงเริ่มขั้นที่สองคือ ลดความชื้นจนเหลือร้อยละ 14 ซึ่งสาเหตุของการทำแห้ง อย่างช้า ๆ ในช่วงแรกนั้นก็เพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตสูงโดยให้มีการแตกร้าวในช่วงใกล้สิ้นสุดของ การทำแห้ง (final state) น้อยที่สุด ซึ่งการแตกร้าวในช่วงใกล้สิ้นสุดของการทำแห้งนี้จะส่งผลให้ เปลือกหุ้มเปราะและแตกง่าย ดังนั้นถ้าความชื้นของข้าวลดลงต่ำกว่าร้อยละ 16 ข้าวจะมีสภาพแข็ง

(hardening state) และทำให้เมล็ดข้าวหักขณะทำการขัดสีข้าว ดังนั้นเพื่อการป้องกันการแตกร้าวของเมล็ดข้าว การทำแห้งในขั้นที่หนึ่งจึงต้องหยุดเมื่อความชื้นของข้าวถึงร้อยละ 16 จากนั้นจึงจะใช้อุณหภูมิที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวและเวลาเข้าช่วยทำให้แห้งต่อไป

เทคโนโลยีการทำข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวเก่า

เทคโนโลยีของการทำข้าวเปลือกใหม่ให้กลายเป็นข้าวเก่านั้นนิยมใช้การอบแห้งเป็นหลัก แต่เนื่องจากวิธีการอบแห้งเหล่านี้จะต้องนำข้าวเปลือกมาเพิ่มความชื้นด้วยการใช้น้ำก่อนจึงจะนำไปอบแห้งได้ ทำให้ต้องมีการอบแห้งซ้ำถึงสองครั้ง ดังนั้นหากมีเทคโนโลยีในการผลิตข้าวใหม่ให้กลายเป็นข้าวเก่าได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ข้าวก่อนก็จะทำให้เกิดผลดีทั้งในแง่ของค่าส่งซื้อและการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวนั้นก็คือเทคโนโลยีการทำข้าวสารใหม่ให้กลายเป็นข้าวสารเก่า เช่น การใช้อุณหภูมิสูง การใช้ความดันสูง และการใช้ไฟฟ้าสถิต ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละวิธี ดังนี้

1. การใช้อุณหภูมิสูง เป็นการเร่งอันตรกิริยาของการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ให้เกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากทำให้เอนไซม์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วมากขึ้น ซึ่งในเมล็ดข้าวเองก็มีเอนไซม์ตามธรรมชาติอยู่แล้ว ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มเข้าไปก็จะไปช่วยในส่วนของ การเร่งปฏิกิริยาให้ เกิดได้เร็วมากขึ้น โดย Wiset *et al.* (2005) ศึกษาผลของการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเปลือกที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 สายพันธุ์คือ ข้าวพันธุ์ Langi, Amaroo และ Chainart I โดยนำมาทำการอบแห้ง 2 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกจะนำข้าวมาทำการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดเซชันและอบจนข้าวมีความชื้นลดลงเป็นร้อยละ 18 จากนั้นนำไปอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 100, 125 และ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ข้าวมีความชื้นลดลงเป็นร้อยละ 14 แล้วนำข้าวไปตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีปริมาณดัชนีข้าว และการเกิดเจลของแป้งข้าว (setback) เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความคงทนต่ออุณหภูมิ (breakdown) ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น

2. การใช้ความดันสูง เป็นการทำให้โมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ ที่มีอยู่ภายในบริเวณอากาศ เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน หรือก๊าซชนิดอื่น ๆ เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้กัน และเมื่อโมเลกุลของก๊าซเหล่านั้นเข้ามาใกล้กันมากขึ้นก็จะทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้นได้ดีและเกิดขึ้นได้เร็ว ดังนั้นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ก็สามารถถูกทำลายโครงสร้างและสูญเสียประสิทธิภาพในการทำงานได้ภายใต้สภาวะที่มีความดันสูง ๆ เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของโปรตีน nucleic acids polysaccharides และไขมัน (ปัทมกะ, 2533) นอกจากนี้การใช้ความดันสูงยังมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการแปรรูปอาหารเนื่องจากจะทำให้อาหารคงกลิ่นรสตามธรรมชาติ และคงคุณค่าทางอาหารไว้ได้ ซึ่งหลักการพื้นฐานของการใช้ความ

คั้นในอาหารคือ ความคั้นจะถูกส่งไปให้อาหาร โดยผ่านตัวกลางในการถ่ายเทความคั้นซึ่งก็คือน้ำ และจะทำให้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องให้แก่อาหารในระหว่างการแปรรูปลดลง โดยผลของความคั้นจะทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนไบโอพอลิเมอร์ต่าง ๆ ซึ่งมีผลต่อการเสียดสภาพของโปรตีน การเกิดเจล และการกระตุ้นหรือทำลายเอนไซม์ อีกทั้งยังทำให้สมบัติทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสมีความเฉพาะตัวเกิดขึ้น เช่น ในกรณีเจลของไข่ที่เกิดจากการใช้ความคั้นจะมีสมบัติเฉพาะตัวคือ เจลจะมีความเงาและยังมีรสชาติเป็นธรรมชาติเหมือนไข่สด เนื่องจากการใช้ความคั้นจะช่วยรักษาพันธะโคเวเลนต์ให้คงอยู่ ทำให้ปฏิกิริยาเมลลาร์ดไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ส่งผลให้อาหารยังคงมีกลิ่นรสตามธรรมชาติ (รุ่งนภา, 2550) โดย Watanabe *et al.* (1991) ศึกษาสมบัติการหุงของข้าวเก่า ซึ่งทรีตต์ด้วยความคั้น 50 ถึง 500 เมกะปาสกาล ที่ 10 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ร่วมกับเอนไซม์ *actinase*, *cellulose*, *pectolyase*, *transglutaminase* และ *lipase* พบว่าการให้ความคั้น 100 เมกะปาสกาล ร่วมกับเอนไซม์ *actinase* แก่เมล็ดข้าวทำให้สมบัติของข้าวในแง่การหุงคัมคัมดีขึ้น

3. การใช้ไฟฟ้าสถิต เป็นการทำให้อะตอมของวัสดุเกิดการระบวมการเปลี่ยนแปลงซึ่งโดยทั่วไปอะตอมจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน (e) และโปรตรอน (p) ในจำนวนเท่า ๆ กัน เพื่อให้ประจุบวกและประจุลบซึ่งตรงกันข้ามกันมีค่าเท่ากัน หักล้างกันได้พอดี อะตอมจะได้มีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง แต่เมื่อใดก็ตามที่อะตอมของวัสดุมีจำนวนอิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะที่สมดุลจะทำให้อะตอมนั้นแสดงอำนาจทางไฟฟ้าออกมา ซึ่งถ้าอะตอมของวัสดุสูญเสียอิเล็กตรอนไป อะตอมจะแสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก ในทางตรงกันข้ามหากอะตอมของวัสดุได้รับอิเล็กตรอนเข้ามา อะตอมจะแสดงประจุไฟฟ้าเป็นลบ และเนื่องจากการเกิดไฟฟ้าสถิตนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลากหลายวิธี เช่น การสัมผัส การขัดสี และการเหนี่ยวนำ (สมศักดิ์, 2528; ส่งและคณะ, 2528) ซึ่งวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าซึ่งก็สามารถทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นการใช้ไฟฟ้าสถิตกับข้าวก็เปรียบได้กับการเหนี่ยวนำให้อิออนบวกซึ่งก็คือไฮโดรเจน (H^+) และอิออนลบซึ่งก็คือออกซิเจน (O) ในโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเกิดการแลกเปลี่ยนประจุซึ่งกันและกัน โดยการแลกเปลี่ยนประจุที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจูฮาร์ตัน (2550) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าสถิตแรงสูง โดยการนำข้าวเปลือกมาปรับเพิ่มความชื้นให้อยู่ในช่วงร้อยละ 24-33 มาตรฐานแห้ง และนำข้าวเปลือกมาดิสชาร์จไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์ ด้วยระยะเวลาในการดิสชาร์จไฟฟ้า 20, 30 และ 40 นาที จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้ไปอบแห้งแบบชั้นบางต่อที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่าคุณภาพทางเคมีกายภาพของข้าว (ค่าความคงตัวของเจล ค่าความสามารถในการสลายเมล็ดในด่าง และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก) โดยส่งผลให้ข้าวมีแนวโน้มมากขึ้น

ทฤษฎีของ Response Surface Methodology

การหาผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว หรือการหาพื้นผิวสะท้อน (Response Surface Methodology, RSM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด (optimal condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิตต่าง ๆ โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (mathematical model) และการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่มีอยู่ ซึ่งผลตอบสนอง (response) ของปัญหาจะเป็นความสัมพันธ์หรือฟังก์ชันของหลายปัจจัยหรือหลายตัวแปรอิสระ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าเหมาะสมที่สุด (ประไพศรีและพงษ์ชนัน, 2551) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าวิธีการผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิวนั้นเป็นการรวบรวมเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น (อิสรพงษ์, 2545) ซึ่งจะประกอบไปด้วยกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาจากค่าสังเกตเพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าของการตอบสนองที่วัดได้ (response variables) เช่น ปริมาณการแตกหัก ค่าสี ค่าความหนืด เป็นต้น กับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (input variables) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น (ไพโรจน์, 2544) โดย Capanzana and Buckle (1997) ได้ศึกษาหาสถานะการงอกที่เหมาะสมของข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงด้วยวิธีผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว โดยมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 4 ตัวได้แก่ ระยะเวลาและอุณหภูมิในการงอก กับ ระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่ข้าว พบว่าสถานะ การงอกที่เหมาะสมของข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงคือ ระยะเวลาในการแช่ข้าว 16 ชั่วโมงที่อุณหภูมิในการแช่ข้าว 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการงอก 3 วัน และอุณหภูมิในการงอก 30 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาสมการ

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \epsilon \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ Y = ค่าตอบสนองที่สังเกตได้ (dependent variable)

f = ฟังก์ชันของการตอบสนองของ X_1, X_2, \dots, X_n (independent variable)

ϵ = เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

รูปแบบความเที่ยงตรงของฟังก์ชันการตอบสนอง f สามารถประมาณการได้โดยใช้ฟังก์ชันซึ่งเป็นการสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression relationship) หรือความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง (quadratic regression relationship) ดังนี้

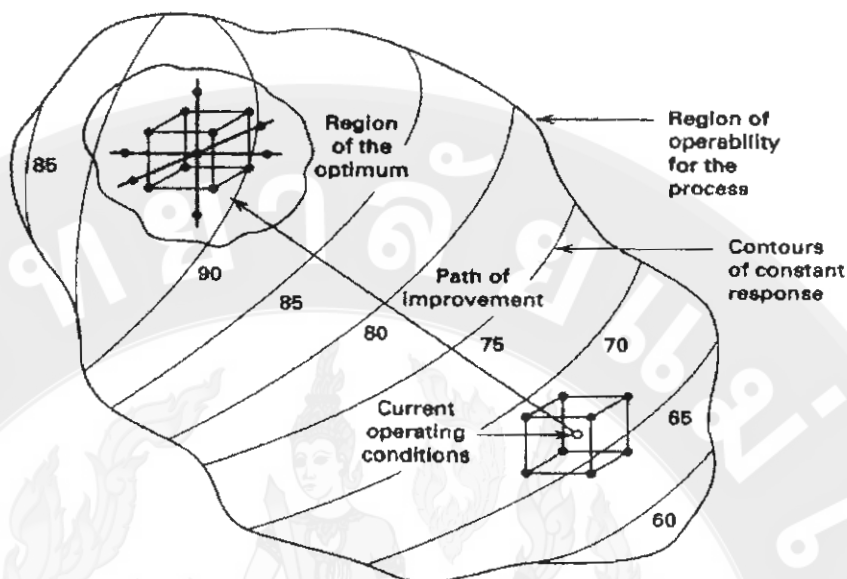
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (2)$$

สมการดังกล่าวเป็นสมการพื้นฐานที่รู้จักกันในรูปของสมการลำดับที่หนึ่ง (first-order) ส่วนรูปของสมการลำดับที่สอง (second-order) เป็นความสัมพันธ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นโค้ง ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \beta_{1i} X_1^2 + \dots + \beta_{ii} X_i^2 + \beta_{ij} X_i X_j + \dots + \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (3)$$

โดยกำหนดให้ β_0 = เป็นจุดตัด (intercept)
 β_i = เป็นผลเชิงเส้นตรง (linear effect)
 β_{ii} = เป็นผลเชิงเส้นโค้ง (quadratic effect)
 β_{ij} = เป็นผลของปฏิกริยาสัมพันธ์ (interaction effect)

วิธีการหาผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว เป็นวิธีการที่มีลำดับขั้นตอน (sequential procedure) กล่าวคือ จากสถานะของการทำงานในปัจจุบันซึ่งเป็นจุดที่อยู่ไกลจากจุดที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวดตอบสนอง ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อเข้าไปยังบริเวณที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวดตอบสนองจึงใช้สมการในรูปของสมการลำดับที่หนึ่ง (first order model) ในการประมาณค่า ซึ่งเป้าหมายต่อไปก็คือการเข้าไปให้ใกล้บริเวณที่เหมาะสมที่สุดของพื้นผิวดตอบสนองอย่างถูกต้อง โดยเมื่อพบบริเวณที่เหมาะสมที่สุดแล้วสามารถใช้รูปของสมการที่มีลำดับของสมการที่สูงกว่าเข้ามาช่วยในการประมาณค่า และพบว่าส่วนใหญ่นิยมใช้รูปของสมการลำดับที่สอง (second order model) เนื่องจากมีความยุ่งยากไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับสมการในรูปแบบอื่น ๆ ดังนั้นจึงใช้รูปแบบของสมการลำดับที่สองในการประมาณและวิเคราะห์เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของระบบหรือกระบวนการผลิตแต่ทั้งนี้ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้สมการลำดับที่สองเสมอไป จะใช้ก็ต่อเมื่อค่าที่ได้จากสมการลำดับที่หนึ่งไม่สามารถปรับปรุงค่าผลตอบสนองได้ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ จะแสดงรายละเอียดดังภาพ 16



ภาพ 16 ขั้นตอนการหาผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว
ที่มา: Douglas (2005 อ้างโดย ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

การสร้างแผนการทดลองแบบ Response Surface Methodology

แผนการทดลองสำหรับวิธี Response Surface Methodology สามารถใช้แผนการทดลองได้หลากหลายแบบด้วยกัน เช่น Completely Factorial Design, Fractional Factorial Design, Central Composite Design เป็นต้น โดยแผนการทดลองสองแบบ Factorial Design และ Fractional Factorial Design มีข้อจำกัดคือ ผลการทดลองที่ได้จะสร้างสมการได้เฉพาะสมการกำลังหนึ่งเท่านั้น และหากมีตัวแปรในการทดลองมากกว่าสองตัวแปร แผนการทดลองนี้ก็จะไม่เหมาะสมในการนำมาปฏิบัติจริงเนื่องจากมีจำนวนการทดลองมากเกินไป แผนการทดลองแบบ Central Composite Design เป็นแผนการทดลองที่มีการเพิ่มกลุ่มการทดลองเป็น star และ center ลงในแผนการทดลองแบบ Factorial Design ที่มีเพียงกลุ่มการทดลอง 2^k Factorial จึงใช้ในการพิจารณาเทอมของสมการกำลังสองได้ (ฤทัยพันธุ์, 2537) วิธีการออกแบบแผนการทดลองแบบ Central Composite Design เริ่มจากการนำตัวแปรอิสระมาเข้ารหัสโดยแทนตัวแปรเป็นระดับต่ำสุดจนถึงสูงสุดด้วยตัวเลข -2, -1, 0, 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $-\alpha$, -1, 0, +1 และ α ดังตาราง 7 จากนั้นทำการวางแผนการทดลองโดยจำนวนการทดลอง (treatment) ประกอบด้วย 3 กลุ่มการทดลองตามความแตกต่างของสถานะการทดลองที่มีระดับของตัวแปรต่างกัน ดังนี้

กลุ่มที่ 1 : 2^k Factorial สัญลักษณ์ของระดับตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองมีค่าเท่ากับ +1, -1 มีจำนวนการทดลองเท่ากับ 2^k ถ้า $k \leq 4$, จำนวนการทดลองเท่ากับ half-replicate ถ้า $5 \leq k \leq 7$ และจำนวนการทดลองเท่ากับ quarter-replicate ถ้า $k \geq 8$ โดย k คือ จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา

กลุ่มที่ 2 : Star การทดลองที่มีระดับตัวแปร ($X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n$) เท่ากับ $(-\alpha, 0, \dots, 0, 0), (\alpha, 0, \dots, 0, 0), \dots, (0, 0, \dots, 0, -\alpha), (0, 0, \dots, 0, \alpha)$ จำนวนการทดลองเท่ากับ 2^k และค่า α จะขึ้นอยู่กับค่า k

กลุ่มที่ 3 : Center การทดลองที่มีระดับตัวแปร ($X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n$) เท่ากับ $(0, 0, \dots, 0, 0)$ มีประโยชน์ในการประมาณค่า error experimental ดังตาราง 8

ตาราง 7 การเข้ารหัสของตัวแปรอิสระ 4 ตัว โดยในแต่ละตัวแปร มี 5 ระดับ

Independent Variable	Symbol		Levels	
	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	T	X_1	ระดับต่ำสุด	-2
				-1
				0
				1
			ระดับสูงสุด	2
ระยะเวลา (นาที)	t	X_2	ระดับต่ำสุด	-2
				-1
				0
				1
			ระดับสูงสุด	2
ความดัน (บาร์)	P	X_3	ระดับต่ำสุด	-2
				-1
				0
				1
			ระดับสูงสุด	2
ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	S	X_4	ระดับต่ำสุด	-2
				-1
				0
				1
			ระดับสูงสุด	2

ตาราง 8 จำนวนการทดลองที่มีตัวแปรอิสระ 4 ตัว

Treatment	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	1
3	-1	-1	1	-1
4	-1	-1	1	1
5	-1	1	-1	-1
6	-1	1	-1	1
7	-1	1	1	-1
8	-1	1	1	1
9	1	-1	-1	-1
10	1	-1	-1	1
11	1	-1	1	-1
12	1	-1	1	1
13	1	1	-1	-1
14	1	1	-1	1
15	1	1	1	-1
16	1	1	1	1
17	-2	0	0	0
18	2	0	0	0
19	0	-2	0	0
20	0	2	0	0
21	0	0	-2	0
22	0	0	2	0
23	0	0	0	-2
24	0	0	0	2
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วินิตและภูมิสิทธิ์ (2545) ศึกษาการเร่งความแก่ของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยการอบในภาชนะปิด พบว่าการอบในภาชนะปิดด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสขึ้นไป สามารถทำให้คุณสมบัติของข้าวเปลี่ยนสภาพจากข้าวใหม่เป็นข้าวเก่าได้

จิรศักดิ์และคณะ (2547) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 และ 37 องศาเซลเซียส พบว่าข้าวมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดและปริมาณอะไมโลสเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสจะมีอัตราเพิ่มขึ้นมากกว่าอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ใจทิพย์และผดุงศักดิ์ (2547) ศึกษากระบวนการเร่งความแก่ของข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 20 ให้เป็นข้าวเก่า โดยการปรับสภาพข้าวเปลือกให้มีอุณหภูมิ 70-75 องศาเซลเซียส และมีความชื้นมากกว่าร้อยละ 30 โดยการอบด้วยไอน้ำ ทำให้ข้าวเปลือกเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการหุงต้มและกลายเป็นข้าวเก่า

สืบสกุลและคณะ (2547) ศึกษาการออกแบบการทดลองในการทำแห้งนํ้านมข้าวแบบพ่นฝอยด้วยวิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว โดยมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิอากาศร้อน อัตราการป้อนสาร และอัตราไหลของอากาศร้อน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งนํ้านมข้าวแบบพ่นฝอยคือ อุณหภูมิอากาศร้อน 192.50 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 740 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และอัตราไหลของอากาศร้อน 35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

มัทนียา (2548) ศึกษากระบวนการเร่งความแก่ของข้าวเปลือกด้วยเทคนิคการอบแบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการเทมเปอร์ โดยนำข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่มีความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 21.9 และ 24.9 มาตรฐานเปียก อบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที จากนั้นเป่าด้วยอากาศแวดล้อมเป็นเวลา 30 นาที พบว่าสมบัติภายในของเมล็ดข้าวหลังจากอบแห้งมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับข้าวที่เก็บรักษาตามธรรมชาติ โดยมีค่าอัตราการยืดตัว ความขาว การขยายปริมาตร การดูดซับนํ้าของข้าวสุก และความหนืดของนํ้าแป้งเพิ่มขึ้น

จิรศักดิ์และคณะ (2549) ศึกษาบทบาทของอุณหภูมิและอายุการเก็บรักษาที่มีผลต่อองค์ประกอบของไขมัน สมบัติทางกายภาพและเคมีกายภาพของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยนำข้าวที่เก็บเกี่ยวใหม่มาลดความชื้นให้ได้ประมาณร้อยละ 15.23 จากนั้นนำข้าวกล้องใส่ลงในถุงพลาสติกและนำไปเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 25 และ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 7 เดือน พบว่าข้าวกล้องมีค่าสีเพิ่มขึ้น แป้งข้าวกล้องมีค่าคงตัวของแป้งสุกลดลง ข้าวที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 37

องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดลดลง และยังพบว่ากรดไขมันของข้าวที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส มีปริมาณต่ำกว่าข้าวที่เก็บไว้ในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

อารีรัตน์ (2549) ศึกษาผลของอุณหภูมิแวดล้อมต่ออุณหภูมิข้าวเปลือกและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวระหว่างเก็บรักษา โดยเก็บรักษาข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในถัง 4 แบบ ได้แก่ ถังที่มีการระบายอากาศและหุ้มฉนวน ถังที่ระบายอากาศไม่หุ้มฉนวน ถังที่ไม่ระบายอากาศหุ้มฉนวน และถังที่ไม่ระบายอากาศไม่หุ้มฉนวน เป็นเวลา 6 เดือน พบว่าถังเก็บที่ไม่ระบายอากาศและไม่หุ้มฉนวนทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองและค่าความหนืดของแป้งข้าวของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร มีค่าสูงขึ้นและแสดงคุณสมบัติการเป็นข้าวเก่าเมื่อเก็บรักษาได้เป็นเวลา 3 เดือน

จุฑารัตน์ (2550) ศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าสถิตแรงสูง โดยการนำข้าวเปลือก 3 สายพันธุ์ประกอบด้วย เล็บนกปีตธานี ขาวดอกมะลิ 105 และสังข์หยด มาปรับเพิ่มความชื้นให้อยู่ในช่วงร้อยละ 24-33 มาตรฐานแห้ง และนำข้าวเปลือกมาคิสซาร์จไฟฟ้า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 8 และ 10 กิโลโวลต์ ด้วยระยะเวลาในการคิสซาร์จไฟฟ้า 20, 30 และ 40 นาที จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ได้ไปอบแห้งแบบชั้นบางต่อที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่าคุณภาพทางเคมีกายภาพของข้าว (ค่าความคงตัวของเจล ค่าความสามารถในการสลายเมล็ดในคาง และลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก) โดยส่งผลให้ข้าวมีแนวโน้มเก่าขึ้น

คลฤดีและคณะ (2550) ศึกษาการเร่งความเก่าข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ โดยการนำข้าวกล้องหอมมะลิที่มีความชื้นร้อยละ 28.2-33.3 มาเก็บในถังปิดสนิทที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน และนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วอากาศ 2.6 เมตรต่อวินาที และนำไปเก็บในที่อับอากาศนาน 0.5, 1 และ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเป็นร้อยละ 16 พบว่า ระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านการหุงต้มของข้าว โดยมีค่าการดูดซับน้ำและค่าการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงส่งผลทำให้การจับตัวกันภายในของเมล็ดแป้งคลายตัวลง ดังนั้นเมื่อนำมาหุงต้มจะทำให้ น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้การยืดตัวของเมล็ดข้าวกล้องสุกเพิ่มขึ้น

พชรวรรณและคณะ (2550) ศึกษาเทคโนโลยีการปรับสภาพข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่า โดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 นาที สามารถทำให้ข้าวมีสมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงไป โดยทำให้ข้าวมีค่าการขยายปริมาตรและปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นเหมือนกับข้าวเก่า

สุนทรและคณะ (2552) ศึกษาการให้ความร้อนและความดันในการเร่งข้าวสารใหม่ ให้เป็นข้าวสารเก่าพันธุ์โพธิ์เงิน โพธิ์ทอง โดยใช้อุณหภูมิของอากาศในถังความดันเป็น 3 ระดับคือ

60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และเวลาในการเร่งเป็น 3 ระดับคือ 60, 90 และ 120 นาที โดยควบคุมความดันในถังให้คงที่ที่ 800 กิโลปาสคาล พบว่าหากต้องการนำข้าวไปหุงต้มเพื่อบริโภคหรือแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ควรเร่งที่สภาวะความดัน 800 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที

จุฑารัตน์และคณะ (2553) ศึกษาการกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในการเร่งความเก่าของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ด้วยวิธี Plackett & Burman โดยใช้มวลเริ่มต้นของข้าวสาร 2 ระดับ (1 และ 2 กิโลกรัม) อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน 2 ระดับ (60 และ 80 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาในการให้ความร้อน 2 ระดับ (60 และ 120 นาที) ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน 2 ระดับ (30 และ 40 รอบต่อนาที) และความดัน 2 ระดับ (2 และ 10 บาร์) พบว่าหากต้องการศึกษา 4 ปัจจัย สามารถคัดเลือกมวลเริ่มต้นของข้าวสารออกได้

Villarcal *et al.* (1976) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา โดยทำการเก็บรักษาข้าวชนิดต่าง ๆ ประกอบด้วย ข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวเหนียว สดาร์ช และข้าวที่ผ่านการสกัดไขมันไว้ที่อุณหภูมิ 2 และ 29 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่าข้าวเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานจะมีสมบัติด้านการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

Watanabe *et al.* (1991) ศึกษาสมบัติการหุงของข้าวเก่าพันธุ์ Akihikari ซึ่งทรีดท์ด้วยความดัน 50 ถึง 500 เมกะปาสคาล ที่ 10 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที ร่วมกับเอนไซม์ actinase, cellulose, pectolyase, transglutaminase และ lipase พบว่าการให้ความดัน 100 เมกะปาสคาล ร่วมกับเอนไซม์ actinase แก่เมล็ดข้าวทำให้สมบัติของข้าวในแง่การหุงต้มดีขึ้น

Gujral and Kumar (2003) ศึกษาผลกระทบจากกระบวนการเร่งความเก่าของข้าว ที่มีต่อคุณสมบัติทางด้านเคมีกายภาพและเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องและข้าวขาว โดยเร่งความเก่าของข้าวที่แตกต่างกัน 3 พันธุ์ ประกอบด้วย IR-8, Govinda และ Sharbati ด้วยการนำข้าวเปลือกที่มีความชื้นร้อยละ 14, 18 และ 22 ไปอบด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปสีจนเป็นข้าวขาวและนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบความต้านแรงดึง-แรงกด พบว่าการอบด้วยไอน้ำในระดับที่สูงขึ้นทำให้ข้าวมีค่าการยึดตัวของเมล็ดข้าวสุก ค่าการขยายปริมาตร ค่าการดูดซับน้ำ ค่าความแข็ง (hardness) และค่าความเหนียว (cohesiveness) เพิ่มขึ้น

Madamba and Yabes (2005) ศึกษาการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ Gandara แบบไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวโดยกำหนดตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัวได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม และระยะเวลาของการเก็บในที่อับอากาศ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่ต่อเนื่องคือ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และระยะเวลาของการเก็บในที่อับอากาศ 2 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วลมเป็นตัวแปรที่ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกแบบไม่ต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Wiset *et al.* (2005) ศึกษาผลของการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวเปลือกที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 สายพันธุ์คือ ข้าวพันธุ์ Langi, Amaroo และ Chainart I โดยนำมาทำการอบแห้ง 2 ขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกจะนำข้าวมาทำการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิดไดเซชันและอบจนข้าวมีความชื้นลดลงเป็นร้อยละ 18 จากนั้นนำไปอบแห้งต่อที่อุณหภูมิ 100, 125 และ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ข้าวมีความชื้นลดลงเป็นร้อยละ 14 แล้วนำข้าวไปตรวจวัดคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ พบว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีปริมาณต้นข้าว และการเกิดเจลของแป้งข้าว (setback) เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความคงทนต่ออุณหภูมิ (breakdown) ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งเพิ่มมากขึ้น

Gopika *et al.* (2007) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขัดสีข้าวบาสมาดิ (basmati rice) ที่ผ่านการทรีตต์ด้วยเอนไซม์โดยวิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว และกำหนดตัวแปรอิสระทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และระยะเวลา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขัดสีข้าวบาสมาดิที่ผ่านการทรีตต์ด้วยเอนไซม์คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ 0.0015 กรัมต่อมิลลิลิตร อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 2 ชั่วโมง

Jahani *et al.* (2008) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยเอนไซม์โดยใช้วิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว ซึ่งมีตัวแปรอิสระทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณเอนไซม์ ปริมาณน้ำ และอุณหภูมิ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสกัดน้ำมันรำข้าวด้วยเอนไซม์คือ ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา 4.07 ชั่วโมง ปริมาณเอนไซม์ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ปริมาณน้ำ 1.5 มิลลิตรต่อ 100 กรัม และอุณหภูมิ 49.2 องศาเซลเซียส

Soponronnarit *et al.* (2008) ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพเปรียบเทียบกันระหว่างข้าวที่เก่าตามธรรมชาติและข้าวที่เก่าเมื่อมีการเร่งสภาวะ ด้วยการนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันร่วมกับการเทมเปอร์และการระบายอากาศ พบว่าข้าวขาวที่ได้จะมีอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก ความขาว การขยายปริมาตร การดูดซับน้ำ ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำข้าวสุก และความหนืดเปลี่ยนแปลงไปคล้ายกับข้าวที่เก่าตามธรรมชาติ และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเร่งกระบวนการเก่าของข้าวคือ ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 33 อุณหภูมิการอบแห้งที่ 150 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการเทมเปอร์ 90 นาที

Jaisut *et al.* (2009) ศึกษากระบวนการเร่งความเก่าของข้าวกล้องพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน โดยการนำข้าวเปลือกมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาเทมเปอร์เป็นระยะเวลา 30-120 นาที พบว่าข้าวกล้องที่ได้จะมีคุณสมบัติด้านการหุงต้ม การรับประทาน ความแข็ง การขยายปริมาตร และอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวสุกเปลี่ยนแปลงไปคล้ายกับข้าวที่เก่าตามธรรมชาติ และพบว่าของอุณหภูมิกับระยะเวลาในการเทมเปอร์นั้นมีผลต่อคุณสมบัติของข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญ

สรุปกรอบแนวความคิด

จากการตรวจเอกสารพบว่างานวิจัยทั้งหมดดังกล่าวนี้จะกระตุ้นความเก่าของข้าว โดยใช้ข้าวเปลือกเป็นวัสดุตั้งต้นเท่านั้น และมักนิยมใช้น้ำเพื่อเพิ่มความชื้นให้กับข้าวก่อนที่จะนำมาทำการอบแห้งด้วยเทคนิควิธีการต่าง ๆ ทำให้ข้าวภายหลังการกระตุ้นที่ได้ต้องนำมาอบซ้ำอีกครั้ง มีเพียงงานวิจัยของสุนทรและคณะ (2552) ที่ทำการกระตุ้นความเก่าของข้าวโดยใช้ข้าวสารเป็นวัสดุตั้งต้น แต่พบว่ายังมีพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเร่งข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวสารเก่าอีกหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน ระดับความดันในถัง เป็นต้น พารามิเตอร์เหล่านี้ล้วนแต่มีความสำคัญต่อการกระตุ้นความเก่าของข้าว โดยหากใช้อุณหภูมิของอากาศในถังความดันสูงก็จะทำให้อัตราการอบแห้งสูง ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ แต่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้สารอาหารบางชนิดสูญเสียไป และในส่วนของความดันหากใช้ความดันสูงจะส่งผลแบบแปรผันตรงต่อความหนาของผนังถังความดันรวมถึงพลังงานที่ใช้ในการอัดความดันซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้จะทำให้อัตราต้นทุนในการผลิตของอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการเร่งข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวสารเก่า โดยใช้หลักการทางสถิติด้วยวิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology) จะทำให้ได้สถานะการเปลี่ยนข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวสารเก่าที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ทั้งยังสามารถลดจำนวนการทดลอง ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย องค์ความรู้ที่ได้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมข้าวของประเทศไทย และเกษตรกรผู้ผลิต ตลอดจนผู้บริโภค

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความเก่าของข้าวสารด้วยวิธีผลดอปสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว ซึ่งมีขั้นตอนของการศึกษาเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย รวมถึงสถานที่ดำเนินงานวิจัย โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษานี้มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	40 กิโลกรัม
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	1 กิโลกรัม
3. กรดอะซิติก (CH_3COOH)	2,500 ลิตร
4. ไอโอดีน (I_2)	100 กรัม
5. เอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	2,500 ลิตร
6. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	1 กิโลกรัม
7. โบรโมไทมอลบลู ($\text{C}_{27}\text{H}_{28}\text{Br}_2\text{O}_5\text{S}$)	10 กรัม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดทดสอบ

1. ถังความดัน ความจุ 8 ลิตร ทำด้วยเหล็กสเตนเลส	1 ชุด
2. โครงสร้างเครื่องพร้อมตู้ควบคุม	1 ชุด
3. ชุดควบคุมมอเตอร์	1 ชุด
4. เครื่องปรับความเร็วรอบ	1 เครื่อง
ยี่ห้อ Fuji รุ่น FRENIC-Mini series (C1S) ประเทศอังกฤษ	
5. ฮีตเตอร์ อินฟราเรด แบบหลอด	6 หลอด
ยี่ห้อ Infrapara รุ่น CS ($\text{Ø}17$ mm ยาว 300 mm)-500	

- | | |
|---|-------|
| 6. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (temp controller)
ยี่ห้อ Dixell รุ่น XC440C | 1 ชุด |
| 7. เทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (type K) | 1 ชุด |
| 8. มอเตอร์ 0.746 กิโลวัตต์ (1 hp) | 1 ชุด |
| 9. วาล์วเติมความดัน แบบวาล์วกันกลับ | 1 ตัว |
| 10. วาล์วปลดปล่อยแรงดัน | 1 ตัว |
| 11. เกจวัดความดัน | 1 ตัว |
| 12. เกจวัดอุณหภูมิ | 1 ตัว |

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพ

- | | |
|---|-----------|
| 1. เครื่องวัดสี (spectrophotometer)
ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE plus & Colorflex
ประเทศสหรัฐอเมริกา | 1 เครื่อง |
| 2. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)
ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 2 ประเทศเยอรมนี | 1 เครื่อง |
| 3. เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (rapid viscosity analyzer)
ยี่ห้อ Newport Scientific รุ่น RVA-4SA ประเทศออสเตรเลีย | 1 เครื่อง |
| 4. เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน
(magnetic stirrers with heating) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7
ประเทศสหรัฐอเมริกา | 1 เครื่อง |
| 5. เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยอินฟราเรด
(infrared moisture determination) ยี่ห้อ AND รุ่น AD-4714A
ประเทศญี่ปุ่น | 1 เครื่อง |
| 6. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter)
ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น 50 ประเทศเยอรมนี | 1 เครื่อง |
| 7. เครื่องวัดความเร็วรอบแบบดิจิตอล (digital tachometer)
ยี่ห้อ Digicon รุ่น DT 250TP ประเทศเยอรมนี | 1 เครื่อง |
| 8. ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (thermostatically controlled cabinets)
ยี่ห้อ Termaks รุ่น KBP 6395F ประเทศสวีเดน | 1 เครื่อง |
| 9. เครื่องปิดผนึกแบบสุญญากาศ (vacuum pack machine)
ยี่ห้อ Multivac รุ่น C 100 ประเทศเยอรมนี | 1 เครื่อง |

10. เครื่องเขย่า (vortex mixture)	1 เครื่อง
ยี่ห้อ Vortex-genie 2 รุ่น G-560E ประเทศสหรัฐอเมริกา	
11. เครื่องบดละเอียด (medicinal material pulzerizer)	1 เครื่อง
ยี่ห้อ Haopeng รุ่น ST-04 ประเทศจีน	
12. เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน	1 เครื่อง
13. เครื่องนึ่งไฟฟ้า ยี่ห้อ Tefal รุ่น VC1001 ประเทศจีน	1 เครื่อง
14. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตัวเลข (digital balance)	1 เครื่อง
ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S ประเทศเยอรมนี	
15. เครื่องมือวัดแบบมีขีดมาตรา (vernier caliper)	1 ชิ้น
16. คิวเวทพลาสติก	4 กล่อง
17. ตะแกรงร่อน เบอร์ 150 เมช	1 ชิ้น
18. กระจงอะลูมิเนียม	12 กระจง
19. บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร	5 ชุด
20. บีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร	10 ชุด
21. ขวดปรับปริมาตร	5 ชุด
22. หลอดทดลอง	12 ชุด
23. จานแก้วมีฝาปิด	12 ชุด
24. แท่งแก้วคนสาร	2 แท่ง
25. ช้อนตวงสาร	2 คัน
26. ถาดสเตนเลส	3 ใบ
27. ถุงอะลูมิเนียมฟอยล์	33 ใบ
28. ถุงซิปล็อก	33 ใบ
29. นาฬิกาจับเวลา	1 เครื่อง

วัสดุและวิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้มีวัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัยโดยละเอียด ดังนี้

การเตรียมตัวอย่างข้าวสาร

ข้าวที่ใช้เป็นข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ทำการเพาะปลูกในเขตอำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่ ที่เก็บเกี่ยวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2552 และเริ่มทำการทดลองในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2553 ข้าวนี้ถูกขัดสีและขัดขาวด้วยเครื่องสีข้าวกล้องจนได้เป็นข้าวสาร มีความชื้นเฉลี่ยประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากนั้นบรรจุข้าวในถุงอะลูมิเนียมพอยล์ ปิดผนึกบริเวณปากถุงแบบสุญญากาศเพื่อให้ข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นข้าวเก่าจากอิทธิพลของปัจจัยภายนอกน้อยที่สุด โดยนำมาเก็บรักษาไว้ในสภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 45 เปอร์เซ็นต์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงค่าสี ปริมาณอะไมโลส และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ต่าง ๆ (พัศกร, 2546)

การวางแผนการทดลอง

จากงานวิจัยของจุฑารัตน์และคณะ (2553) ที่ทำการคัดเลือกและกลั่นกรองปัจจัยสำหรับกระตุ้นข้าวสารใหม่เป็นข้าวสารเก่าด้วยวิธี Plackett & Burman โดยใช้ความรู้ร่วมกับความดันสูง พบว่าหากต้องการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพข้าวสารภายหลังการกระตุ้นให้ข้าวสารใหม่เปลี่ยนเป็นข้าวสารเก่า 4 ปัจจัย มีปัจจัยที่คัดเลือกและกลั่นกรองได้คือ อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน และความดัน ในการศึกษานี้กำหนดขอบเขตล่างและขอบเขตบนสำหรับตัวแปรทั้งสี่ดังกล่าวโดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาของสุเนตรและคณะ (2552) และจุฑารัตน์และคณะ (2553) ดังตาราง 9

ตาราง 9 ค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนของตัวแปรอิสระ

ตัวแปรอิสระ (หน่วย)	ค่าขอบเขตล่าง	ค่าขอบเขตบน
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	60	80
ระยะเวลาในการกระตุ้น (นาที)	60	120
ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	30	40
ความดัน (บาร์)	2	10

โดยมีความหมายของตัวแปรอิสระต่าง ๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน เป็นอุณหภูมิของอากาศภายในถังความดัน โดยทำการวัดอุณหภูมิจากเกจวัดอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมได้ด้วยการทำงานของ Temperature Controller (ยี่ห้อ Dixell รุ่น XC440C) ที่รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (Type K) ทำให้อุณหภูมิของอากาศในถังความดันสามารถปรับได้สูงสุดถึง 80 องศาเซลเซียส

2. ระยะเวลาในการให้ความร้อน เป็นระยะเวลาที่ใช้ให้ความร้อนแก่ข้าวสารที่อยู่ในถังความดัน โดยทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในถังความดันมีอุณหภูมิตรงตามที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถสังเกตอุณหภูมิภายในถังความดันได้จากเกจวัดอุณหภูมิที่ติดอยู่ด้านนอกของถัง และทำการจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา

3. ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน เป็นจำนวนรอบในการหมุนถังความดันที่ใช้บรรจุข้าวสารต่อนาที ซึ่งควบคุมได้ด้วยการทำงานของ Inverter (ยี่ห้อ Fuji รุ่น FRENIC-Mini series (C1S)) โดยการตั้งความเร็วรอบที่ตัวควบคุมด้านหน้าของ Inverter

4. ความดัน เป็นความดันเหนือบรรยากาศของอากาศภายในถังความดัน ตัวถังทำด้วยเหล็กสแตนเลสหนา 5 มิลลิเมตร ส่วนหน้าแปลนหนา 12.7 มิลลิเมตร โดยทำการวัดความดันจากเกจวัดความดัน แหล่งความดันคือปั๊มลม (ยี่ห้อ Iwata รุ่น TLP/55/14) ซึ่งสามารถสร้างความดันสูงสุดได้ถึง 12 บาร์

เมื่อกำหนดขอบเขตล่างและขอบเขตบนในแผนการทดลองแบบ Central Composite Design ในโปรแกรม Minitab 16 Statistical Software จะได้จำนวนสิ่งทดลองทั้งหมดเท่ากับ 31 การทดลอง ดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 จำนวนสิ่งทดลองที่ต้องศึกษาเมื่อวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design

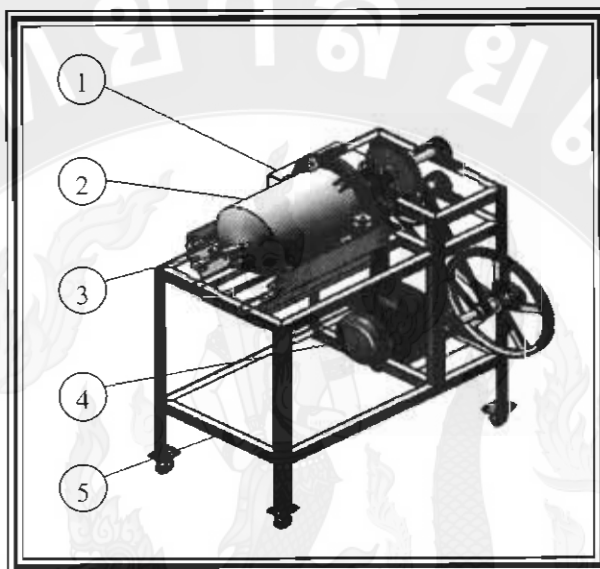
สิ่งทดลอง	ตัวแปรอิสระ			
	อุณหภูมิ (X_1)	เวลา (X_2)	ความเร็วรอบ (X_3)	ความดัน (X_4)
1	65	75	32.5	4
2	65	75	32.5	8
3	65	75	37.5	4
4	65	75	37.5	8
5	65	105	32.5	4
6	65	105	32.5	8
7	65	105	37.5	4

ตาราง 10 (ต่อ)

สิ่งทดลอง	ตัวแปรอิสระ			
	อุณหภูมิ (X_1)	เวลา (X_2)	ความเร็วรอบ (X_3)	ความดัน (X_4)
8	65	105	37.5	8
9	75	75	32.5	4
10	75	75	32.5	8
11	75	75	37.5	4
12	75	75	37.5	8
13	75	105	32.5	4
14	75	105	32.5	8
15	75	105	37.5	4
16	75	105	37.5	8
17	60	90	35.0	6
18	80	90	35.0	6
19	70	60	35.0	6
20	70	120	35.0	6
21	70	90	30.0	6
22	70	90	40.0	6
23	70	90	35.0	2
24	70	90	35.0	10
25	70	90	35.0	6
26	70	90	35.0	6
27	70	90	35.0	6
28	70	90	35.0	6
29	70	90	35.0	6
30	70	90	35.0	6
31	70	90	35.0	6

การเปลี่ยนสภาพข้าวด้วยชุดให้ความร้อนและความดัน

ชุดทดสอบการให้ความร้อนและความดันแสดงในภาพ 17 เป็นระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองโดยสังเขป ดังนี้



① กล่องควบคุมการทำงาน ② ถังความดัน ③ ชุดให้ความร้อน ④ มอเตอร์ไฟฟ้า ⑤ ชุดโครงสร้าง

ภาพ 17 ชุดให้ความร้อนและความดันแก่ข้าวสาร

ที่มา: สุเนตรและคณะ (2552)

1. นำข้าวสารออกจากตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยเทใส่ถาดสเตนเลส และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 8 ชั่วโมง
2. ชั่งข้าวสารจำนวน 1 กิโลกรัม ใส่ถังความดัน และทำการปิดฝาถังความดัน
3. ติดตั้งถังความดันเข้ากับชุดให้ความร้อนและความดัน
4. เติมลมจำนวน 2, 4, 6, 8 และ 10 บาร์ ในถังความดัน ตามลำดับการทดลองดังตาราง 10
5. ปรับตั้งอุณหภูมิของหลอดอินฟาเรดจากชุดควบคุมอุณหภูมิ เป็น 85, 92, 99, 108 และ 113 องศาเซลเซียส เพื่อให้อุณหภูมิอากาศภายในถังความดันมีค่าเท่ากับ 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับการทดลองดังตาราง 10 โดยใช้เวลาดังแต่เริ่มเปิดฮีตเตอร์จนอุณหภูมิอากาศได้ตามที่ต้องการประมาณ 30, 45, 60, 75 และ 90 นาที ตามลำดับ
6. ปรับตั้งความเร็วรอบจากเครื่องปรับความเร็วรอบ เป็น 8.71, 9.36, 9.95, 10.72 และ 11.31 เฮิร์ตซ์ เพื่อให้ถังความดันหมุนด้วยความเร็วเท่ากับ 30.0, 32.5, 35, 37.5 และ 40.0 รอบต่อ นาที ตามลำดับการทดลองดังตาราง 10

7. ตั้งเกตุอุณหภูมิภายในถังความดันจากเกจวัดอุณหภูมิ เมื่ออากาศมีอุณหภูมิตามที่ ต้องการ จากนั้นทำการจับเวลานาน 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ตามลำดับการทดลองดังตาราง 10 เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดปล่อยให้ถังความดันเย็นลง และถอดถังความดันออกจากชุดให้ความร้อน และความดัน ทำการเปิดฝาของถังความดันเพื่อนำข้าวสารที่ผ่านการทดลองออก จากนั้นนำข้าวสารที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 8 ชั่วโมง

8. นำข้าวสารที่ผ่านการทดลองแล้วไปตรวจวัดคุณภาพ เปรียบเทียบกับข้าวสารใหม่ และข้าวสารเก่าพันธุ์เดียวกัน

9. ทำซ้ำข้อ 1-8 โดยเปลี่ยนปัจจัยไปเรื่อย ๆ จนครบตามจำนวนการทดลองที่วางไว้

การตรวจวัดคุณภาพข้าว

การตรวจวัดคุณภาพข้าวหลังจากการเปลี่ยนสภาพข้าวด้วยชุดให้ความร้อนและความดันแสดงดังภาคผนวก ก และ ข เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางด้านต่าง ๆ ของข้าว และสามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ โดยการตรวจวัดคุณภาพข้าวทางเคมีทั้งหมดปฏิบัติตามวิธีการของกลุ่มอุตสาหกรรมข้าวในจังหวัดพิษณุโลก และค่าความหนืดของน้ำแป้งปฏิบัติตามวิธีการมาตรฐานของ AACCC (The American Association of Cereal Chemists) ส่วนค่าปริมาณการแตกหักและค่าสีปฏิบัติตามมาตรฐานทั่วไป โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1. คุณภาพทางกายภาพ

1.1 การตรวจวัดค่าสี

ค่าสีเป็นสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ สำหรับข้าวเปลือกที่เก็บไว้นานถ้านำไปสีจะได้ข้าวสารสีคล้ำกว่าข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ ๆ ดังนั้นความขาวของข้าวจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของข้าว ซึ่งการวัดค่าสีของข้าวสารใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE plus & Colorflex) ใช้หลอดชนิด daylight color mode D 65 มุมตกกระทบ 10 องศา โดยเลือกใช้มาตรฐานของ Commission international de l'eclairage (CIE) ซึ่งจะบรรยายค่าสีของข้าวในทอมของพารามิเตอร์ L^* a^* b^* โดยค่า L^* เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความสว่างของข้าว โดยมีสเกลจากดำถึงขาว (0-100) ค่า a^* เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความเป็นสีแดงและสีเขียว (+a ถึง -a) ค่า b^* เป็นค่าที่ใช้บอกความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน (+b ถึง -b) ทำการศึกษาโดยสุ่มข้าวสารที่ได้จากการเร่งความเก่า 30 กรัมมาตรฐานวัดพร้อมทั้งอ่านค่า L^* a^* b^* ที่ได้ และนำค่าไปวิเคราะห์ผล

1.2 การตรวจวัดปริมาณการแตกหัก

การหาปริมาณการแตกหัก หมายถึงการแยกข้าวหักออกจากข้าวต้น โดยนำข้าวสารจำนวน 100 กรัม มาคัดแยกข้าวหักด้วยเครื่องคัดแยกแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน ที่มีขนาดหลุมเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ถาดรองรับทำมุม 30 องศา นาน 5 นาที จากนั้นชั่งข้าวสารแตกหักที่แยกได้ และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การแตกหักจากการเร่งด้วยความร้อนและความดัน โดยลบการแตกหักก่อนการเร่งออก ก็จะเป็นผลการแตกหักจากการเร่งความเก่า

2. คุณภาพทางเคมี

2.1 การตรวจวัดปริมาณอะไมโลส

ในเมล็ดข้าวจะประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในสัดส่วนที่แตกต่างกันไป ส่วนมากจะพบปริมาณอะไมโลสในข้าวเก่ามากกว่าในข้าวใหม่ การหาปริมาณอะไมโลสทำได้โดยนำข้าวสารที่ได้จากการเร่งความเก่าไปบดด้วยเครื่องบดละเอียดนาน 15 วินาที และเขย่านาน 20 วินาที ทำซ้ำ 4 ครั้ง แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 150 เมช ชั่งตัวอย่างที่ร่อน 0.100 กรัม ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นเอทานอลร้อยละ 95 จำนวน 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมล จำนวน 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันประมาณ 5 นาที เติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร นำไปอุ่นในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ประมาณ 5 นาที ปิเปตน้ำแป้งมา 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรใบใหม่ เติมน้ำกลั่นกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 โมล จำนวน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร ทำ blank โดยไม่ต้องใช้น้ำแป้ง แต่เติมน้ำกลั่นเหมือนกันหมด และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (A) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 2) ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร (ปรับค่า 0 ด้วย blank ก่อน) นำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณอะไมโลสจาก

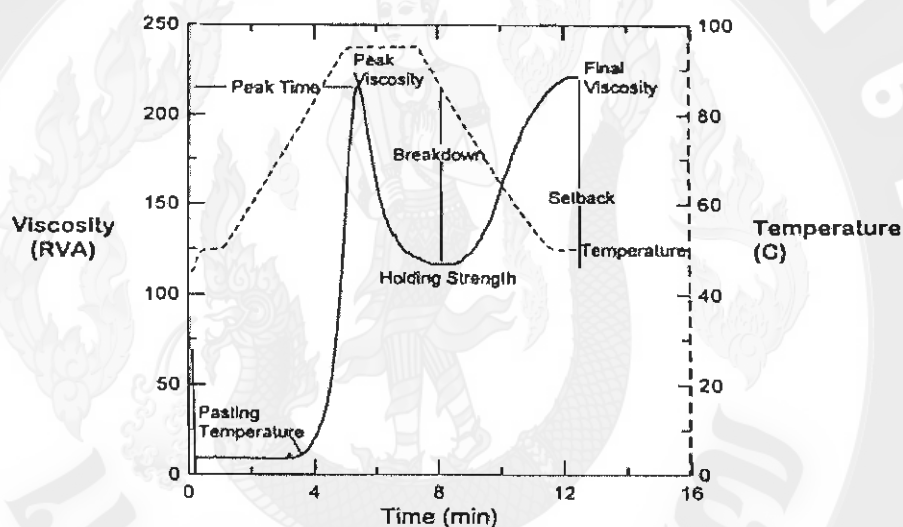
$$\text{ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)} = (74 \cdot A) - 0.16 \quad (4)$$

3. คุณภาพทางเคมีกายภาพ

3.1 การตรวจวัดความหนืดของน้ำแป้ง

นำข้าวสาร 100 กรัม บดด้วยเครื่องบดละเอียดนาน 15 วินาที และเขย่านาน 20 วินาที ทำซ้ำ 4 ครั้ง แล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 150 เมช ชั่งตัวอย่างข้าวที่ร่อนแล้ว 3 กรัม ใส่ในถุงพลาสติกพร้อมปิดปากถุงด้วยการรัดยางและเก็บในกระป๋องอะลูมิเนียม เมื่อต้องการวัดค่าความหนืดต้องคำนวณปริมาณน้ำที่จะเติมเพื่อปรับค่าความชื้นให้เป็นร้อยละ 14 และปิเปตน้ำกลั่น 10

มิลลิลิตร ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียม เทแป้งที่เตรียมไว้ใส่ในกระป๋องอะลูมิเนียม จากนั้นปิเปตน้ำกลั่นอีก 5 มิลลิลิตร นำมาชะล้างแป้งที่ติดบริเวณอุ้งพลาสติก ปิเปตน้ำกลั่นเพิ่มอีก 10 มิลลิลิตร ใส่ในกระป๋องอลูมิเนียม ใส่ใบพัดในกระป๋องอลูมิเนียมแล้วหมุนไปทางด้านซ้าย 20 ครั้ง และขวา 20 ครั้ง เพื่อให้แป้งและน้ำผสมกัน จากนั้นนำไปหาค่าความหนืดโดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Viscosity Analyzer, RVA, ยี่ห้อ Newport Scientific รุ่น RVA-4SA) โดยการให้ความร้อนจากจุดเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อีกครั้ง รวมเวลาทดสอบทั้งสิ้น 13 นาที ต่อ 1 ตัวอย่าง แล้วแปลผลคุณภาพของแป้งข้าวสารจากเส้นโค้งความหนืดดังภาพ 18



ภาพ 18 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำแป้งด้วยเครื่อง RVA
ที่มา: สิริรัตน์ (2547)

โดยมีความหมายของเส้นโค้งความหนืดต่าง ๆ ดังนี้

peak viscosity = ความหนืดสูงสุดเมื่อให้ความร้อน

trough viscosity = ความหนืดต่ำสุดเมื่อให้ความร้อนเป็นเวลานาน

breakdown = ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด

holding strength = ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำเย็น

final viscosity = ความหนืดหลังลดอุณหภูมิ

setback from peak = ผลต่างของ final viscosity กับ peak viscosity

setback from trough = ผลต่างของ final viscosity กับ trough viscosity

peak time = เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด

pasting temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด

3.2 การตรวจวัดค่าการสลายเมล็ดในค้าง

ผู้บริโภคนิยมรับประทานข้าวที่หุงสุกหึ่งเมล็ด และในเมล็ดข้าวมีสารพิษ เป็นองค์ประกอบหลักถึงประมาณร้อยละ 85 ดังนั้นการทำให้ข้าวสุกจะทำให้สารพิษเกิดเจลาทีไนซ์ และส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก เช่น ถ้าสารพิษยังไม่เกิดเจลาทีไนซ์จะทำให้เนื้อสัมผัส แข็งไม่เหมาะต่อการบริโภค และเวลาที่ใช้ในการเจลาทีไนซ์บอกถึงเวลาในการทำให้ข้าวสุก และ อุณหภูมิการเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization Temperature, GT) เป็นค่าที่บ่งบอกคุณภาพการหุง ของข้าวอย่างหนึ่ง การหาค่าสลายตัวของเมล็ดข้าวสารด้วยค่าต่าง ๆ ทำได้โดยนำเมล็ดข้าวสารจำนวน 30 เมล็ดใส่ในจานแก้วมีฝาปิด 3 จาน ๆ ละ 10 เมล็ด เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 1.7 นำหนักต่อปริมาตร (เตรียมโดยทำการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 17 กรัม ในน้ำกลั่น 1 ลิตร) จนท่วมเมล็ดข้าว (ระวังอย่าให้เมล็ดข้าวลอย) ทิ้งไว้ข้ามวัน (ประมาณ 24 ชั่วโมง) ที่ อุณหภูมิห้อง ตรวจวัดค่าสลายตัวของเมล็ดข้าวสารด้วยค่าต่าง ๆ ตามลักษณะของเมล็ดข้าว ดังนี้

- 1 = เมล็ดข้าวยังสมบูรณ์
- 2 = เมล็ดข้าวเริ่มพองตัว
- 3 = เมล็ดข้าวพองตัว แต่ยังเห็น โครงร่างเมล็ด
- 4 = เมล็ดข้าวพองตัวเต็มที่ ไม่เห็น โครงร่างเมล็ด
- 5 = เมล็ดข้าวแยกจากกัน
- 6 = เมล็ดข้าวสลายตัวแต่ยังเห็นเนื้อเมล็ดข้าว
- 7 = เมล็ดข้าวสลายตัวหมด จนไม่เห็นเนื้อข้าว

จัดระดับของค่าจีที เป็น 3 ระดับได้แก่

- คะแนน 6-7 ค่าจีทีต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส (หุงง่ายสุกเร็ว)
- คะแนน 4-5 ค่าจีที 70-74 องศาเซลเซียส (ปานกลาง)
- คะแนน 1-3 ค่าจีที 75-79 องศาเซลเซียส (หุงยาก สุกช้า)

3.3 การตรวจวัดความใหม่-เก่าของข้าว

ข้าวมีองค์ประกอบของไขมันตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถเปลี่ยนสภาพโดย กระบวนการออกซิเดชันไปเป็นกรดไขมันอิสระ (free fatty acids) และเปลี่ยนเป็น hexanal โดยปริมาณของกรดไขมันอิสระและ hexanal จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บรักษา ดังนั้นเราจึงสามารถ ตรวจวัดความใหม่-เก่าของข้าวสาร ได้โดยชั่งตัวอย่างข้าว 5 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย อินดิเคเตอร์ประมาณ 10 มิลลิลิตร (เตรียมโดยชั่ง bromothymol blue 0.3 กรัม ละลายในเอทานอล 150 มิลลิลิตร และเติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร จะได้ stock solution เตรียม working solution โดยการเจือจางในน้ำกลั่นโดยใช้สัดส่วน 1:30 จากนั้นปรับ pH ให้เป็นกลาง (7.0) โดยใช้สารละลาย potassium hydroxide 0.2 เปอร์เซ็นต์ กรณีสารละลายเป็นกรด และใช้สารละลาย HCl 0.05 นอร์มัล กรณี

สารละลายเป็นค่า และเขย่าให้เข้ากันนานประมาณ 5-10 นาที ด้วยเครื่องเขย่า แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนที่เป็นสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (A) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 2) ที่ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร จากนั้นทิ้งไว้ 5 นาที แล้วนำไปวัดซ้ำอีกครั้งที่ความยาวคลื่น 690 นาโนเมตร หาค่าความแตกต่างระหว่างการวัดครั้งแรก และวัดครั้งที่ 2 ค่า A ที่แตกต่างกันมากแสดงให้เห็นว่าข้าวเป็นข้าวใหม่ ถ้าค่า A มีความแตกต่างกันน้อยหรือใกล้เคียงกันมากแสดงว่าเป็นข้าวเก่า

3.4 การตรวจวัดการขยายปริมาตร

การตรวจสอบลักษณะการขยายปริมาตร ทำได้โดยกำหนดตัวแปรอิสระที่ศึกษา 2 ปัจจัยคือ ตัวอย่างข้าว 3 ตัวอย่างได้แก่ ข้าวภายหลังการกระตุ้น ข้าวใหม่ และข้าวเก่า และปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม 3 ระดับได้แก่ 1.3, 1.5 และ 1.7 เท่า จัดแผนการทดสอบเป็นแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design) ทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ โดยมีตัวแปรตามคือ อัตราการขยายปริมาตรของข้าว ส่วนตัวแปรควบคุมคือ น้ำหนักเริ่มต้นของข้าว (15 กรัม) ระยะเวลาในการนึ่งข้าว (30 นาที) ระยะเวลาในถังถึง (15 นาที) อุณหภูมิห้อง (32 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิน้ำเดือด (99 องศาเซลเซียส) โดยทำการชั่งข้าวสาร 15 กรัมที่ผ่านการสุ่มจากเครื่องสุ่มตัวอย่างใส่ในกระป๋องอะลูมิเนียมซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงเท่ากับ 5.18 และ 4.08 เซนติเมตร ตามลำดับ จากนั้นเติมน้ำกลั่น 1.3, 1.5 และ 1.7 เท่าของข้าวสาร ตามลำดับ ทำการวัดความสูงจากกันกระป๋องจนถึงระดับน้ำด้วยเครื่องมือวัดแบบมีขีดมาตรา (vernier caliper) จำนวน 5 จุด และทำการนึ่งข้าวด้วยหม้อนึ่งไฟฟ้า (ยี่ห้อ Tefal รุ่น VC1001) เพื่อให้ข้าวได้รับความร้อนจากการนึ่งอย่างสม่ำเสมอ โดยทำการจับเวลาตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนนาน 30 นาที และหยุดให้ความร้อนพร้อมทั้งปล่อยให้ข้าวระอุโดยทิ้งไว้ในหม้อนึ่งไฟฟ้านาน 15 นาที จากนั้นนำกระป๋องอะลูมิเนียมออกจากหม้อนึ่งไฟฟ้าพร้อมกับวัดความสูงที่บริเวณเดิมจำนวน 5 จุด และคำนวณหาการขยายปริมาตรของข้าว โดยใช้ค่าความแตกต่างระหว่างส่วนสูงก่อนการนึ่งและส่วนสูงหลังการนึ่ง ซึ่งมีหน่วยเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตัวแปรอิสระที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ปัจจัย ๆ ละ 5 ระดับคือ อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน 5 ระดับ ได้แก่ 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 5 ระดับ ได้แก่ 60, 75, 90, 105 และ 120 นาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน 5 ระดับ ได้แก่ 30, 32.5, 35, 37.5 และ 40 รอบต่อนาที และความดัน 5 ระดับ ได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 บาร์ จัดแผนการทดสอบเป็นแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ทดสอบซ้ำ 1 ซ้ำ และเลือก ระดับ (levels) เป็น axial points โดยมีตัวแปรตามคือ คุณภาพของข้าวสารภายหลังการกระตุ้น

เปรียบเทียบกับข้าวที่ทำให้เก่าโดยวิธีธรรมชาติ ส่วนตัวแปรควบคุมคือ พันธุ์ข้าว (ขาวดอกมะลิ 105) และมวลเริ่มต้นของข้าว (1 กิโลกรัม) จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตอบสนองด้วยแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป (full quadratic model) ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 Statistical Software ดังมีรายละเอียดคือ

1. การศึกษาความสัมพันธ์ของการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป

ในการศึกษาความสัมพันธ์ของการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูปทำได้โดยการนำตัวแปรตาม (ค่าผลตอบสนอง) ที่ได้จากการทดลองใส่ลงใน โปรแกรม Minitab 16 Statistical Software และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ในรูปแบบ full quadratic model พร้อมทั้งพิจารณาค่า P-value โดยหาค่า P-value ของ Regression มากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่หากน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กัน ซึ่งระดับความสัมพันธ์จะมากหรือน้อย พิจารณาจากค่า R^2_{adj} และค่า lack of fit โดยค่าทั้งสองยังมีค่าสูง แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามยังมีความสัมพันธ์กันมาก

2. การกำหนดสภาวะการเร่งความเก่าของข้าวสารที่เหมาะสม

จากความสัมพันธ์ในหัวข้อที่ 1 เมื่อพิจารณาค่า R^2_{adj} และค่า lack of fit จะสามารถกำหนดค่าผลตอบสนองที่จะนำไปใช้ในการกำหนดสภาวะการเร่งความเก่าของข้าวสารที่เหมาะสม โดยใช้ค่าผลตอบสนองต่ำสุดและสูงสุดภายหลังการกระตุ้นเป็นค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนตามลำดับ และใช้ค่าผลตอบสนองของข้าวเก่าเป็นค่าเป้าหมาย ดังตาราง 11 จะได้สภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวสารเก่าด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับความดันสูง

ตาราง 11 เกณฑ์ของค่าผลตอบที่ต้องการ

ค่าผลตอบสนอง (หน่วย)	ค่าขอบเขตล่าง	ค่าเป้าหมาย	ค่าขอบเขตบน
ความหนืดของน้ำแป้ง			
- breakdown (cP)	563.33	881.33	1458.33
- final viscosity (cP)	2547.00	3319.00	3798.00
- setback from trough (cP)	1032.00	1366.33	1735.67
- pasting temperature ($^{\circ}$ C)	70.67	83.67	85.98

3. การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง

การยืนยันผลหรือการทวนสอบผลการทดลองทำได้โดยนำค่าสถานะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสภาพข้าวจากข้าวสารใหม่เป็นข้าวสารเก่าที่ได้จากการคำนวณมาทำการทดลองจริงและนำค่าของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลองจริงมาเปรียบเทียบกับค่าของตัวแปรตามที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าสถิติตัดสินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ (Adjusted R Square, R^2_{adj}) ค่าประมาณความแปรปรวนจากค่าถดถอย (lack of fit) และค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (Reduced Mean Relative Error, RMRE)

3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเชิงพหุ (R^2_{adj})

ค่า R^2_{adj} เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่ได้ปรับค่าแล้วและใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของสมการที่มีตัวแปรอิสระหลายตัว ซึ่งจะมีความหมายเหมือนกับค่า R^2 ที่หมายถึงการอธิบายสัดส่วนที่ตัวแปรต้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ ดังนั้นถ้าหากค่า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรตามและตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กันมาก หรือตัวแปรต้นสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้มากนั่นเอง

3.2 ค่าประมาณความแปรปรวนจากค่าถดถอย (lack of fit)

ค่า lack of fit เป็นค่าที่สามารถอธิบายโดยใช้หลักการของผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่แท้จริง (SS. pure error) และผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการกำหนดตัวแบบซึ่งผิดไปจากที่ควรจะเป็น (SS. lack of fit) ซึ่งเขียนในรูปของแผนภาพได้ดังภาพ 19

3.3 ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์เฉลี่ย (RMRE)

ค่า RMRE เป็นค่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยหาได้จากผลรวมของค่าสัมบูรณ์ระหว่างค่าจากการทำนายและค่าจากการทดลองหารด้วยจำนวนค่าสังเกตทั้งหมด มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (Janjai *et al.*, 2006) โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณมี ดังนี้

$$RMRE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{M_o - M_p}{M_o} \right| \quad (5)$$

กำหนดให้

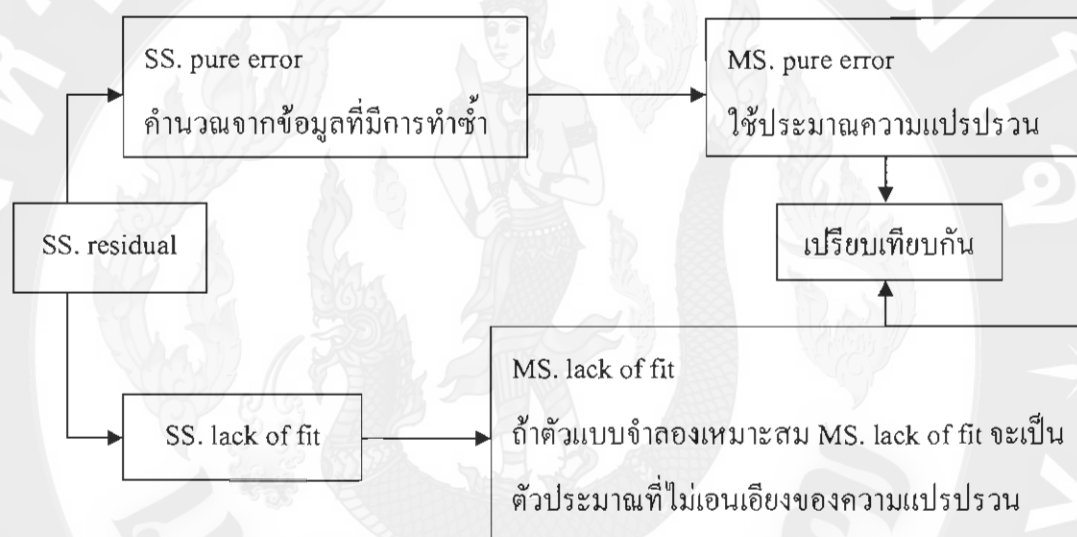
M_o = ค่าจากการทดลอง (observed values)

M_p = ค่าจากการทำนาย (predicted values)

N = จำนวนค่าสังเกต

4. การตรวจสอบลักษณะการขยายปริมาตร

การตรวจสอบการขยายปริมาตรทำได้โดยการนำค่าการขยายปริมาตรของข้าวที่ได้จากการทดลองใส่ลงในโปรแกรม PASW Statistical 18 และวิเคราะห์ความแปรปรวนในรูปแบบ Multiple-Factors ANOVA โดยหากค่า P-value ของ Regression มากกว่า 0.05 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่หากน้อยกว่า 0.05 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กัน และนำตัวแปรที่มีค่า P-value ของ Regression น้อยกว่า 0.05 หรือตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันมาทำการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ (Multiple comparison test) แบบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT)



ภาพ 19 กระบวนการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง
ที่มา: สมศรี (2536)

สถานที่ดำเนินการวิจัย

ทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการ E317 และ E416 อาคารเรียนรวมสาขา
วิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และทำการตรวจสอบ
คุณภาพ ณ ห้องปฏิบัติการ EA208, EA406 และ EA305 อาคารสมิตานนท์ คณะวิศวกรรมและ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความเก่าของข้าวสารด้วยวิธีผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว ซึ่งในบทนี้เป็นการนำเสนอผลและวิจารณ์ผลการทดลองจากการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตอบสนอง โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตอบสนอง

ภายหลังจากการเร่งความเก่าของข้าวสารด้วยชุดให้ความร้อนและความดันแก่ข้าวสารตามแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) โดยนำข้าวสารที่ผ่านกระบวนการเร่งความเก่าไปตรวจวัดคุณภาพต่าง ๆ จากนั้นนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป (full quadratic model) ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 และหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสาร ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป

จากผลการทดลองแสดงในตารางผนวก ค เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์การถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป ได้ผลความสัมพันธ์ดังตาราง 12 โดยหากค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน แต่หากน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กัน ส่วนค่า R^2_{adj} และค่า Jack of fit ยังมีค่าสูง แสดงว่าตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามยังมีความสัมพันธ์กันมาก

ตาราง 12 การทดสอบการถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูปของแบบจำลองต่าง ๆ ในแบบลอครหัส

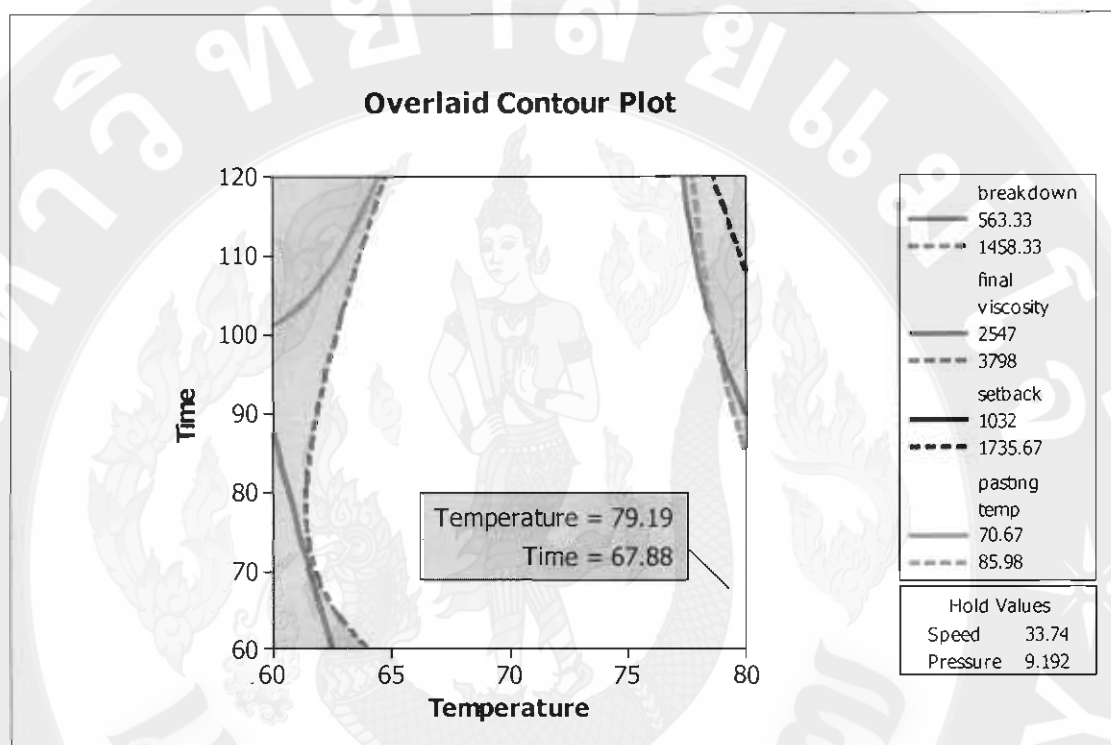
ค่าผลตอบสนอง (หน่วย)	สมการแบบจำลอง	P-value	R ² _{adj}	lack of fit	สมการ
สี L*	-	0.126	14.92	0.955	-
สี a*	-	0.005	48.32	0.490	-
สี b*	-	0.000	61.04	0.935	-
ปริมาณอะไมโลส	-	0.149	20.48	0.995	-
ความใหม่-เก่า	-	0.130	22.25	0.512	-
ปริมาณการแตกหัก (%)	-	0.115	20.64	0.838	-
peak viscosity (cP)	-	0.003	52.77	0.564	-
trough viscosity (cP)	-	0.003	49.66	0.965	-
breakdown (cP)	$2805.6200+149.6490X_1+26.2651X_2-380.6800X_3+24.3960X_4-0.9644X_1^2+0.1049X_2^2+5.5825X_3^2-0.6936X_1X_2$	0.000	76.73	0.676	(5)
final viscosity (cP)	$14616.4000+57.1749X_1+6.4889X_2-852.5900X_3-384.4390X_4-1.5718X_1^2+5.3461X_3^2+6.1700X_1X_3+10.6915X_3X_4$	0.000	74.00	0.974	(6)
setback from trough (cP)	$5992.7700-152.3990X_1-22.4674X_2+143.2390X_3+1.1689X_1^2+0.3642X_1X_2-2.1521X_1X_4$	0.000	92.30	0.516	(7)
peak time (min)	-	0.005	43.96	0.755	-
pasting temperature (°C)	$6.18-3.21X_1-0.43X_2+8.28X_3+8.44X_4+0.04X_1^2-0.00X_2^2-0.06X_3^2+0.01X_1X_2-0.05X_1X_3-0.06X_1X_4-0.13X_3X_4$	0.000	72.35	0.722	(8)

หมายเหตุ peak viscosity หมายถึง ค่าความหนืดสูงสุด trough viscosity หมายถึง ค่าความหนืดต่ำสุด breakdown หมายถึง ผลต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด final viscosity หมายถึง ค่าความหนืดหลังลดอุณหภูมิ setback from trough หมายถึง ผลต่างของความหนืดหลังลดอุณหภูมิและความหนืดต่ำสุด peak time หมายถึง เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด pasting temperature หมายถึง อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด

จากตาราง 12 ซึ่งให้เห็นว่า ค่าตัวแปรตอบสนองที่ประกอบด้วย ค่าสี L* ค่าปริมาณอะไมโลส ค่าความใหม่-เก่า และค่าปริมาณการแตกหักมีค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กัน และค่าตัวแปรตอบสนองที่ประกอบด้วย ค่าสี a* ค่าสี b* ค่า peak viscosity ค่า trough viscosity และค่า peak time มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แต่ค่า R^2_{adj} และค่า lack of fit มีค่าต่ำ แสดงว่าตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันน้อย จึงไม่นำตัวแปรเหล่านั้นมาพิจารณา ดังนั้นค่าตัวแปรตอบสนองที่นำมาพิจารณาจึงมีทั้งหมด 4 ค่า ประกอบด้วย ค่า breakdown ค่า final viscosity ค่า setback from trough และค่า pasting temperature ดังจะเห็นได้ว่าตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 มีค่า P-value ของแบบจำลองน้อยกว่า 0.05 และมีค่า R^2_{adj} มากกว่า 70.00 อีกทั้งมีค่า lack of fit เข้าใกล้ 1 จึงสามารถพยากรณ์สมการได้ดังสมการ (5)-(8) สอดคล้องกับงานวิจัยของจุฑารัตน์และวิศรุต (2553) ซึ่งทำการคัดเลือกและกลั่นกรองปัจจัยสำหรับ กระบวนการเร่งความเก่าของข้าวสารพบว่า ค่าสี a* ค่าสี b* ค่าปริมาณการแตกหัก ค่า peak viscosity ค่า trough viscosity ค่า breakdown ค่า final viscosity ค่า setback from trough ค่า peak time และค่า pasting temperature เป็นค่าตอบสนองที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเร่งความเก่าของข้าวสาร

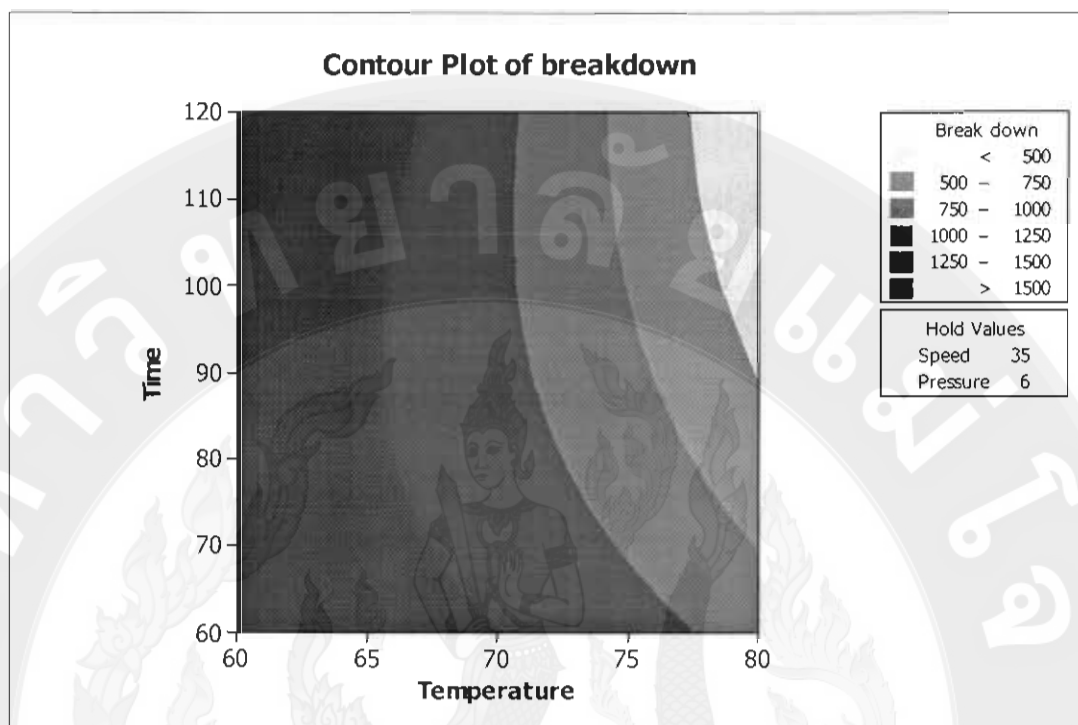
การหาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสาร

ในการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม โดยใช้แบบจำลองการถดถอยของผลตอบตามสมการ (6)-(9) ได้ความสัมพันธ์ในลักษณะของกราฟดังภาพ 20-24



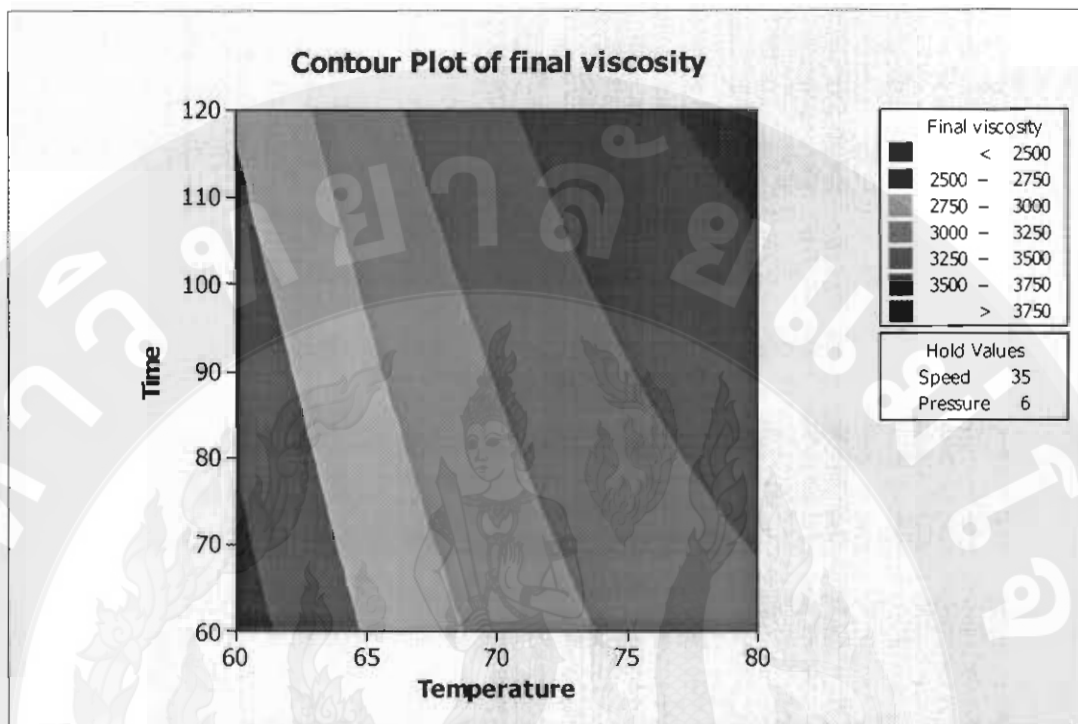
ภาพ 20 สถานะที่เหมาะสมของผลตอบสนองสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสารที่อุณหภูมิ 79.19 องศาเซลเซียส เวลา 67.88 นาที ความเร็วรอบ 33.74 รอบต่อนาที และความดัน 9.19 บาร์

เมื่อทำการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเร่งความเก่าของข้าวสาร และนำมาแสดงผลในลักษณะของกราฟเพื่อชี้ให้เห็นถึงจุดที่ซ้อนทับกันอย่างเหมาะสม ดังภาพ 20 ชี้ให้เห็นว่าจุดที่ซ้อนทับกันมากที่สุดคือ บริเวณส่วนที่มีลักษณะเป็นสีขาว และจากบริเวณพื้นที่ส่วนสีขาวจะพบจุดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการเร่งความเก่าของข้าวสาร ซึ่งมีอุณหภูมิของอากาศในถังความดันเป็น 79.19 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อนนาน 67.88 นาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดันเท่ากับ 33.74 รอบต่อนาที และความดันเท่ากับ 9.19 บาร์



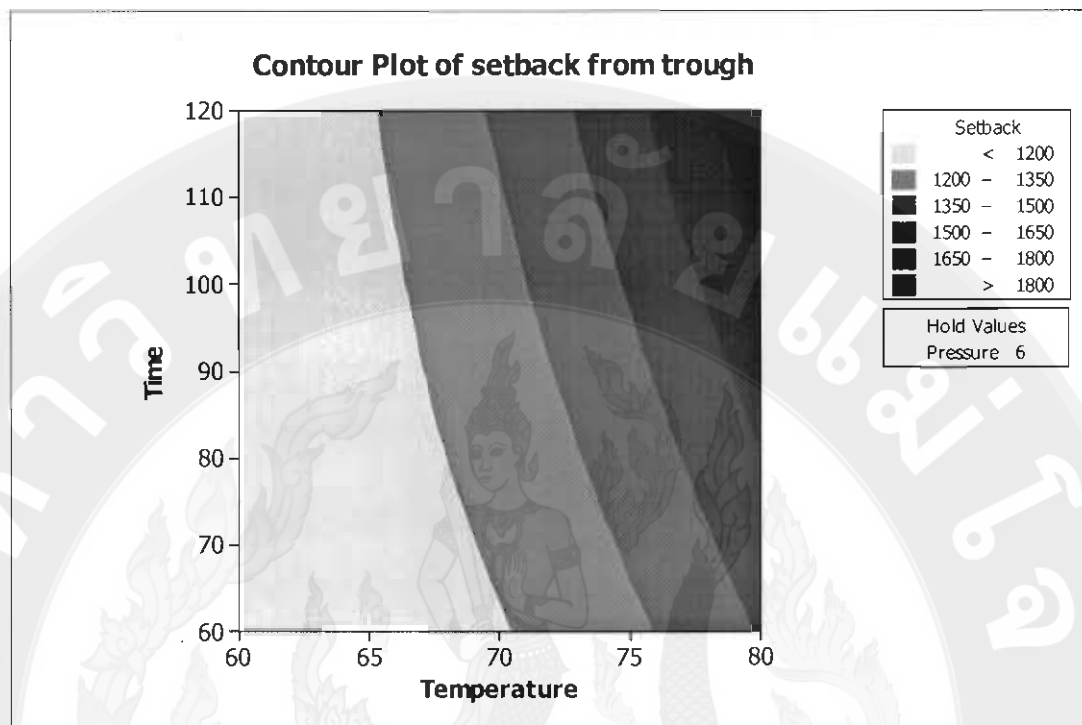
ภาพ 21 ผลตอบสนองของค่า breakdown ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์

จากภาพ 21 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่า breakdown (ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด หรือ ความคงทนต่ออุณหภูมิของแป้งข้าว และความเหนียวของข้าว) ให้มีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิและความดันสูงส่งผลให้พันธะต่างๆ ภายในของแป้งข้าวอ่อนแอลง เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงทำให้ค่า breakdown มีค่าลดลง (อัญชลี, 2547)



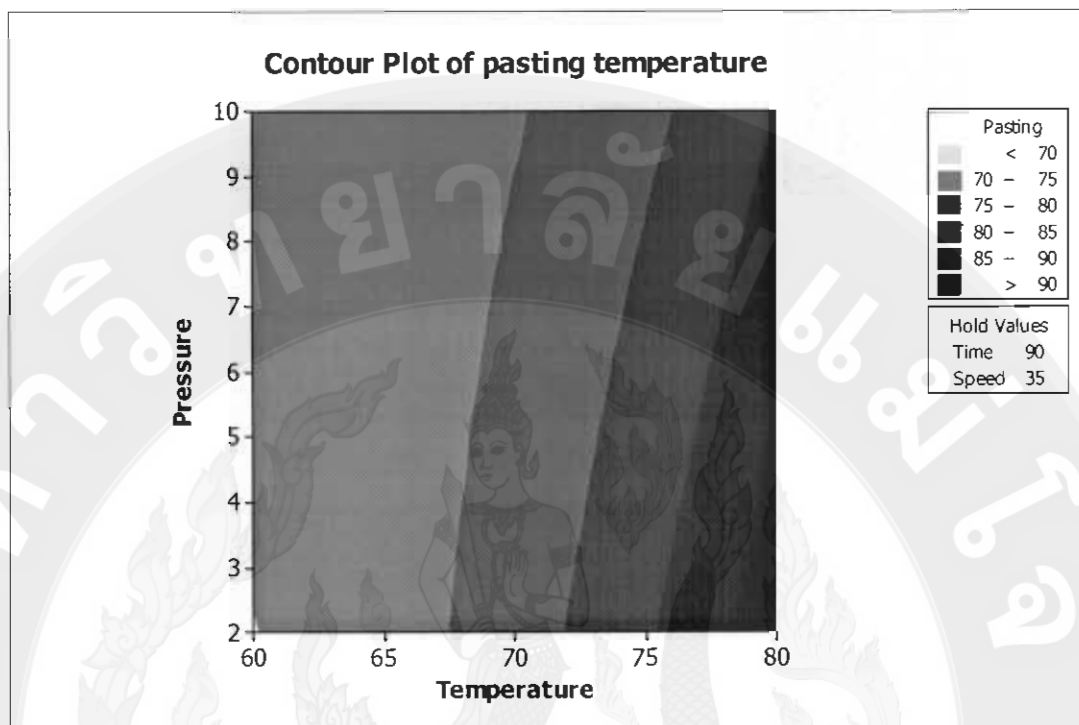
ภาพ 22 ผลตอบสนองของค่า final viscosity ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์

จากภาพ 22 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่า final viscosity (ความหนืดหลังลดอุณหภูมิ) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลให้ปริมาณเด็กซ์ทรินสายสั้นและปริมาณอะไมโลสละลายออกมาจากเม็ดแป้งได้มากขึ้น และสามารถรวมตัว (aggregate) กัน เกิดเป็นโครงสร้างใหม่ในลักษณะโครงร่างสามมิติได้ดี เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงทำให้ค่า final viscosity มีค่าเพิ่มขึ้น (เบญจลักษณ์, 2550)



ภาพ 23 ผลตอบสนองของค่า setback from trough ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์

จากภาพ 23 นี้ให้เห็นว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่า setback from trough (ผลต่างของ final viscosity กับ trough viscosity หรือ การเกิดเจลของแป้งข้าวและความแข็งของข้าว) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการอัดตัวกันของโครงสร้างภายในเมล็ดข้าวที่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงใช้ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันนานขึ้น และเป็นผลให้ระยะเวลาในการกินตัวของแป้งข้าวซาลงทำให้ค่า setback from trough มีค่าเพิ่มขึ้น (อัญชลี, 2547)



ภาพ 24 ผลตอบสนองของค่า pasting temperature ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 35 รอบต่อนาที และความดัน 6 บาร์

จากภาพ 24 นี้ให้เห็นว่าเมื่อความดันและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อค่า pasting temperature (อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หรือ อุณหภูมิที่แป้งข้าวเริ่มสุก) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนที่จับกันภายในเม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น (มัทนียา, 2548) ทำให้ผนังของเม็ดแป้งมีความแข็งแรง และ โครงสร้างที่แข็งแรงและอัดตัวกันอย่างหนาแน่นนี้ทำให้ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนที่สูงกว่าโครงสร้างธรรมดา เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงต้องใช้พลังงานความร้อนสูงในการทำให้แป้งสูญเสียความเป็นระเบียบทำให้ค่า pasting temperature มีค่าเพิ่มขึ้น (พลากรและคณะ, 2551)

จากนั้นทำการทดลองเร่งความเก่าของข้าวสารด้วยชุดให้ความร้อนและความดันแก่ข้าวสารตามสถานะที่เหมาะสม แต่เนื่องจากสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวประสิทธิภาพของชุดให้ความร้อนและความดันแก่ข้าวสารไม่สามารถทำได้จึงเลือกทำการทดลองที่สถานะใกล้เคียงกับประสิทธิภาพของเครื่องคือ อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน 80.00 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 67.88 นาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน 33.70 รอบต่อนาที และความดัน 9.50 บาร์ และนำผลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองเชิงสถิติ ดังตาราง 13

ตาราง 13 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลองทางสถิติของสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเร่งความเก่าของข้าวสาร

ค่าผลตอบสนอง (หน่วย)	ค่าจากการทดลอง	ค่าจากการทำนาย	ค่า RMRE (เปอร์เซ็นต์)
ความหนืดของน้ำแป้ง			
breakdown (cP)	611.67	847.91	38.78
final viscosity (cP)	3813.00	3315.60	13.03
setback from trough (cP)	1692.33	1459.65	13.72
pasting temperature (°C)	84.93	82.09	3.34

จากตารางที่ 13 ซึ่งให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองเชิงสถิติของผลตอบสนองค่า breakdown, final viscosity, setback from trough และ pasting temperature มีค่า RMRE เป็น 38.78, 13.03, 13.72 และ 3.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า breakdown มีค่า RMRE มาก เนื่องจากอุณหภูมิและความดันสูงส่งผลให้พันธะต่าง ๆ ภายในแป้งข้าวอ่อนแอลง เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงทำให้ค่า breakdown มีค่าลดลง โดยค่า breakdown คือค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ซึ่งขึ้นถึงลักษณะความหนืดของน้ำแป้งเมื่อแป้งยุบตัว ดังนั้นหากน้ำแป้งมีความเก่ามากก็จะเกิดการยุบตัวน้อยค่า breakdown ก็จะมีค่าต่ำ แต่หากน้ำแป้งมีความเก่าน้อยก็จะเกิดการยุบตัวน้อยค่า breakdown ก็จะมีค่าสูง เช่นเดียวกับค่า RMRE ของค่า final viscosity และค่า setback from trough ที่มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนสูงทำให้เกิดการอัดตัวกันของโครงสร้างภายในเมล็ดข้าว เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงใช้ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการเจลลิตีในเซชันนาน ส่งผลให้ปริมาณอะไมโลสละลายออกมาจากเมล็ดแป้งได้มากขึ้นทำให้ค่า final viscosity เพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ระยะเวลาในการคืนตัวของแป้งข้าวที่เกิดรีโทรเกรเดชันช้าลงทำให้ค่า setback from trough มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่า final viscosity

คือค่าความหนืดสุดท้ายของการทดลองที่ชี้บ่งถึงลักษณะความหนืดของน้ำแป้งเมื่อแป้งเย็นตัวลง ส่วนค่า setback from trough คือค่าผลต่างของความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด ที่ชี้บ่งถึงลักษณะความหนืดของน้ำแป้งเมื่อแป้งคืนตัว ค่าทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อกันจึงส่งผลให้ค่าความหนืดสองค่านี้มีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ค่า pasting temperature มีค่า RMRE น้อย เนื่องจากอุณหภูมิสูงส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้งแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำมาวัดค่าความหนืดจึงต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนสูงกว่าโครงสร้างธรรมดาเพื่อทำให้แป้งสูญเสียความเป็นระเบียบ ทำให้ค่า pasting temperature เพิ่มขึ้น โดยค่า pasting temperature คือค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของน้ำแป้ง ที่ชี้บ่งถึงลักษณะอุณหภูมิที่ทำให้แป้งเกิดการพองตัว ซึ่งหากน้ำแป้งมีความแก่มากก็จะเกิดการพองตัวได้มากค่า pasting temperature ก็จะสูง แต่หากน้ำแป้งมีความแก่น้อยก็จะเกิดการพองตัวได้น้อยค่า pasting temperature ก็จะต่ำ

จากนั้นนำค่าผลตอบสนองทั้ง 4 ค่าดังกล่าวของข้าวภายหลังการกระตุ้น ข้าวใหม่ และข้าวเก่า มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่าข้าวทั้ง 3 แหล่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.01 จึงทำการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ (Multiple comparison test) แบบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) พบว่าผลตอบสนองค่า breakdown ค่า final viscosity ค่า setback from trough และค่า pasting temperature มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันทั้งหมด จากนั้นจึงทำการทดลองหุงต้มข้าวด้วยหม้อหนึ่งไฟฟ้า และนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายทาง พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มและตัวอย่างข้าวมีความแตกต่างกันอย่างมีระดับนัยสำคัญยิ่งที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.01 จากนั้นทำการเปรียบเทียบเชิงพหุคูณ (Multiple comparison test) แบบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) พบว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มของตัวอย่างข้าวทั้ง 3 แยกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่าเฉลี่ยของข้าวใหม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยของข้าวภายหลังการกระตุ้นและข้าวเก่า แต่ข้าวภายหลังการกระตุ้นและข้าวเก่ามีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันดังตาราง 14 15 และภาพ 25

ตาราง 14 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของตัวอย่างข้าวและเมื่อทำการหุงต้ม

ตัวอย่างข้าว	การขยายปริมาตร (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ข้าวภายหลังการกระตุ้น	424.09±50.65 ^b
ข้าวใหม่	354.70±38.90 ^a
ข้าวเก่า	416.45±32.57 ^b

หมายเหตุ จำนวนซ้ำ (N = 3)

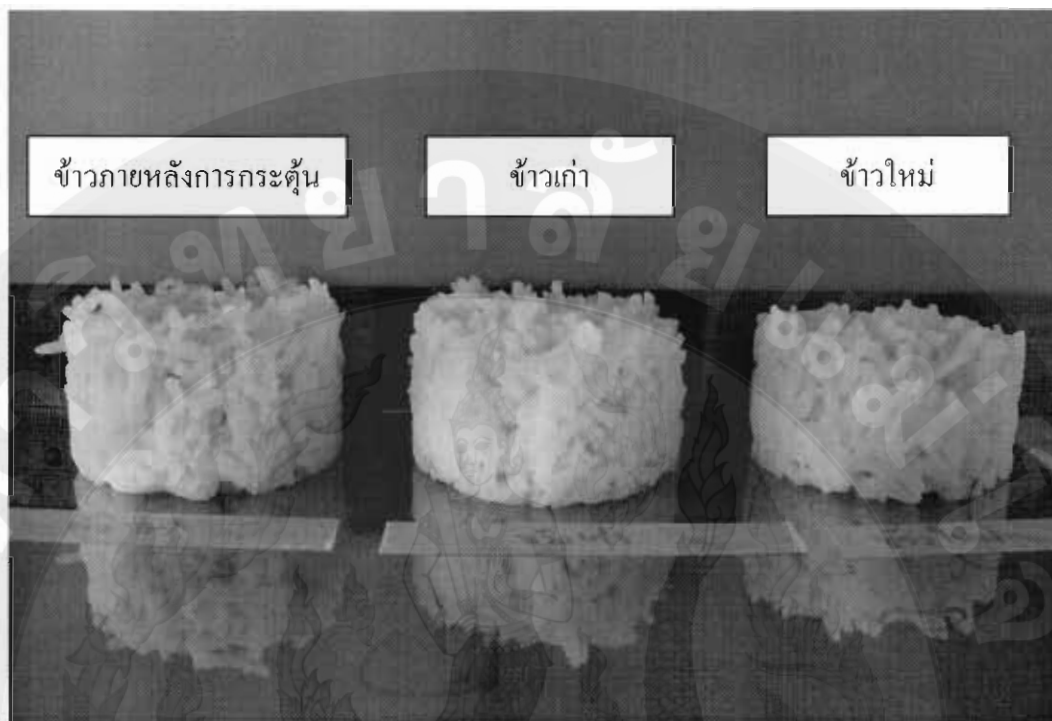
อักษรที่เหมือนกันในแนวคอลัมน์แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ตาราง 15 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มเมื่อทำการหุงต้ม

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม	การขยายปริมาตร (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
	ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1.3 เท่า	355.50±39.73 ^a
1.5 เท่า	404.93±28.03 ^b
1.7 เท่า	434.82±49.22 ^c

หมายเหตุ จำนวนซ้ำ (N = 3)

อักษรที่เหมือนกันในแนวคอลัมน์แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ



ภาพ 25 ลักษณะการขยายปริมาตรของตัวอย่างข้าวชนิดต่าง ๆ เมื่อทำการหุงต้ม

จากภาพ 25 ซึ่งให้เห็นว่าข้าวภายหลังการกระตุ้นเป็นข้าวที่มีลักษณะการขยายปริมาตรมากที่สุด รองลงมาเป็นข้าวเก่า และข้าวใหม่ ตามลำดับ เนื่องจากข้าวใหม่เป็นข้าวสารที่ได้จากการสีข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวไม่นาน เมื่อนำมาหุงต้มจะให้ข้าวสุกที่มีลักษณะไม่ขึ้นหม้อ อุ่นน้ำได้น้อยทำให้ขยายปริมาตรได้น้อย ดังนั้นเมล็ดข้าวสุกจึงเหนียวเกาะติดกันเป็นก้อนและแฉะ ส่วนข้าวเก่าเป็นข้าวสารที่ได้จากการสีข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวไม่น้อยกว่า 4-6 เดือน เมื่อนำมาหุงต้มจะให้ข้าวสุกที่มีลักษณะขึ้นหม้อ อุ่นน้ำได้มากทำให้ขยายปริมาตรได้มาก ดังนั้นเมล็ดข้าวสุกจึงร่วนไม่เกาะติดกันเป็นก้อนและไม่แฉะ ขณะที่ข้าวภายหลังการกระตุ้นเป็นข้าวใหม่ที่ผ่านมากระบวนการให้ความร้อนและความดันสูง เมื่อนำมาหุงต้มจะให้ข้าวสุกที่มีลักษณะคล้ายข้าวเก่า เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้การจับตัวกันระหว่างพันธะภายในของเม็ดแป้งคลายตัวลง เมื่อนำข้าวมาหุงต้ม น้ำจึงสามารถซึมผ่านเข้าสู่เมล็ดข้าวได้ง่าย ทำให้ค่าการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น และส่งผลให้ค่าการขยายปริมาตรของข้าวเพิ่มมากขึ้น (มัทนียา, 2548)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความแก่ของข้าวสารด้วยวิธีผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว ซึ่งในบทนี้เป็นการสรุปประเด็นความสำคัญของผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อกระตุ้นข้าว โดยมีพารามิเตอร์ในการศึกษาประกอบด้วยมวลเริ่มต้นของข้าวสาร อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน ระยะเวลาในการให้ความร้อน ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน และความดัน เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาพข้าวจากข้าวสารใหม่เป็นข้าวสารเก่า

สรุป

จากผลการศึกษาของการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความแก่ของข้าวสาร โดยใช้วิธีผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว ได้ผลการศึกษาซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1. ผลตอบสนอง 4 ค่าประกอบด้วย final viscosity, setback from trough และ pasting temperature
2. สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเร่งความแก่ของข้าวสารคือ อุณหภูมิของอากาศในถังความดัน 79.1889 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 67.8788 นาที ความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ของถังความดัน 33.7374 รอบต่อนาที และความดัน 9.1919 บาร์
3. การทดสอบเพื่อยืนยันผลสำหรับการเร่งความแก่ของข้าวสารมีความแตกต่างของผลการทดลองจริงกับผลการทำนายด้วยแบบจำลองของค่า breakdown, final viscosity, setback from trough และ pasting temperature เป็นร้อยละ 38.78, 13.03, 13.72 และ 3.34 ตามลำดับ
4. การขยายปริมาตรของข้าวใหม่แตกต่างจากข้าวภายหลังการกระตุ้นและข้าวเก่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ข้าวภายหลังการกระตุ้นและข้าวเก่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาที่ได้ยังมีประเด็นที่ควรแก่การศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อให้ งานวิจัยสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และเป็นแนวทางในการทำวิจัยในอนาคตต่อไป ดังนี้

1. ควรมีการศึกษาตัวแปรอิสระอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อกระบวนการเร่งความเก่าของ ข้าวสารจากชุดให้ความร้อนและความดันแก่ข้าวสารเพิ่มเติม เช่น ชนิดของข้าว ความชื้นเริ่มต้นของ ข้าวสาร ระยะเวลาที่ข้าวสารอยู่ภายในถึงความดันก่อนอุณหภูมิภายในถึงความดันจะได้ตามที่กำหนดไว้ ขนาดของถังความดัน ค่าสีของข้าวสาร เป็นต้น
2. ควรมีการศึกษาตัวแปรตามที่มีผลต่อกระบวนการเร่งความเก่าของข้าวเพียงตัว เดียวเพื่อให้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้มีความสัมพันธ์กันมากยิ่งขึ้น
3. ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพการนำข้าวสารที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนสภาพ จากข้าวสารใหม่เป็นข้าวสารเก่าไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ
4. ควรมีการศึกษาทดลองกับข้าวภายหลังการเก็บเกี่ยวทันที
5. ควรพิจารณาค่าสี b^* ในการวิเคราะห์สมการ
6. ควรมีการวิเคราะห์ผลเป็น Non-linear regression ในรูปแบบอื่น ๆ
7. ควรมีการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของข้าวภายหลังการกระตุ้น เมื่อทำ การหุงต้ม เช่น ลักษณะกลิ่น รส เนื้อสัมผัส เป็นต้น
8. ควรมีการวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ต่อกิโลกรัมของข้าวและวิเคราะห์จุดคุ้มทุน เมื่อมีการพัฒนาขยายผลไปสู่ภาคอุตสาหกรรม

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 303 น.
- คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. 2546. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 528 น.
- จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร เพลงพิน ศิวพรักษ์ และ ทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย. 2547. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและเคมีกายภาพของข้าวขาวดอกมะลิสายพันธุ์ 105 ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างกัน. ว.วิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 27(3): 285-297.
- จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร ละมุล วิเศษ และ ทรงศิลป์ พจน์ชนะชัย. 2549. บทบาทของอุณหภูมิและอายุการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบของไขมันสมบัติทางกายภาพและเคมีกายภาพของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. ว.วิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 29(3): 269-281.
- จุฑารัตน์ ทะสระระ. 2550. การศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าสถิตแรงสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 179 น.
- จุฑารัตน์ นนทะมา วิศรุต ผื่นหา และสุนทร สืบคำ. 2553. การกำหนดปัจจัยที่เหมาะสมในการเร่งความเก่าของข้าวสารด้วยความร้อนและความดันสูง. ใน งานสัมมนาวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 1-3 กันยายน 2553 ณ โรงแรมดิเอ็มเพลส. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.
- ใจทิพย์ วานิชชัง และ ผดุงศักดิ์ วานิชชัง. 2547. รายงานการวิจัยเรื่อง การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเก่าเพื่อชุมชน. สำนักงานงบประมาณแผ่นดิน. ชลบุรี: สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก.
- เฉลิมพร เอี่ยมมี. 2546. การรวมกระบวนการผลิตของการนึ่งและการอบแห้งข้าวหนึ่งสำหรับข้าวหอม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 59 น.
- ไชยรัตน์ เพ็ชรชลาณวัฒน์, ประนอม มงคลบรรจง, ลือชัย อารยะรังสฤษฎ์, งามชื่น คงศรี และ วิชัย หิรัญยูปกรณ์. 2543. คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวสารจำนวน 8 พันธุ์. ว.วิชาการเกษตร 18(2): 164-169.
- ณัฐวดี ดุษฎี. 2546. เอกสารประกอบการเรียนวิชา การอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตรด้วยพลังงานทดแทน. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

- คลฤดี ใจฤทธิ สมเกียรติ ปรัชญาวรากร สมชาติ โสภณรณฤทธิ วารุณี วารุญญานนท์ และ พัทธี ตั้งตระกูล. 2550. การเร่งความแก่ข้าวกล้องหอมมะลิด้วยเทคนิคฟลูอิดไดเซชัน ร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ. ว.วิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี 30(4): 659-668.
- ธีรเดช ชีวนันทชัย และ ธีรยุทธ จันทร์แจ่ม. 2549. แบบจำลองทางจลนศาสตร์การอบแห้งข้าวสุก ด้วยลมร้อนจากพลังงานความร้อนห้องใต้หลังคา. น. 1-6. ใน การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. เบลูจลักษ์ณ์ ศิริบุรณ์. 2550. ผลของการ annealing ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันต่อโครงสร้าง และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 153 น.
- ปภิกษะ. 2533. การประยุกต์ใช้ความดันสูงในการแปรรูปและเก็บรักษาอาหาร. อาหาร 20(4): 284-289.
- ปราณี วราสวัสดิ์. 2549. เอกสารประกอบการเรียนวิชา เคมีอาหาร. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ประพาส วีระแพทย์. 2526. ความรู้เรื่องข้าว. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช จำกัด. 108 น.
- ประไพศรี สุทัศน์ และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท้อป. 464 น.
- เพชรวรรณ เทียนสวัสดิ์ จิราภรณ์ สอดจิตร์ และ วรสิทธิ์ โทจำปา. 2550. เทคโนโลยีการปรับสภาพ ข้าวใหม่ให้ป็นข้าวเก่า. โครงการ IRPUS ประจำปี 2550. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร. 1-5.
- พัศกร เขียวตระกูล. 2546. ถังเก็บอุณหภูมิสำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 140 น.
- พลากร สารีราษฎร์, สงวนศักดิ์ ธนาพรพูนพงษ์ และ สุชาดา เวียร์ศิลป์. 2551. การดัดแปลงคุณภาพ การหุงต้มของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ. ว.วิทยาศาสตร์เกษตร 39(3): 354-358.
- พีชชา จิระธรรมกิจกุล. 2541. ผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพข้าวกล้อง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 140 น.
- เพลงพิน ศิวาพรรักษ์. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณอะมิโลส คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของข้าวสารพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 56 น.
- ไพโรจน์ วิริยจารี. 2544. การออกแบบพื้นที่การตอบสนอง Response Surface Design. เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 146 น.
- มัทนียา เชื้อวเวช. 2548. การเร่งความแก่ของข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคในการอบแบบฟลูอิดไดซ์- เบลูร่วมกับการเทมเปอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี. 80 น.

- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2550. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 466 น.
- ละมุล วิเศษ. 2541. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมัน
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 69 น.
- วินิต ชินสุวรรณ และ ภูมิสิทธิ์ วรรณชารี. 2545. การเร่งความแก่ของข้าวเปลือกหอมมะลิโดย
การอบในภาชนะปิด. ว.วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น 29(1-2): 131-146.
- สมศรี จำริญภิญโญ. 2536. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการแบ่งกลุ่มของข้อมูล เพื่อใช้ในการทดสอบ
ความเหมาะสมของตัวแบบสมการถดถอยเชิงเส้นเมื่อข้อมูลไม่มีการทำซ้ำ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 112 น.
- สมชาติ โสภณธฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพันธุ์พืชและอาหารบางประเภท. กรุงเทพฯ:
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 335 น.
- สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. 2528. ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สามเสนการพิมพ์.
240 น.
- สง สุชดานนท์ วัฒนา เชียงกุล และ พงษ์ศักดิ์ ศิวะภัทรกำพล. 2528. ไฟฟ้าเบื้องต้น. กรุงเทพฯ:
นำอักษรการพิมพ์. 170 น.
- สิริรัตน์ จำปาเงิน. 2547. การประยุกต์วิธีวิเคราะห์เนื้อสัมผัสและความหนืดเพื่อทำนายการ
ปลอมปนในข้าวขาวดอกมะลิ 105 การจัดกลุ่มอมิโลส และอายุการเก็บรักษาของข้าว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 139 น.
- สืบสกุล จินดาพล อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล และ กมลทิพย์ สัจจาอนันตกุล. 2547. การออกแบบการ
ทดลองในการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำนมข้าว. ว.วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
14(4): 1-9.
- สุนีย์ เสริมศิริ โสภณ. 2546. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางกายภาพ
เคมีและเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 124 น.
- สุนทร สืบคำ นิลุบล บินไชย และ พชรินทร์ สมเทศ. 2552. เทคนิคใหม่ด้วยการให้ความร้อนและ
ความดันในการทำข้าวสารใหม่ให้เป็นข้าวสารเก่า. โครงการ IRPUS ประจำปี 2551.
เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 1-7.
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2551. มาตรฐานข้าวหอมไทย.
มกอช. 4001-2551.

- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 366 น.
- อารีรัตน์ จิตบุญ. 2549. ผลของอุณหภูมิแวดล้อมต่ออุณหภูมิข้าวเปลือกและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวระหว่างเก็บรักษา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 81 น.
- อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2545. การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. เชียงใหม่: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 168 น.
- อัญชลี ศรีวิไล. 2547. ผลของกระบวนการพรีเจลาที่ในเข้ชั้นต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิหุงสุก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 100 น.
- อุทัยพันธ์ ศรีพละ. 2537. การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบจากธัญชาติด้วยเอ็กซ์ทราเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 94 น.
- Ali, S. Z., B. S. Ramesh and C. M. Sowbhagya. 1994. Hydration, swelling and solubility behaviour of rice in relation to other physicochemical properties. **J. of Science of Food and Agriculture** 64(1): 1-7.
- Capanzana, M. V. and K. A. Buckle. 1997. Optimisation of germination conditions by response surface methodology of a high amylose rice (oryza sativa) cultivar. **Lebensm Wiss u Technol** 30(2): 155-163.
- Douglas C. 2005. Design and analysis of experiments. USA: John Wiley and Sons. อ้างโดย ประไพศรี สุทัศน์ และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: ท้อป.
- Fruton, J. S. and S. Simomonds. 1985. General biochemistry. New York: John Wiley and Sons. อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Gopika, A., V. K. Sehgal and M. Arora. 2007. Optimization of process parameters for milling of enzymatically pretreated basmati rice. **J. of Food Engineering** 82: 153-159.
- Gujral, H. S. and V. Kumar. 2003. Effect of accelerated aging on the physicochemical and textural properties of brown and milled rice. **J. of Food Engineering** 59: 117-121.
- Hadziyev, D. 1991. Storage and processing of cereal and oilseed products (lecture note). อ้างโดย อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- Hizukuri, S. 1986. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance. อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Jahani, M., M. Alizadeh, M. Pirozifard and A. Qudsevali. 2008. Optimization of enzymatic degumming process for rice bran oil using response surface methodology. **Food Science and Technology** 41: 1892-1898.
- Jaisut, D., S. Prachayawarakorn, W. Varanyanond, P. Tungtrakul and S. Soponronnarit. 2009. Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. **Food Research International** 42: 674-681.
- Janjai S., B.K. Bala, K. Tohsing, B. Mahayothee, M. Haewsungcharem, W. Muhlbauer and J. Muller. 2006. Equilibrium moisture content and heat of sorption of longan (*Dimocarpus longan* Lour.). **Drying Technology** 24: 1691-1696.
- Juliano, B.O. 1985. Criteria and test for rice grain qualities. อ้างโดย สุนีย์ เสริมศิริโสภณ. 2546. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมีและเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Lineback, D.R. 1984. The starch granule: organization and properties. อ้างโดย อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Madamba, P. S. and R. P. Yabes. 2005. Determination of the optimum intermittent drying conditions for rough rice (*Oryza sativa*, L.). **Lebensm Wiss u Technol** 38: 157-165.
- Moritaka, S. and K. Yasumatsu. 1972. The effect of sulfhydryl groups on storage deterioration of milled rice. pp. 437-454. In **Rice Chemistry and Technology**. USA: Minnesta.
- Morrison, W.R., Milligan, T. P. and Azudin, M.N. 1984. A relationship between the amylose and lipid contents of starches from diloid cereals. อ้างโดย สุนีย์ เสริมศิริโสภณ. 2546. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และเคมีกายภาพของข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Robin, J. P., C. Mercier, R. Charbonniere and J. A. Guilbot. 1974. Lintnerized starches, gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. *Cereal Chem* 51: 389-406. อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- Sanders, J. P. M. 1996. Starch manufacturing in the world. pp. 19-23. *In* Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology. Jan. 22-26 & Feb. Bangkok: AIT Center. อ้างโดย กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Sharp, R. N. 1991. Rice : production, processing and utilization. pp. 301-319. *In* **Handbook of Cereal Science and Technology**. USA: Marcel Dekker.
- Shengyan, X. 1998. Rice milling technology. International workshop on the food processing and packaging machinery. อ้างโดย อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. **ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Soponronnarit, S., M. Chiawwet, S. Prachayawarakorn, P. Tungtrakul and C. Taechapiroj. 2008. Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. **J. of Food Engineering** 85: 268-276.
- Van Ruiten, H.T.L. 1981. Grain post-harvest processing technology. M Sc. course IPB (Institute Pertanian Bogor). อ้างโดย อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. **ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Villarcil, R. M., A. P. Ressurreccion, L. B. Suzuki and B. O. Juliano. 1976. Changes in physicochemical properties of rice during storage. **Starch/Starke** 28: 88-94.
- Watanabe, M., E. Arai, K. Honma and S. Fuke. 1991. Improving the cooking properties of aged rice grains by pressurization and enzymatic treatment. **J. Agricultural and Biological Chemistry** 55(11): 2725-2731.
- Wiset, L., G. Srzednicki, M. Wootton, R. H. Driscoll and A.B. Blakeney. 2005. Effects of high-temperature drying on physicochemical properties of various cultivars of rice. **Drying Technology** 23(9): 2227 - 2237
- Zhou, Z., K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchard. 2002. Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes. **J. of Cereal Science** 35: 65-78.



มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ภาคผนวก

MAEJO UNIVERSITY



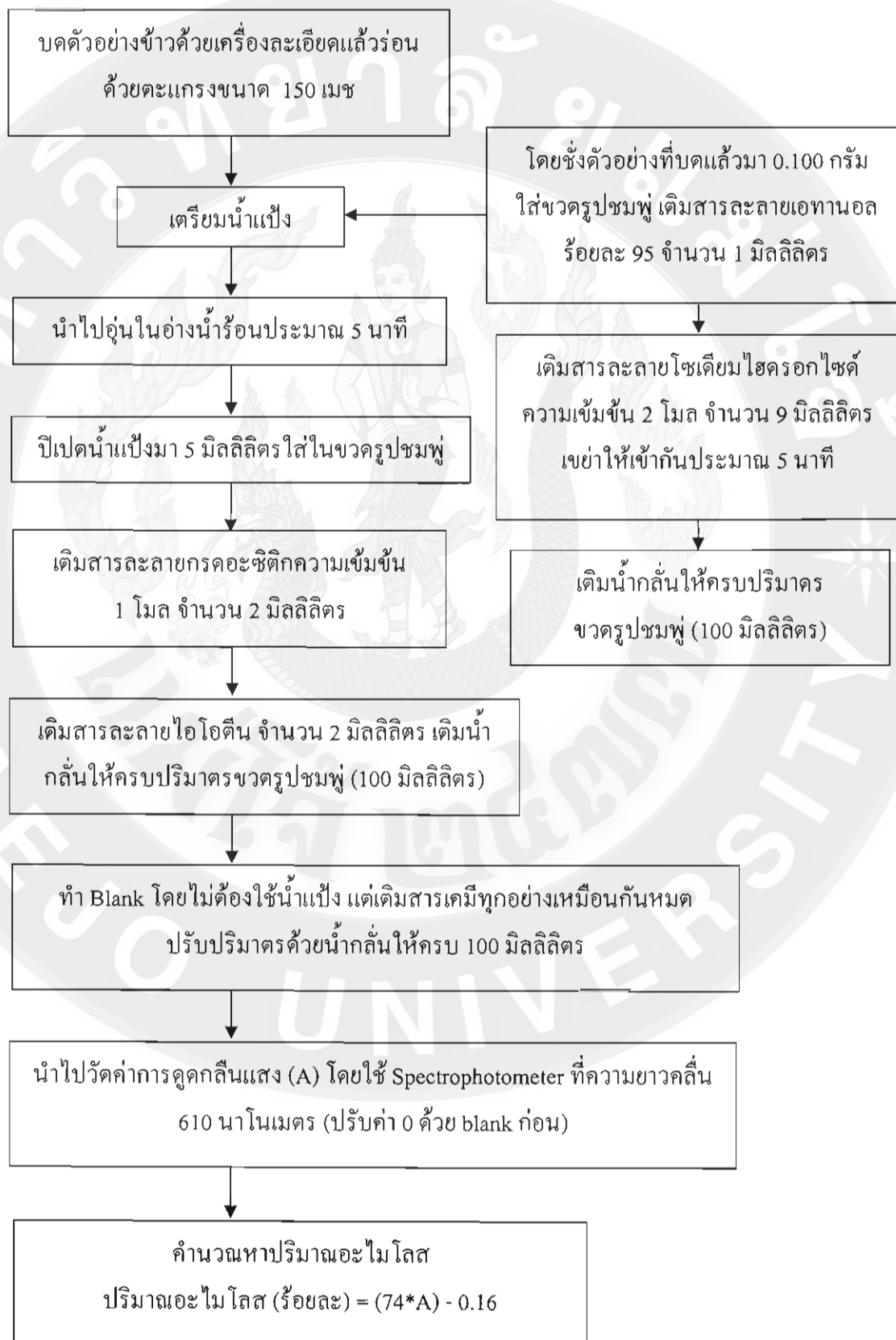
ภาคผนวก ก

วิธีการตรวจวัดคุณภาพข้าวสาร

แผนภูมิการวัดค่าสี



แผนภูมิการหาปริมาณอะไมโลส



แผนภูมิการวัดความใหม่-เก่าของข้าว



แผนภูมิการหาเปอร์เซ็นต์แตกหัก



แผนภูมิการหาการสลายตัวของเมล็ดข้าวสารด้วยด่าง



แผนภูมิการวัดความหนืดของแป้งข้าวสาลี



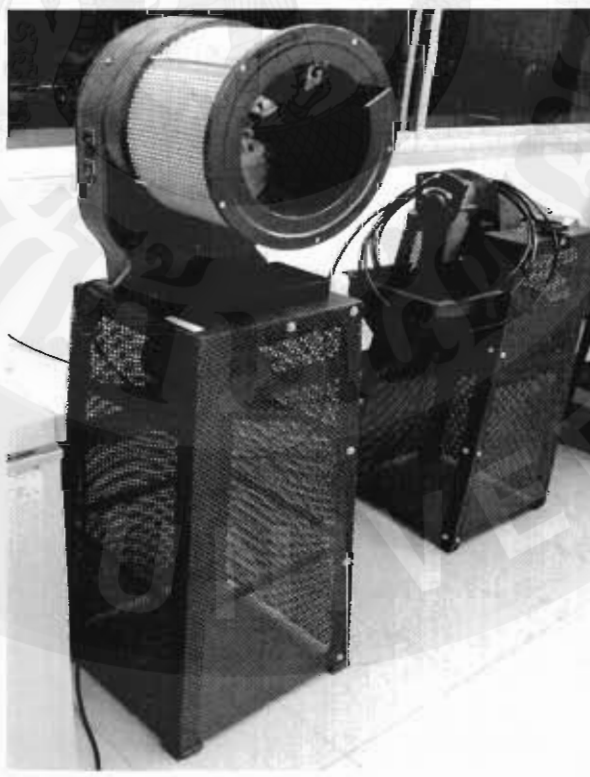


ภาคผนวก ข

ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณภาพของข้าว



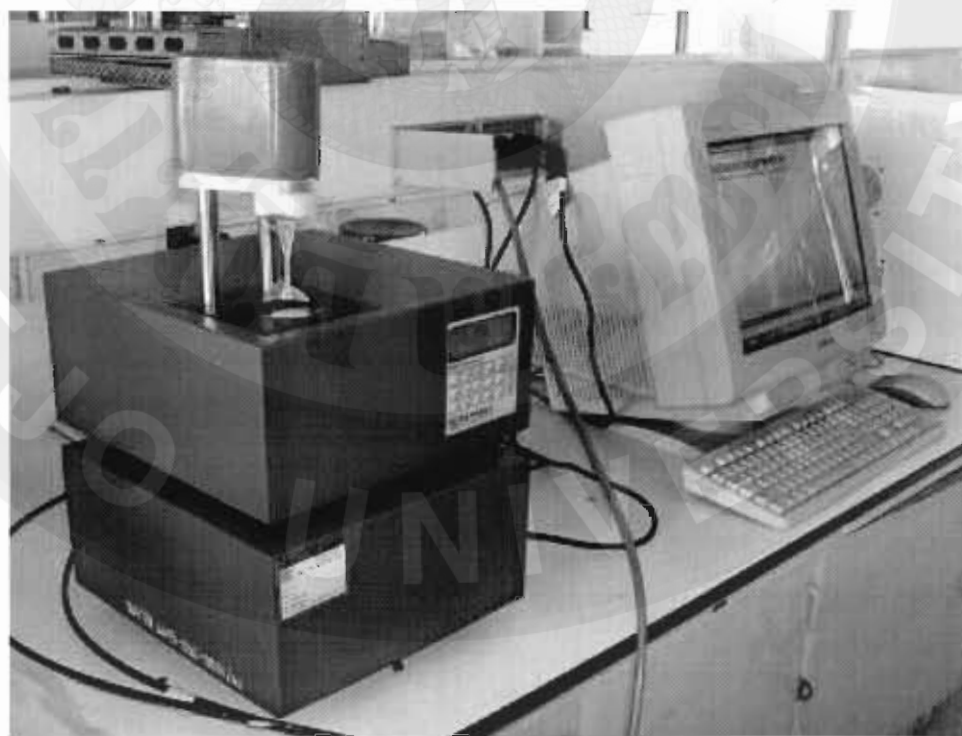
ภาพผนวก 1 เครื่องวัดค่าสี ยี่ห้อ HunterLab รุ่น MiniScan XE plus & Colorflex
ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพผนวก 2 เครื่องคัดแยกแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน



ภาพผนวก 3 เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Lambda 2 ประเทศเยอรมัน



ภาพผนวก 4 เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว ยี่ห้อ Newport Scientific รุ่น RVA-4SA ประเทศออสเตรเลีย



ภาพผนวก 5 เครื่องกวนสารชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7
ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพผนวก 6 เครื่องวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยอินฟาเรด ยี่ห้อ AND รุ่น AD-4714A
ประเทศญี่ปุ่น



ภาพผนวก 7 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น 50 ประเทศเยอรมนี



ภาพผนวก 8 เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Vortex-genie 2 รุ่น G-560E ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพผนวก 9 เครื่องบดละเอียด ยี่ห้อ Haopeng รุ่น ST-04 ประเทศจีน



ภาพผนวก 10 เครื่องนึ่งไฟฟ้า ยี่ห้อ Tefal รุ่น VC1001 ประเทศจีน



ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

ตารางผนวก 1 การตรวจวัดคุณภาพข้าวจากแผนการทดลองแบบ CCD

สิ่ง ทดลอง	L*	a*	b*	amylose	aging	broken (%)	peak viscosity (cP)	trough viscosity (cP)	breakdown (cP)	final viscosity (cP)	setback from trough (cP)	peak time (min)	pasting temperature (°C)
1	49.48	-0.32	7.18	20.08	0.26	20.59	3229.67	1874.33	1349.33	3003.67	1129.33	5.74	71.50
2	46.35	-1.45	6.44	18.81	0.25	17.77	2959.33	1711.33	1248.00	2852.33	1141.00	5.80	72.53
3	51.00	-1.17	8.04	18.51	0.36	22.20	2991.00	1674.67	1316.33	2833.33	1158.67	5.91	72.88
4	48.29	-1.28	7.17	19.86	0.25	21.43	3068.00	1713.00	1355.00	2856.33	1143.33	5.82	72.35
5	45.19	-1.33	7.56	21.77	0.24	22.32	3283.33	1899.33	1384.00	3070.33	1171.00	5.80	71.80
6	53.23	-0.95	7.91	19.91	0.28	32.59	3248.33	1988.67	1273.00	3200.67	1212.00	5.89	71.74
7	52.54	-1.57	7.82	20.24	0.28	24.60	3008.00	1709.33	1298.67	2892.67	1183.33	5.89	73.40
8	47.60	-0.86	7.54	18.21	0.27	33.78	3282.67	1968.00	1314.67	3164.33	1229.67	5.93	73.15
9	50.43	-0.79	9.15	19.78	0.25	29.22	3061.67	2039.00	1022.67	3396.67	1357.67	5.93	80.15
10	50.05	-1.41	8.84	16.36	0.30	16.89	2775.00	1893.00	882.00	3245.33	1352.33	5.80	81.95
11	49.59	-0.93	9.28	21.64	0.24	19.48	2753.33	1962.00	791.33	3432.67	1470.67	6.09	84.45
12	46.79	-1.36	7.42	22.01	0.36	18.77	3187.67	2171.67	1016.00	3508.33	1336.67	6.20	76.12
13	49.97	-0.61	9.87	19.00	0.24	38.26	2432.33	1868.67	563.67	3494.00	1625.33	6.09	85.98
14	50.45	-1.14	9.27	17.23	0.27	17.92	2549.67	1827.33	722.33	3307.67	1480.33	5.91	83.61
15	49.53	-1.29	8.35	22.06	0.30	18.81	2916.00	2090.67	825.33	3615.00	1524.33	6.04	83.33
16	47.75	-0.3	8.99	19.65	0.26	21.23	2963.33	2193.33	770.00	3741.33	1548.00	6.09	82.55
17	50.32	-1.63	6.52	21.84	0.27	19.66	2973.33	1515.00	1458.33	2547.00	1032.00	5.82	70.67

ตารางผนวก 1 (ต่อ)

สิ่ง ทดลอง	L*	a*	b*	amylose	aging	broken (%)	peak viscosity (cP)	trough viscosity (cP)	breakdown (cP)	final viscosity (cP)	setback from trough (cP)	peak time (min)	pasting temperature (°C)
18	52.93	-0.52	10.5	21.53	0.92	22.71	2625.67	2062.33	563.33	3798.00	1735.67	6.04	85.40
19	50.56	-1.28	8.07	22.37	0.25	23.64	3102.67	1808.00	1301.33	3003.33	1202.00	5.80	73.08
20	45.35	-1.46	7.37	21.62	0.12	19.42	3290.67	2188.67	1102.00	3492.67	1304.00	6.00	73.17
21	48.1	-1.36	7.09	19.36	0.27	19.45	3205.33	2049.33	1156.00	3316.33	1267.00	5.84	73.20
22	46.78	-0.88	8.63	19.21	0.63	21.46	3396.67	2059.00	1337.67	3610.33	1251.33	5.89	72.35
23	48.23	-0.97	8.97	19.38	0.24	21.05	3072.33	2251.33	821.00	3580.67	1329.33	6.05	77.28
24	49.76	-1.43	7.49	19.35	0.28	21.34	3417.67	2026.00	1391.67	3266.00	1240.00	5.71	72.85
25	47.74	-1.32	7.21	20.40	0.22	18.26	2869.67	1773.67	1096.00	3010.00	1236.33	5.75	79.15
26	48.22	-1.19	8.06	22.41	0.21	20.54	3214.67	2141.00	1073.67	3420.00	1279.00	5.89	73.10
27	46.18	-0.85	7.9	19.80	0.16	20.66	3009.33	1813.33	1196.00	3022.33	1223.33	5.74	75.38
28	52.96	-0.87	9.38	18.47	0.54	20.41	2916.67	1780.00	1134.67	3051.67	1271.67	5.93	80.40
29	50.66	-1.37	7.43	19.30	0.26	18.56	3155.00	2096.33	1059.33	3422.67	1326.33	5.85	74.87
30	50.83	-0.76	9.15	25.80	0.17	35.23	2867.33	2086.00	774.67	3456.33	1366.67	6.05	75.55
31	46.56	-0.94	8.56	20.51	0.32	21.51	3262.67	2175.00	1087.67	3444.00	1268.00	5.85	73.05
ข้าวเก่า	46.67	-1.08	6.34	22.22	0.22	28.98	2834.00	1952.67	881.33	3319	1366.33	5.91	83.67

ตารางผนวก 2 การขยายปริมาตรของข้าวจากแผนการทดลองแบบ RCBD

จำนวนซ้ำ	ชนิดของข้าวสาร	ระยะเวลาในการนึ่งข้าว (นาที)	ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (จำนวนเท่าของข้าวสาร)	ตำแหน่งการวัดค่าการขยายปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)				
				1	2	3	4	5
1	ข้าวใหม่	0	1.3	32.26	32.05	32.89	33.94	33.31
			1.5	34.58	36.05	36.26	36.68	36.05
			1.7	39.85	41.95	41.74	38.16	38.16
		30	1.3	54.60	54.60	47.65	49.97	51.86
			1.5	51.23	52.92	55.24	56.71	56.92
			1.7	55.66	57.13	56.92	60.72	62.19
2	ข้าวใหม่	0	1.3	35.21	32.26	33.94	32.26	31.62
			1.5	35.00	36.89	36.68	37.11	35.84
			1.7	40.06	38.79	38.79	41.53	38.16
		30	1.3	50.39	52.07	44.91	47.23	50.60
			1.5	52.71	55.45	56.50	57.98	57.56
			1.7	56.08	57.13	56.08	48.07	60.09
3	ข้าวใหม่	0	1.3	32.68	31.83	35.63	35.42	32.47
			1.5	36.89	35.84	36.47	35.84	36.47
			1.7	41.74	41.74	37.95	41.53	39.42
		30	1.3	47.86	46.38	40.06	44.91	50.60
			1.5	51.86	56.92	59.24	51.86	56.92
			1.7	56.08	53.34	53.76	47.86	50.18

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

จำนวนซ้ำ	ชนิดของข้าวสาร	ระยะเวลาในการนึ่งข้าว (นาที)	ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (จำนวนเท่าของข้าวสาร)	ตำแหน่งการวัดค่าการขยายปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)				
				1	2	3	4	5
1	ข้าวเก่า	0	1.3	35.00	35.00	32.47	32.68	30.36
			1.5	37.11	36.05	36.05	36.05	34.15
			1.7	38.16	38.16	38.16	39.00	38.16
		30	1.3	60.93	58.82	54.18	55.03	63.04
			1.5	62.62	55.24	56.50	57.77	70.84
			1.7	65.57	62.19	64.51	67.04	63.46
2	ข้าวเก่า	0	1.3	35.00	32.68	32.26	32.26	32.89
			1.5	37.53	37.53	37.32	37.11	33.73
			1.7	39.64	39.85	37.95	39.85	36.68
		30	1.3	58.19	52.92	52.28	56.50	61.35
			1.5	55.66	56.92	58.19	61.14	66.83
			1.7	63.46	67.68	57.56	58.61	63.88
3	ข้าวเก่า	0	1.3	35.00	31.62	35.00	35.21	30.36
			1.5	34.79	35.00	36.26	37.11	34.58
			1.7	37.95	36.47	38.16	37.95	37.95
		30	1.3	56.50	53.34	48.49	56.50	57.34
			1.5	54.81	55.03	56.08	57.56	59.66
			1.7	61.14	57.56	63.67	59.03	67.25

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

จำนวนซ้ำ	ชนิดของข้าวสาร	ระยะเวลาในการนึ่งข้าว (นาที)	ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม (จำนวนเท่าของข้าวสาร)	ตำแหน่งการวัดค่าการขยายปริมาตร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)				
				1	2	3	4	5
1	ข้าวที่ได้จากการทดลอง	0	1.3	31.83	34.79	33.94	35.00	33.52
			1.5	37.53	37.74	37.32	36.05	36.05
			1.7	38.58	38.58	39.00	38.16	37.74
		30	1.3	57.34	52.92	52.92	60.72	56.08
			1.5	60.30	57.13	78.01	60.72	59.24
			1.7	66.62	63.25	66.20	65.36	62.40
2	ข้าวที่ได้จากการทดลอง	0	1.3	35.00	35.42	35.42	35.63	31.83
			1.5	35.84	37.74	37.11	35.00	33.94
			1.7	41.74	41.53	38.58	39.00	37.95
		30	1.3	57.13	59.87	55.03	54.60	52.92
			1.5	55.87	60.72	62.40	62.83	57.56
			1.7	63.88	67.25	71.68	71.05	64.09
3	ข้าวที่ได้จากการทดลอง	0	1.3	32.26	35.63	32.47	32.68	32.89
			1.5	36.26	36.68	36.26	35.84	33.94
			1.7	38.58	37.95	38.79	41.53	39.42
		30	1.3	51.86	52.71	48.49	58.19	48.70
			1.5	58.19	59.24	57.56	55.66	60.72
			1.7	61.56	60.93	70.84	63.25	63.25

ตารางผนวก 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้าวเมื่อทำการหุงต้ม

แหล่งความแปรปรวน	df	MS	F	Sig.
ตัวอย่างข้าว	2	13028.06	26.55	0.000**
ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม	2	14440.96	29.43	0.000**
ตัวอย่างของข้าว*ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม	4	850.18	1.73	0.187 ^{ns}
ความผิดพลาด	18	490.70		
ผลรวม	26			

** แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.01

^{ns} ไม่แตกต่างกันทางสถิติ



ภาคผนวก

ตัวอย่างและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยการนำค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบคุณภาพมาวิเคราะห์การถดถอยแบบกำลังสองเต็มรูป ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหากค่า Sig. ที่ได้มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ทำการกรอกตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าสี ค่าปริมาณอะไมโลส ค่าความใหม่-เก่าของข้าวสาร ค่าปริมาณการแตกหัก และค่าความหนืดของน้ำแป้ง ดังแสดงในภาพผนวก 11

Worksheet: Minitab

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Central Composite Design

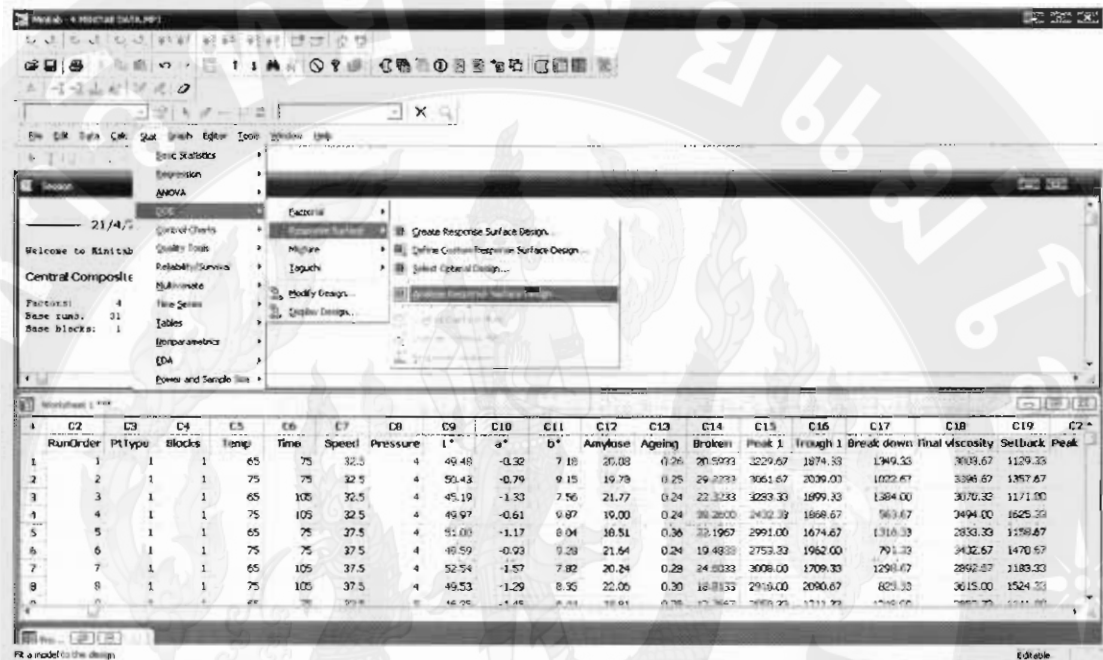
Factors: 4 Replicates: 1
Base runs: 31 Total runs: 31
Base blocks: 1 Total blocks: 1

Two-level factors: Full factorial

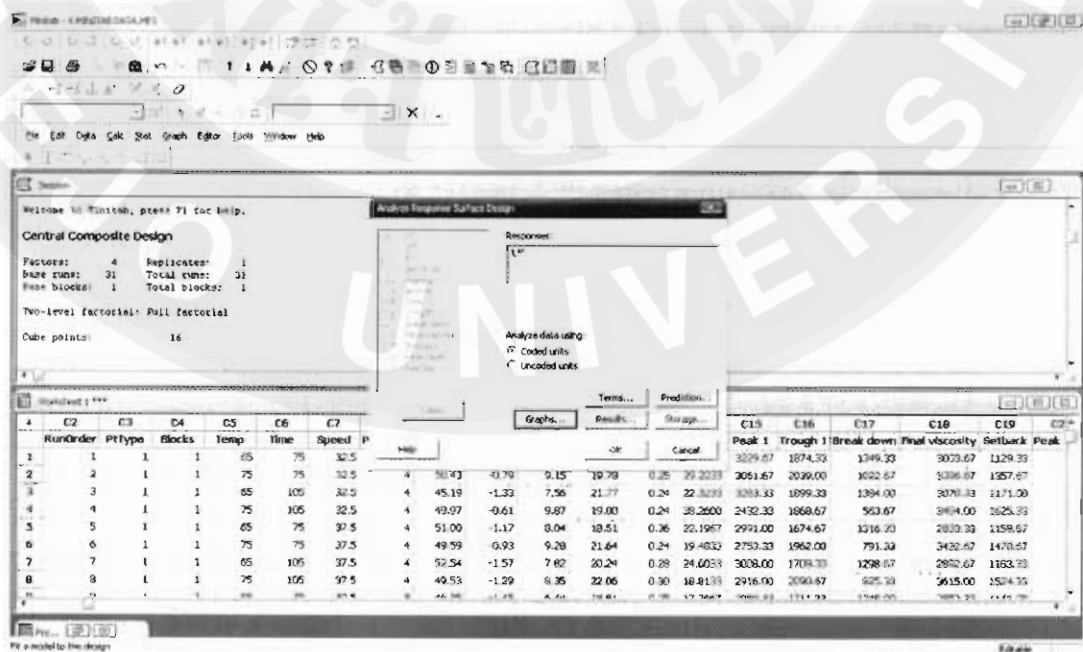
Run	C5 Temp	C6 Time	C7 Speed	C8 Pressure	C9 L*	C10 a*	C11 b*	C12 Analyse	C13 Ageing	C14 Broken	C15 Peak 1	C16 Trough 1	C17 Break down	C18 Final viscosity	C19 Setback	C20 Peak time	C21 Pasting	C22
9	65	75	32.5	0	46.35	-1.45	6.44	18.01	0.25	17.7667	2059.33	1711.33	1248.00	2852.33	1141.00	5.90	72.33	
10	75	75	32.5	0	30.05	-1.41	8.34	16.36	0.30	16.8867	2275.00	1949.00	882.00	3245.33	1252.33	3.86	81.35	
11	65	105	32.5	0	53.23	-0.95	7.91	19.91	0.28	32.9400	2348.33	1988.67	1273.00	3200.67	1212.00	5.89	71.74	
12	75	105	32.5	0	50.45	-1.14	9.27	17.23	0.27	17.9200	2549.67	1827.33	322.33	3307.67	1480.33	5.91	69.61	
13	65	75	37.5	8	48.29	-1.28	7.17	19.88	0.25	21.4333	3058.00	1713.00	1395.00	2856.33	1149.33	5.82	72.25	
14	75	75	37.5	8	46.79	-1.26	7.42	22.01	0.29	16.7667	3187.67	2171.67	1016.00	3326.33	1336.67	6.20	76.12	
15	65	105	37.5	8	47.60	-0.98	7.54	18.21	0.27	20.7767	3082.67	1968.00	1314.67	3164.33	1290.67	5.93	73.15	
16	75	105	37.5	8	47.75	-0.99	8.99	19.65	0.26	21.2267	2903.33	2193.33	770.00	3741.33	1548.00	6.09	81.35	
17	65	75	32.5	8	48.35	-1.07	8.87	21.84	0.27	15.4600	3072.33	1818.67	1398.33	3642.33	1333.00	6.20	76.20	

ภาพผนวก 11 การกรอกตัวแปรลงใน Worksheet

2. เลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Analyze Response Surface Design เลือกตัวแปรตามที่จะวิเคราะห์ลงในช่อง Response > Select > OK ดังแสดงในภาพผนวก 12 และ 13

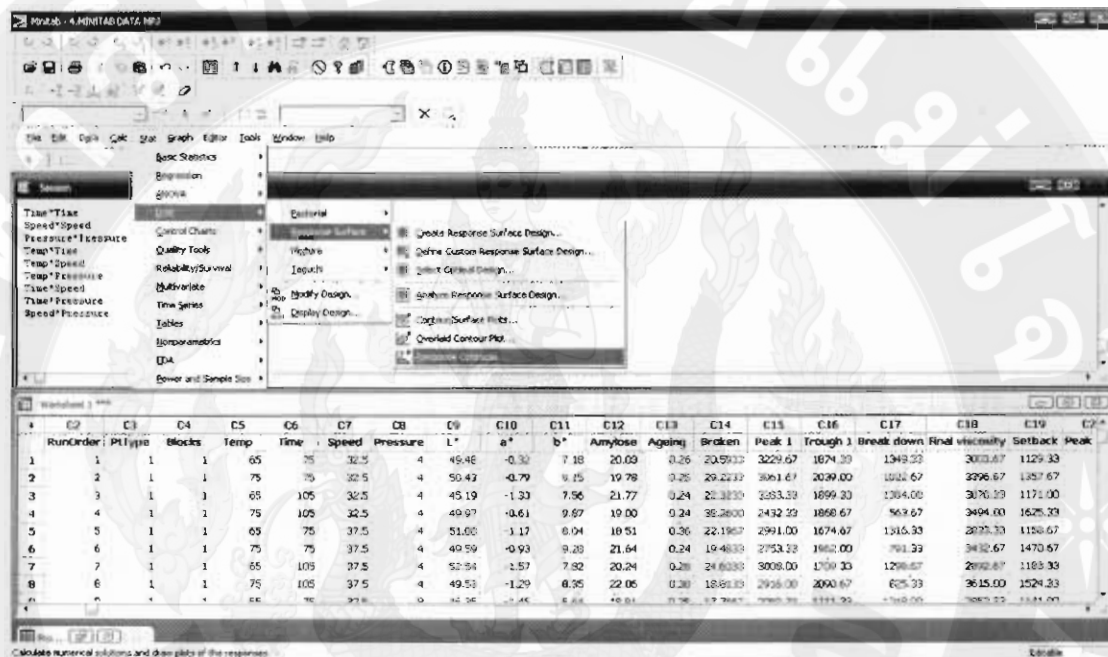


ภาพผนวก 12 การเลือกคำสั่งเพื่อทำการวิเคราะห์

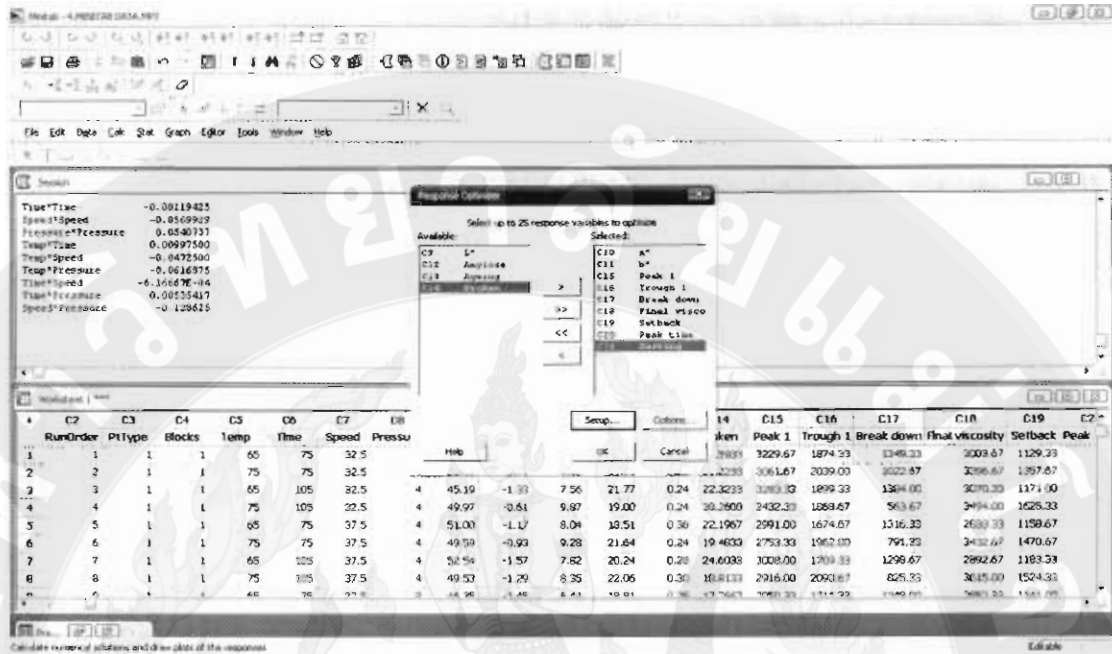


ภาพผนวก 13 การเลือกตัวแปรตามที่จะทำการวิเคราะห์

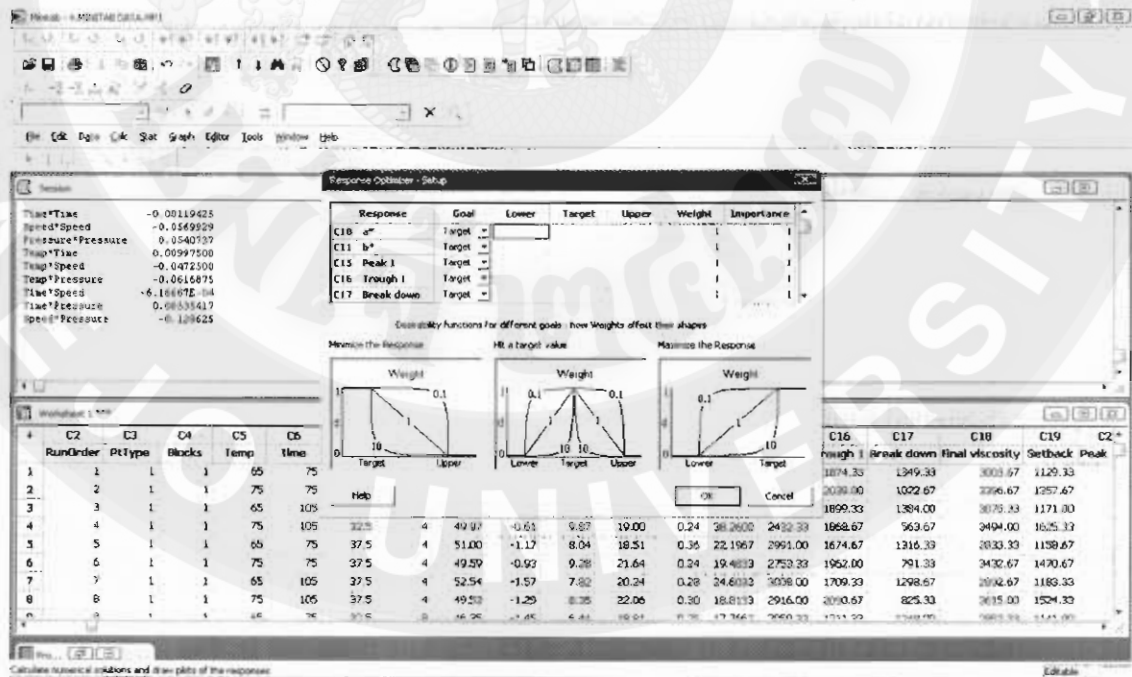
3. เลือกตัวแปรตามที่มีค่า Sig. มหาสภาวะที่เหมาะสม โดยเลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Response Optimizer และเลือกตัวแปรตามที่มีค่า Sig. ใสในช่อง Selected > Setup ใส่ช่วงของค่าตอบสนองที่ต้องการลงในช่อง Lower, Target และ Upper > OK ดังแสดงในภาพผนวก 14, 15 และ 16



ภาพผนวก 14 การเลือกคำสั่งเพื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสม

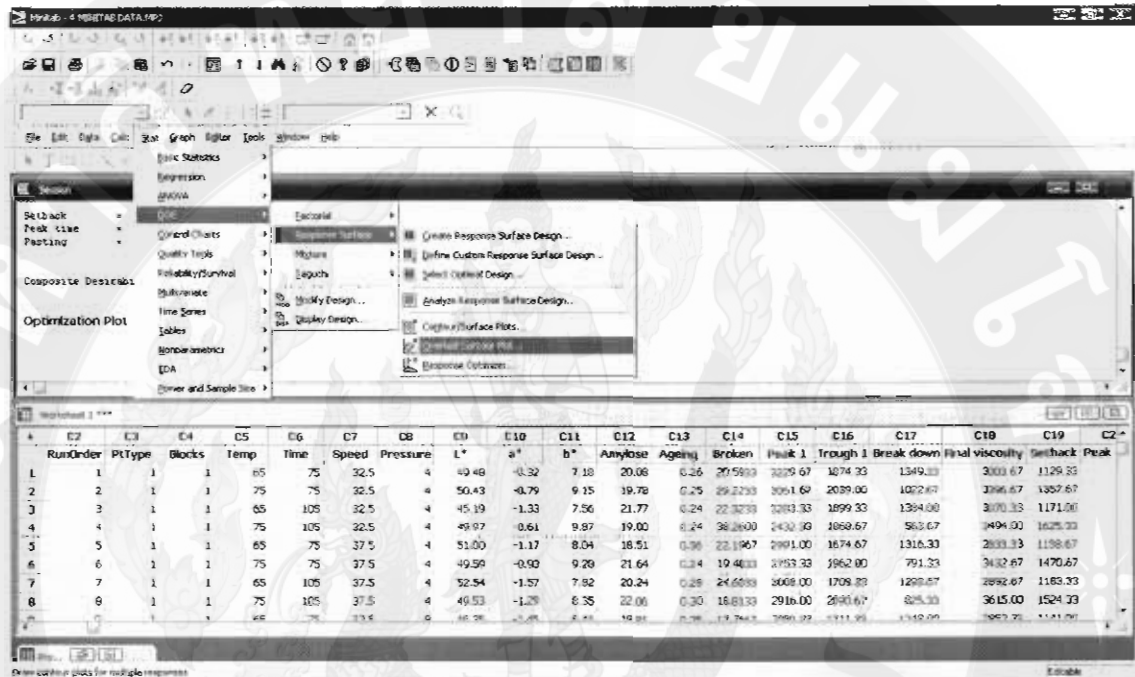


ภาพผนวก 15 การเลือกตัวแปรที่มีค่า Sig มาทำการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

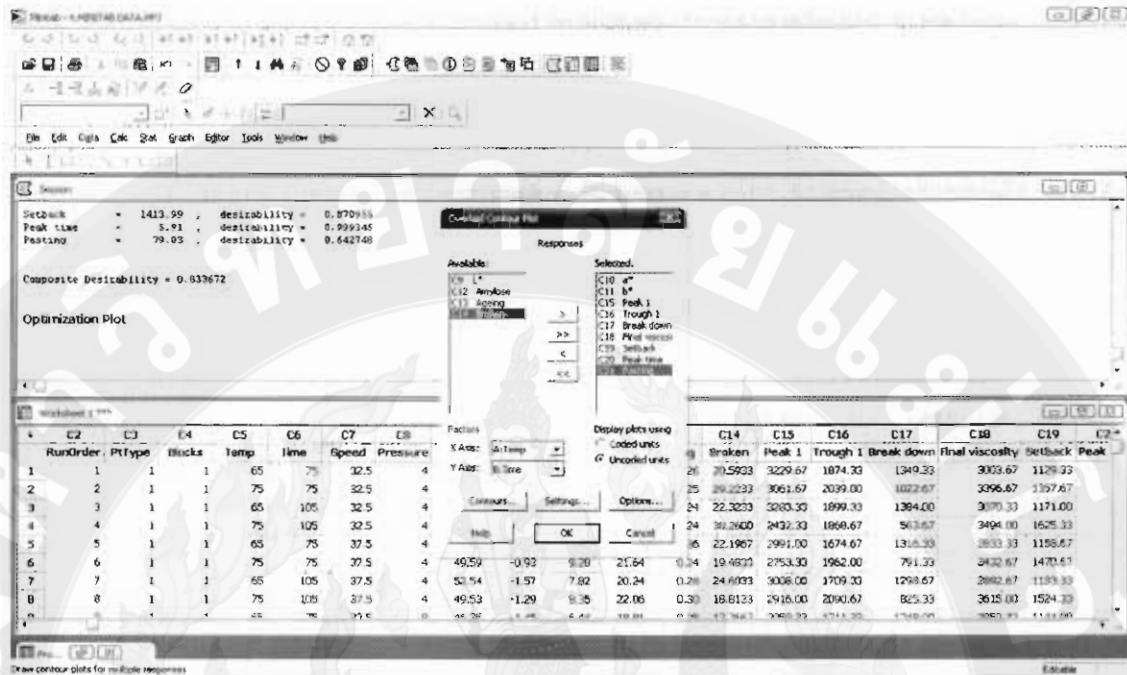


ภาพผนวก 16 การระบุค่าตอบสนองในช่วงที่ต้องการเพื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสม

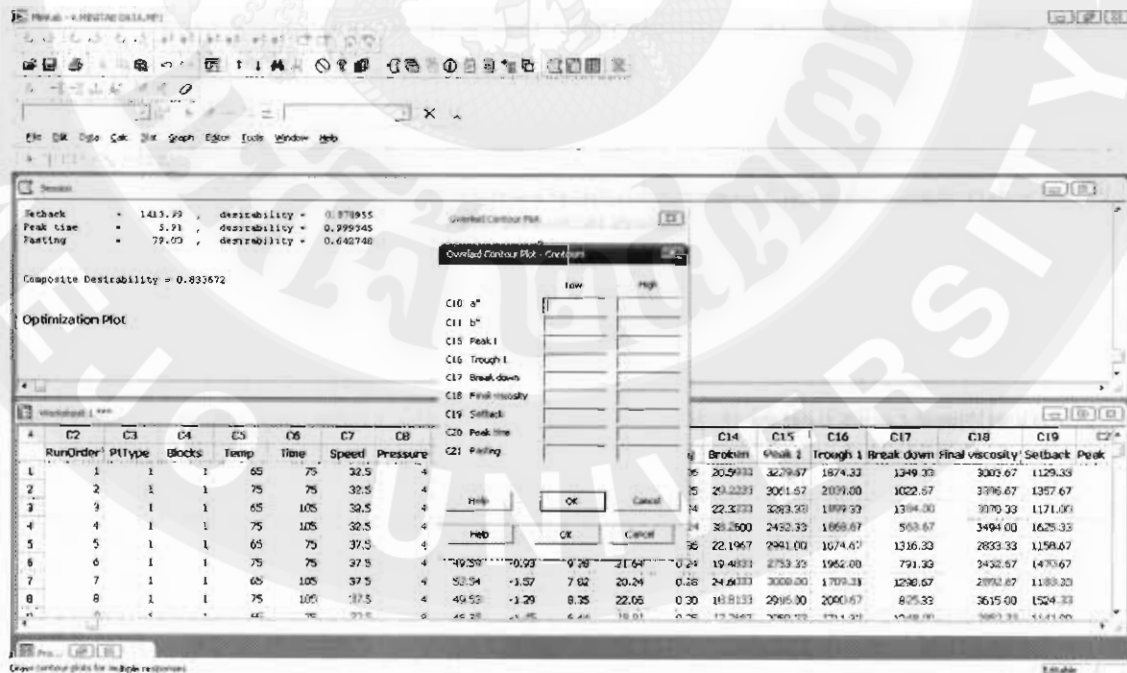
4. การหาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟสถานะที่เหมาะสม โดยเลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Overlaid Contour Plot > Contours เลือกค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของค่าตอบสนองที่ต้องการลงในช่อง Low และ High > OK ดังแสดงในภาพผนวก 17, 18 และ 19



ภาพผนวก 17 การเลือกคำสั่งเพื่อทำการหาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟ

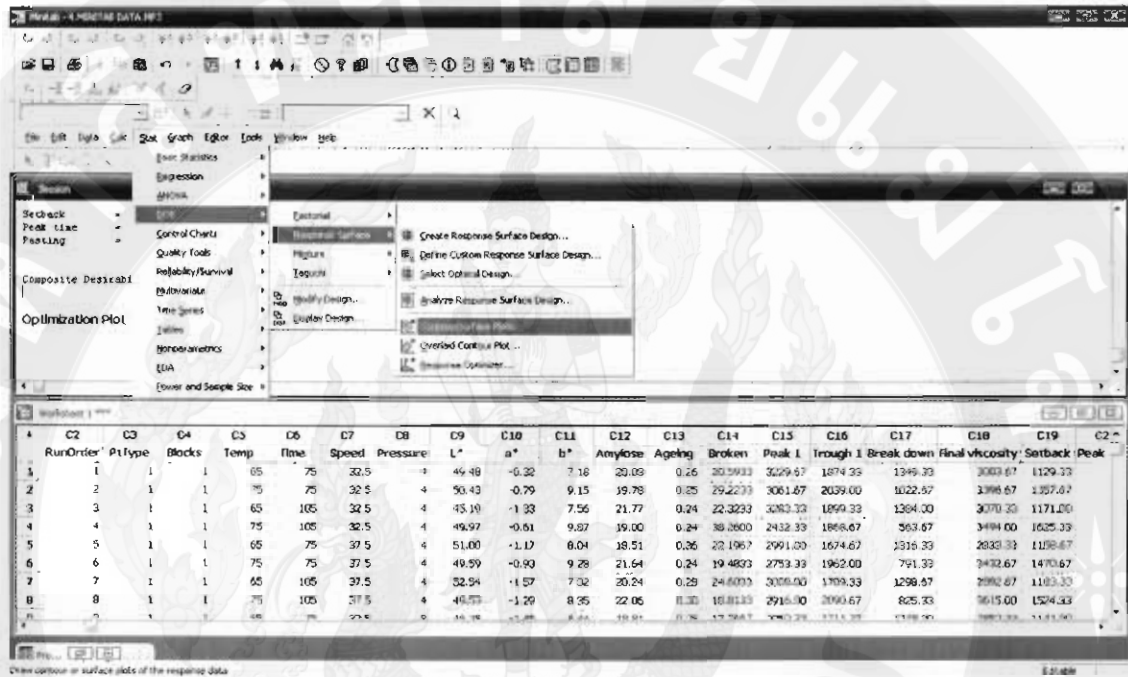


ภาพผนวก 18 การเลือกตัวแปรมาทำการวิเคราะห์หาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟ

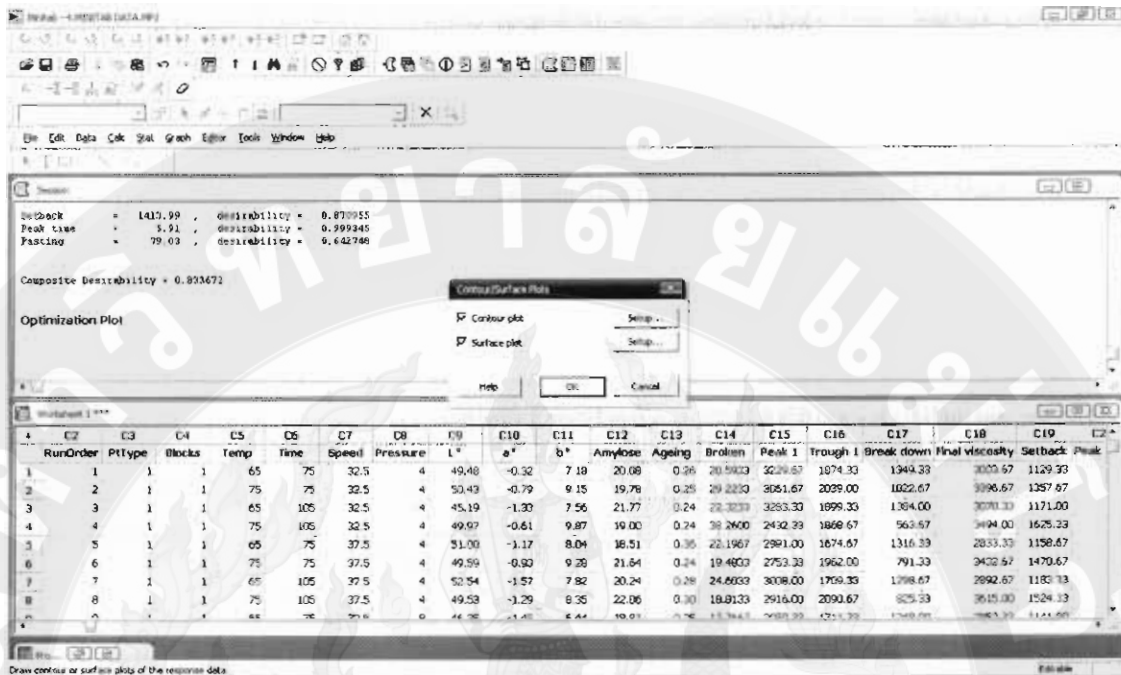


ภาพผนวก 19 การระบุค่าตอบสนองในช่วงสูงและต่ำมาทำการวิเคราะห์หาจุดที่ซ้อนทับกันของกราฟ

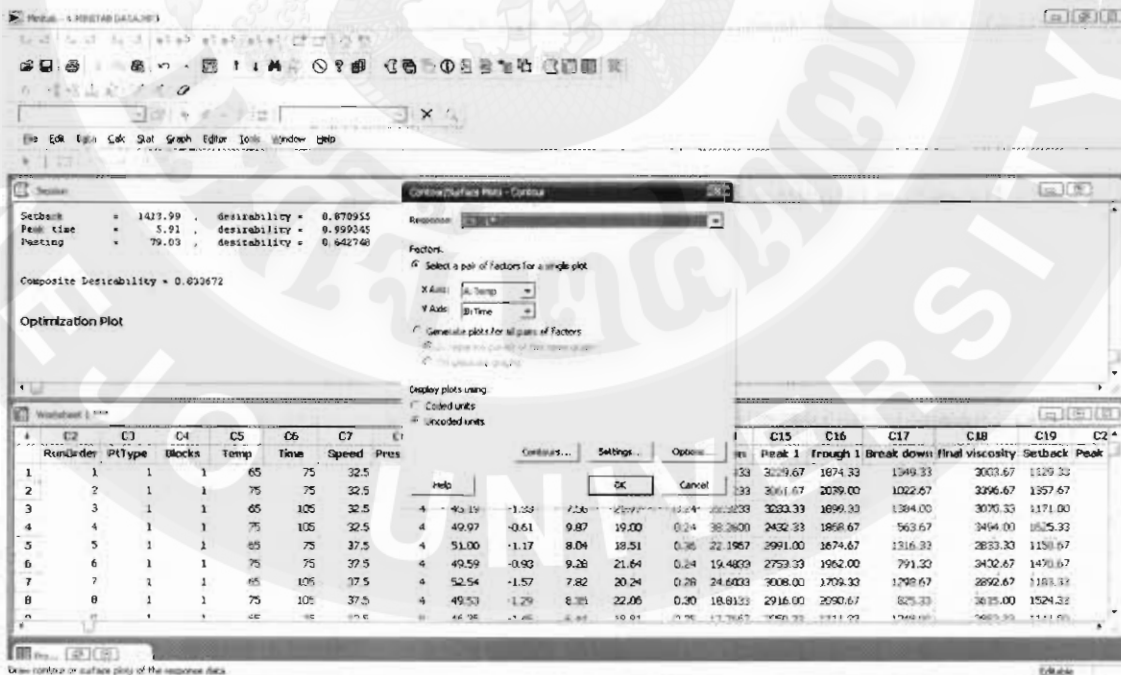
5. การสร้างกราฟ Contour Plot และ Surface Plots โดยเลือกคำสั่ง Stat > DOE > Response Surface > Contours / Surface Plots > Contour plot > Surface plot > Setup เลือกตัวแปรที่ต้องการสร้างกราฟลงในช่อง Response > OK ดังแสดงในภาพผนวก 20, 21 และ 22



ภาพผนวก 20 การเลือกคำสั่งเพื่อทำการสร้างกราฟ Contour Plot และ Surface Plots



ภาพผนวก 21 การเลือกลักษณะของกราฟ



ภาพผนวก 22 การเลือกตัวแปรที่จะสร้างกราฟ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของผลตอบสนองค่าต่าง ๆ

ตารางผนวก 4 Response Surface Regression: L*

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for L*

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	48.5684	0.4717	102.973	0.000
Temp	0.2542	0.4197	0.606	0.550
Speed	-0.1958	0.4197	-0.467	0.645
Pressure	-0.1733	0.4197	-0.413	0.683
Temp*Temp	0.7416	0.3790	1.957	0.062
Temp*Speed	-0.7762	0.5140	-1.510	0.144
Speed*Pressure	-1.0775	0.5140	-2.096	0.047

S = 2.05593 PRESS = 155.210
R-Sq = 31.93% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 14.92%

Analysis of Variance for L*

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	47.590	47.590	7.932	1.88	0.126
Linear	3	3.192	3.192	1.064	0.25	0.859
Square	1	16.181	16.181	16.181	3.83	0.062
Interaction	2	28.217	28.217	14.109	3.34	0.053
Residual Error	24	101.444	101.444	4.227		
Lack-of-Fit	8	13.277	13.277	1.660	0.30	0.955
Pure Error	16	88.168	88.168	5.510		
Total	30	149.034				

Estimated Regression Coefficients for L* using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-3.77018
Temp	-1.92875
Speed	5.56167
Pressure	7.45583
Temp*Temp	0.0296649
Temp*Speed	-0.0621000
Speed*Pressure	-0.215500

ตารางผนวก 5 Response Surface Regression: a*

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for a*

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.03842	0.05813	-17.862	0.000
Temp	0.13833	0.05173	2.674	0.015
Time	0.01250	0.05173	0.242	0.812
Speed	0.00833	0.05173	0.161	0.874
Pressure	-0.06917	0.05173	-1.337	0.196
Time*Time	-0.05829	0.04672	-1.248	0.227
Temp*Time	0.10250	0.06335	1.618	0.121
Temp*Speed	0.05625	0.06335	0.888	0.385
Time*Speed	0.04875	0.06335	0.770	0.451
Time*Pressure	0.24000	0.06335	3.788	0.001
Speed*Pressure	0.19125	0.06335	3.019	0.007

S = 0.253405 PRESS = 3.45030
 R-Sq = 65.54% R-Sq(pred) = 7.43% R-Sq(adj) = 48.32%

Analysis of Variance for a*

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	2.44303	2.44303	0.24430	3.80	0.005
Linear	4	0.57950	0.57950	0.14487	2.26	0.099
Square	1	0.09996	0.09996	0.09996	1.56	0.227
Interaction	5	1.76357	1.76357	0.35271	5.49	0.002
Residual Error	20	1.28428	1.28428	0.06421		
Lack-of-Fit	14	0.92113	0.92113	0.06580	1.09	0.490
Pure Error	6	0.36314	0.36314	0.06052		
Total	30	3.72731				

Estimated Regression Coefficients for a* using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	31.0248
Temp	-0.252833
Time	-0.141702
Speed	-0.658167
Pressure	-2.09333
Time*Time	-2.59064E-04
Temp*Time	0.00136667
Temp*Speed	0.00450000
Time*Speed	0.00130000
Time*Pressure	0.00800000
Speed*Pressure	0.0382500

ตารางผนวก 6 Response Surface Regression: b*

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for b*

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8.25553	0.1416	58.316	0.000
Temp	0.81042	0.1260	6.434	0.000
Time	0.09958	0.1260	0.791	0.437
Speed	0.06125	0.1260	0.486	0.631
Pressure	-0.27625	0.1260	-2.193	0.039
Time*Time	-0.11547	0.1138	-1.015	0.321
Temp*Speed	-0.28562	0.1543	-1.851	0.077
Time*Pressure	0.24313	0.1543	1.576	0.129

S = 0.617070 PRESS = 15.6321
 R-Sq = 70.13% R-Sq(pred) = 46.69% R-Sq(adj) = 61.04%

Analysis of Variance for b*

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	20.5655	20.5655	2.9379	7.72	0.000
Linear	4	17.9222	17.9222	4.4805	11.77	0.000
Square	1	0.3923	0.3923	0.3923	1.03	0.321
Interaction	2	2.2511	2.2511	1.1255	2.96	0.072
Residual Error	23	8.7578	8.7578	0.3808		
Lack-of-Fit	17	4.6627	4.6627	0.2743	0.40	0.935
Pure Error	6	4.0951	4.0951	0.6825		
Total	30	29.3233				

Estimated Regression Coefficients for b* using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-59.4798
Temp	0.961833
Time	0.0503911
Speed	1.62400
Pressure	-0.867500
Time*Time	-5.13207E-04
Temp*Speed	-0.0228500
Time*Pressure	0.00810417

ตารางผนวก 7 Response Surface Regression: amylose

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for amylose

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	21.0908	0.4523	46.630	0.000
Temp	-0.0117	0.3329	-0.035	0.972
Time	-0.0200	0.3329	-0.060	0.953
Speed	0.3725	0.3329	1.119	0.277
Pressure	-0.4625	0.3329	-1.389	0.181
Speed*Speed	-0.5797	0.3018	-1.921	0.070
Pressure*Pressure	-0.5597	0.3018	-1.854	0.079
Temp*Time	-0.2950	0.4077	-0.724	0.478
Temp*Speed	1.0463	0.4077	2.566	0.019
Time*Speed	-0.2963	0.4077	-0.727	0.476
Time*Pressure	-0.3187	0.4077	-0.782	0.444
Speed*Pressure	0.3500	0.4077	0.858	0.401

S = 1.63079 PRESS = 99.8734
 R-Sq = 49.64% R-Sq(pred) = 0.45% R-Sq(adj) = 20.48%

Analysis of Variance for amylose

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	49.799	49.799	4.527	1.70	0.149
Linear	4	8.477	8.477	2.119	0.80	0.542
Square	2	17.426	17.426	8.713	3.28	0.060
Interaction	5	23.896	23.896	4.779	1.80	0.162
Residual Error	19	50.530	50.530	2.659		
Lack-of-Fit	13	14.185	14.185	1.091	0.18	0.995
Pure Error	6	36.345	36.345	6.058		
Total	30	100.329				

Estimated Regression Coefficients for amylose using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	63.2581
Temp	-2.57783
Time	0.614250
Speed	1.07323
Pressure	-0.0460096
Speed*Speed	-0.0927462
Pressure*Pressure	-0.139916
Temp*Time	-0.00393333
Temp*Speed	0.0837000
Time*Speed	-0.00790000
Time*Pressure	-0.0106250
Speed*Pressure	0.0700000

ตารางผนวก 8 Response Surface Regression: aging

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for aging

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.267557	0.05027	5.322	0.000
Temp	0.056400	0.02715	2.077	0.052
Time	-0.017050	0.02715	-0.628	0.537
Speed	0.039250	0.02715	1.446	0.165
Pressure	0.006208	0.02715	0.229	0.822
Temp*Temp	0.066250	0.02487	2.664	0.015
Time*Time	-0.037262	0.02487	-1.498	0.151
Speed*Speed	0.029850	0.02487	1.200	0.245
Pressure*Pressure	-0.018437	0.02487	-0.741	0.468
Temp*Pressure	0.015663	0.03325	0.471	0.643
Time*Speed	-0.003850	0.03325	-0.116	0.909
Speed*Pressure	-0.007963	0.03325	-0.239	0.813

S = 0.133006 PRESS = 1.22436
 R-Sq = 50.76% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 22.25%

Analysis of Variance for aging

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	0.346456	0.346456	0.031496	1.78	0.130
Linear	4	0.121218	0.121218	0.030305	1.71	0.189
Square	4	0.220061	0.220061	0.055015	3.11	0.040
Interaction	3	0.005177	0.005177	0.001726	0.10	0.960
Residual Error	19	0.336120	0.336120	0.017691		
Lack-of-Fit	13	0.232911	0.232911	0.017916	1.04	0.512
Pure Error	6	0.103210	0.103210	0.017202		
Total	30	0.682577				

Estimated Regression Coefficients for aging using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	16.3405
Temp	-0.369119
Time	0.0322664
Speed	-0.299828
Pressure	0.00451577
Temp*Temp	0.00265001
Time*Time	-1.65610E-04
Speed*Speed	0.00477605
Pressure*Pressure	-0.00460930
Temp*Pressure	0.00156625
Time*Speed	-1.02667E-04
Speed*Pressure	-0.00159250

ตารางผนวก 9 Response Surface Regression: broken

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for broken

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	22.5728	0.8694	25.962	0.000
Temp	-0.3588	0.9881	-0.363	0.720
Time	1.4462	0.9881	1.464	0.158
Speed	-0.4685	0.9881	-0.474	0.640
Pressure	-0.6065	0.9881	-0.614	0.546
Temp*Time	-1.2152	1.2102	-1.004	0.327
Temp*Speed	-2.0460	1.2102	-1.691	0.106
Temp*Pressure	-2.9269	1.2102	-2.418	0.025
Time*Pressure	1.1348	1.2102	0.938	0.359
Speed*Pressure	2.2090	1.2102	1.825	0.082

S = 4.84084 PRESS = 1173.12
 R-Sq = 44.45% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 20.64%

Analysis of Variance for broken

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	393.73	393.73	43.75	1.87	0.115
Linear	4	67.38	67.38	16.85	0.72	0.589
Interaction	5	326.35	326.35	65.27	2.79	0.044
Residual Error	21	492.11	492.11	23.43		
Lack-of-Fit	15	284.66	284.66	18.98	0.55	0.838
Pure Error	6	207.44	207.44	34.57		
Total	30	885.84				

Estimated Regression Coefficients for broken using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-485.532
Temp	8.87154
Time	1.00365
Speed	8.61969
Pressure	1.31778
Temp*Time	-0.0162028
Temp*Speed	-0.163683
Temp*Pressure	-0.292687
Time*Pressure	0.0378264
Speed*Pressure	0.441792

ตารางผนวก 10 Response Surface Regression: peak viscosity

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for peak viscosity

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3077.35	45.67	67.377	0.000
Temp	-130.28	33.61	-3.876	0.001
Time	1.42	33.61	0.042	0.967
Speed	42.22	33.61	1.256	0.224
Pressure	43.72	33.61	1.301	0.208
Temp*Temp	-89.95	30.48	-2.951	0.008
Speed*Speed	35.42	30.48	1.162	0.259
Temp*Time	-93.17	41.17	-2.263	0.035
Temp*Speed	85.79	41.17	2.084	0.050
Time*Speed	42.63	41.17	1.035	0.313
Speed*Pressure	81.75	41.17	1.986	0.061

S = 164.678 PRESS = 1321449
R-Sq = 68.51% R-Sq(pred) = 23.28% R-Sq(adj) = 52.77%

Analysis of Variance for peak viscosity

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	10	1180096	1180096	118010	4.35	0.003
Linear	4	496046	496046	124012	4.57	0.009
Square	2	291407	291407	145703	5.37	0.014
Interaction	4	392643	392643	98161	3.62	0.022
Residual Error	20	542380	542380	27119		
Lack-of-Fit	14	374119	374119	26723	0.95	0.564
Pure Error	6	168261	168261	28044		
Total	30	1722476				

Estimated Regression Coefficients for peak viscosity using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	9485.33
Temp	349.269
Time	47.2662
Speed	-1060.67
Pressure	-550.393
Temp*Temp	-3.59813
Speed*Speed	5.66750
Temp*Time	-1.24223
Temp*Speed	6.86325
Time*Speed	1.13668
Speed*Pressure	16.3501

ตารางผนวก 11 Response Surface Regression: trough viscosity

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for trough viscosity

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1976.08	36.30	54.431	0.000
Temp	108.40	26.72	4.057	0.001
Time	52.82	26.72	1.977	0.061
Speed	16.68	26.72	0.624	0.539
Pressure	-4.26	26.72	-0.160	0.875
Temp*Temp	-61.44	24.23	-2.536	0.019
Pressure*Pressure	26.06	24.23	1.076	0.294
Temp*Time	-42.35	32.72	-1.294	0.210
Temp*Speed	74.90	32.72	2.289	0.033
Speed*Pressure	54.40	32.72	1.662	0.111

S = 130.897 PRESS = 742574
R-Sq = 64.76% R-Sq(pred) = 27.27% R-Sq(adj) = 49.66%

Analysis of Variance for trough viscosity

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	661198	661198	73466	4.29	0.003
Linear	4	356101	356101	89025	5.20	0.005
Square	2	139303	139303	69652	4.07	0.032
Interaction	3	165794	165794	55265	3.23	0.043
Residual Error	21	359813	359813	17134		
Lack-of-Fit	15	160751	160751	10717	0.32	0.965
Pure Error	6	199062	199062	33177		
Total	30	1021011				

Estimated Regression Coefficients for trough viscosity using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	1518.87
Temp	206.879
Time	43.0521
Speed	-478.018
Pressure	-461.072
Temp*Temp	-2.45772
Pressure*Pressure	6.51426
Temp*Time	-0.564725
Temp*Speed	5.99165
Speed*Pressure	10.8791

ตารางผนวก 12 Response Surface Regression: breakdown

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for breakdown

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1060.02	40.17	26.391	0.000
Temp	-238.99	25.14	-9.507	0.000
Time	-51.15	25.14	-2.035	0.054
Speed	25.24	25.14	1.004	0.326
Pressure	48.79	25.14	1.941	0.065
Temp*Temp	-24.11	22.90	-1.053	0.304
Time*Time	23.60	22.90	1.031	0.314
Speed*Speed	34.89	22.90	1.524	0.142
Temp*Time	-52.02	30.79	-1.690	0.105

S = 123.146 PRESS = 624311
 R-Sq = 82.94% R-Sq(pred) = 68.07% R-Sq(adj) = 76.73%

Analysis of Variance for breakdown

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	1621592	1621592	202699	13.37	0.000
Linear	4	1505964	1505964	376491	24.83	0.000
Square	3	72328	72328	24109	1.59	0.220
Interaction	1	43300	43300	43300	2.86	0.105
Residual Error	22	333628	333628	15165		
Lack-of-Fit	16	225895	225895	14118	0.79	0.676
Pure Error	6	107733	107733	17956		
Total	30	1955220				

Estimated Regression Coefficients for breakdown using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	2805.62
Temp	149.649
Time	26.2651
Speed	-380.680
Pressure	24.3960
Temp*Temp	-0.964426
Time*Time	0.104880
Speed*Speed	5.58250
Temp*Time	-0.693625

ตารางผนวก 13 Response Surface Regression: final viscosity

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for final viscosity

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3264.42	42.57	76.678	0.000
Temp	265.39	31.33	8.470	0.000
Time	97.33	31.33	3.106	0.005
Speed	44.22	31.33	1.411	0.172
Pressure	-20.47	31.33	-0.653	0.520
Temp*Temp	-39.29	28.41	-1.383	0.181
Speed*Speed	33.41	28.41	1.176	0.252
Temp*Speed	77.13	38.37	2.010	0.057
Speed*Pressure	53.46	38.37	-1.393	0.178

S = 153.500 PRESS = 934593
 R-Sq = 80.94% R-Sq(pred) = 65.63% R-Sq(adj) = 74.00%

Analysis of Variance for final viscosity

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	2200663	2200663	275083	11.67	0.000
Linear	4	1974722	1974722	493680	20.95	0.000
Square	2	85046	85046	42523	1.80	0.188
Interaction	2	140896	140896	70448	2.99	0.071
Residual Error	22	518369	518369	23562		
Lack-of-Fit	16	231525	231525	14470	0.30	0.974
Pure Error	6	286844	286844	47807		
Total	30	2719032				

Estimated Regression Coefficients for final viscosity using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	14616.4
Temp	57.1749
Time	6.48894
Speed	-852.590
Pressure	-384.439
Temp*Temp	-1.57176
Speed*Speed	5.34614
Temp*Speed	6.17000
Speed*Pressure	10.6915

ตารางผนวก 14 Response Surface Regression: setback from trough

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for setback from trough

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1280.48	9.896	129.393	0.000
Temp	155.60	8.805	17.671	0.000
Time	45.35	8.805	5.150	0.000
Pressure	-14.82	8.805	-1.683	0.105
Temp*Temp	29.22	7.953	3.675	0.001
Temp*Time	27.31	10.784	2.533	0.018
Temp*Pressure	-21.52	10.784	-1.996	0.057

S = 43.1359 PRESS = 83297.5
 R-Sq = 93.84% R-Sq(pred) = 88.51% R-Sq(adj) = 92.30%

Analysis of Variance for setback from trough

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	680148	680148	113358	60.92	0.000
Linear	3	635676	635676	211892	113.88	0.000
Square	1	25126	25126	25126	13.50	0.001
Interaction	2	19345	19345	9673	5.20	0.013
Residual Error	24	44657	44657	1861		
Lack-of-Fit	8	14215	14215	1777	0.93	0.516
Pure Error	16	30442	30442	1903		
Total	30	724805				

Estimated Regression Coefficients for setback from trough using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	5992.77
Temp	-152.399
Time	-22.4674
Pressure	143.239
Temp*Temp	1.16899
Temp*Time	0.364150
Temp*Pressure	-2.15212

ตารางผนวก 15 Response Surface Regression: peak time

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for peak time

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5.88096	0.02585	227.487	0.000
Temp	0.07542	0.01903	3.964	0.001
Time	0.03125	0.01903	1.642	0.115
Speed	0.04625	0.01903	2.431	0.024
Pressure	-0.03042	0.01903	-1.599	0.124
Temp*Temp	0.02105	0.01725	1.220	0.235
Time*Time	0.01355	0.01725	0.785	0.441
Temp*Speed	0.02313	0.02330	0.992	0.332
Time*Speed	-0.03063	0.02330	-1.314	0.202

S = 0.0932102 PRESS = 0.367608

R-Sq = 58.91% R-Sq(pred) = 20.97% R-Sq(adj) = 43.96%

Analysis of Variance for peak time

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	0.27400	0.27400	0.034250	3.94	0.005
Linear	4	0.23348	0.23348	0.058371	6.72	0.001
Square	2	0.01696	0.01696	0.008479	0.98	0.393
Interaction	2	0.02356	0.02356	0.011781	1.36	0.278
Residual Error	22	0.19114	0.19114	0.008688		
Lack-of-Fit	16	0.12277	0.12277	0.007673	0.67	0.755
Pure Error	6	0.06837	0.06837	0.011395		
Total	30	0.46514				

Estimated Regression Coefficients for peak time using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	10.6540
Temp	-0.167522
Time	0.0198301
Speed	-0.0375000
Pressure	-0.0152083
Temp*Temp	0.000841827
Time*Time	6.02030E-05
Temp*Speed	0.00185000
Time*Speed	-8.16667E-04

ตารางผนวก 16 Response Surface Regression: pasting temperature

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for pasting temperature

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	76.1495	0.8253	92.270	0.000
Temp	4.5104	0.5165	8.733	0.000
Time	0.5754	0.5165	1.114	0.279
Speed	-0.1138	0.5165	-0.220	0.828
Pressure	-0.7646	0.5165	-1.480	0.155
Temp*Temp	0.9358	0.4705	1.989	0.061
Time*Time	-0.2917	0.4705	-0.620	0.543
Speed*Speed	-0.3792	0.4705	-0.806	0.430
Temp*Time	0.7481	0.6326	1.183	0.252
Temp*Speed	-0.5906	0.6326	-0.934	0.362
Temp*Pressure	-0.6169	0.6326	-0.975	0.342
Speed*Pressure	-0.6431	0.6326	-1.017	0.322

S = 2.53029 PRESS = 361.406
 R-Sq = 82.49% R-Sq(pred) = 47.97% R-Sq(adj) = 72.35%

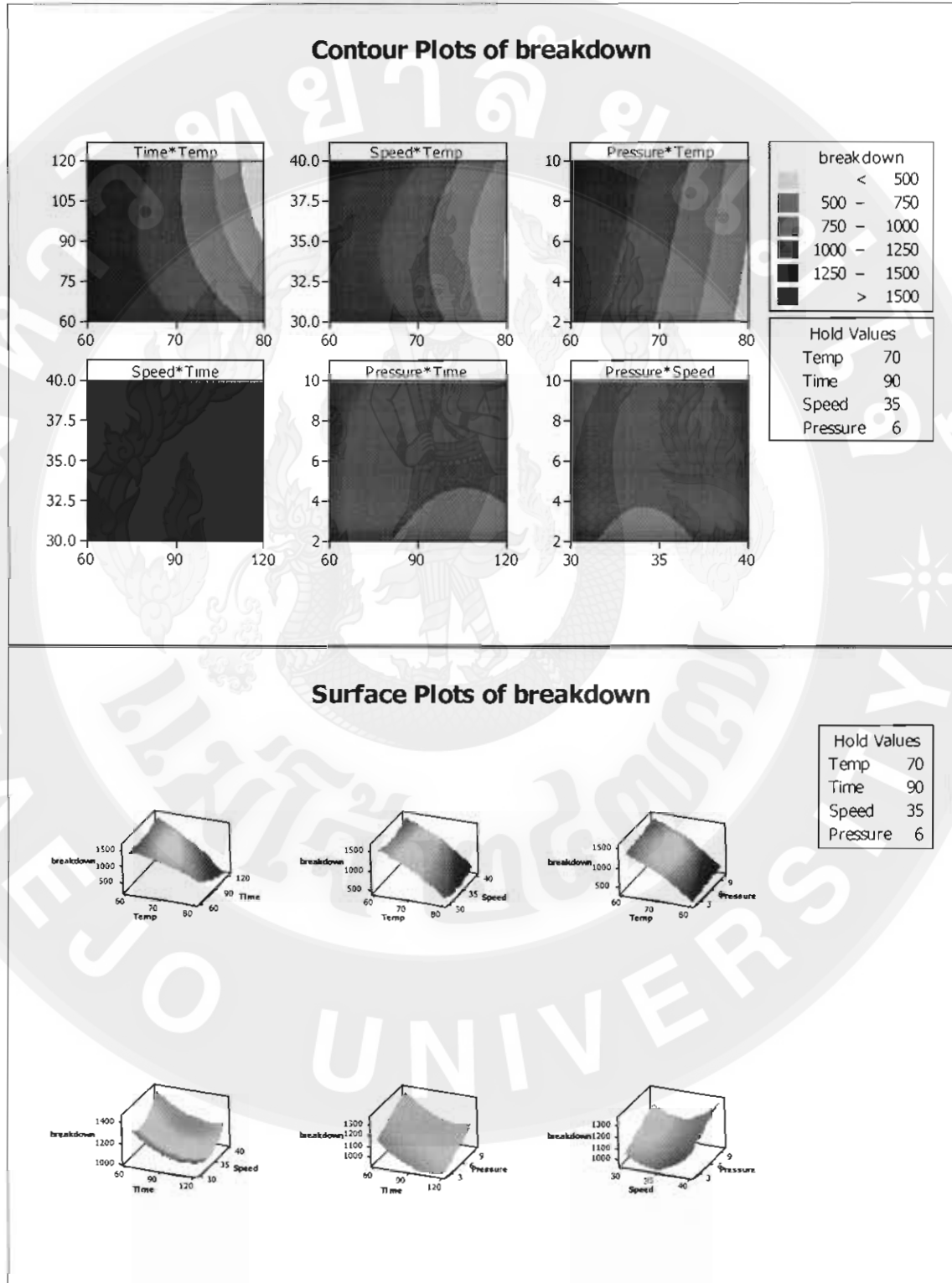
Analysis of Variance for pasting temperature

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	11	572.95	572.95	52.086	8.14	0.000
Linear	4	510.54	510.54	127.635	19.94	0.000
Square	3	35.17	35.17	11.722	1.83	0.176
Interaction	4	27.24	27.24	6.811	1.06	0.402
Residual Error	19	121.65	121.65	6.402		
Lack-of-Fit	13	73.42	73.42	5.648	0.70	0.722
Pure Error	6	48.22	48.22	8.037		
Total	30	694.59				

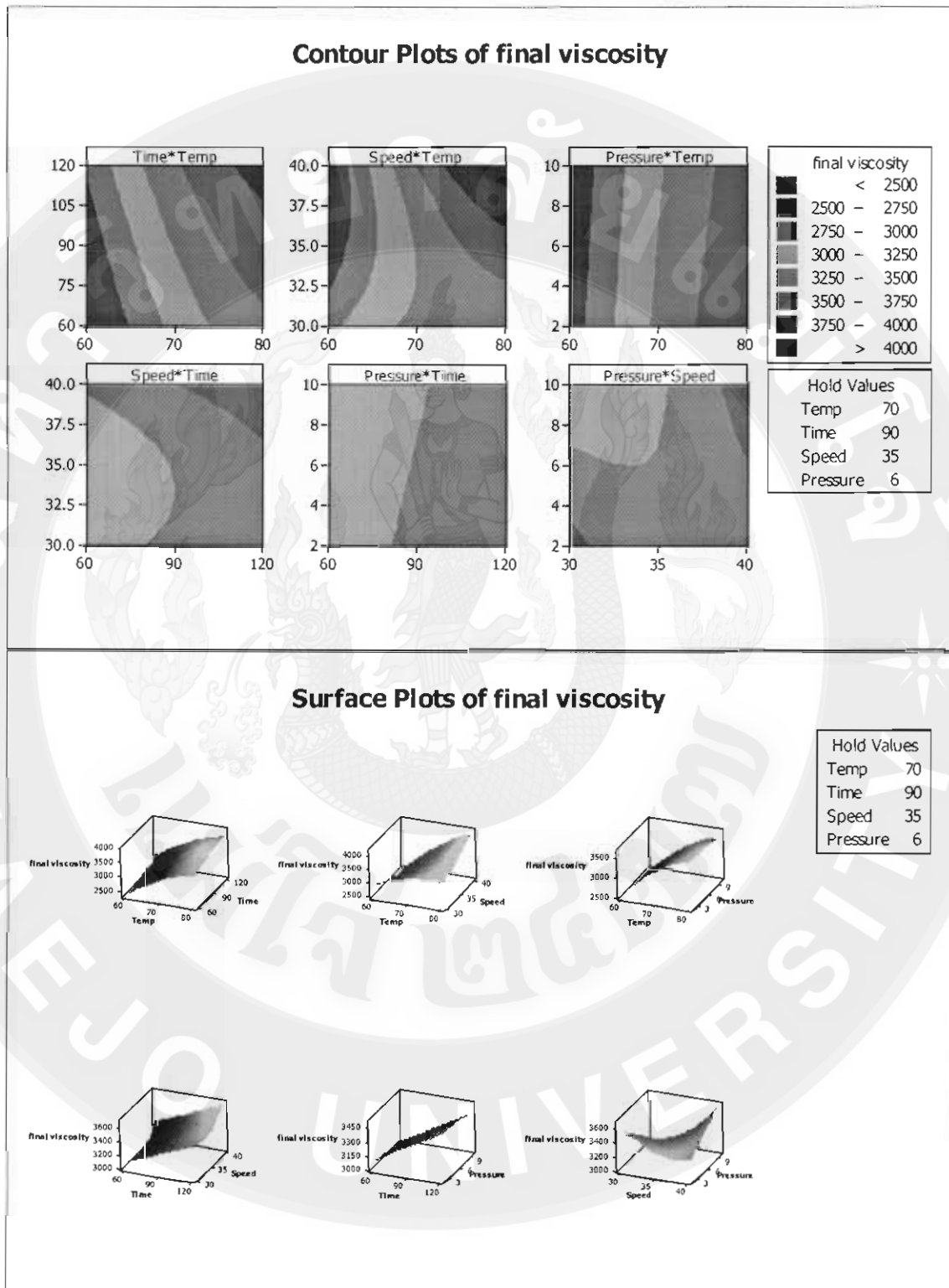
Estimated Regression Coefficients for pasting temperature using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	6.18318
Temp	-3.21219
Time	-0.426517
Speed	8.28096
Pressure	8.43771
Temp*Temp	0.0374314
Time*Time	-0.00129651
Speed*Speed	-0.0606745
Temp*Time	0.00997500
Temp*Speed	-0.0472500
Temp*Pressure	-0.0616875
Speed*Pressure	-0.128625

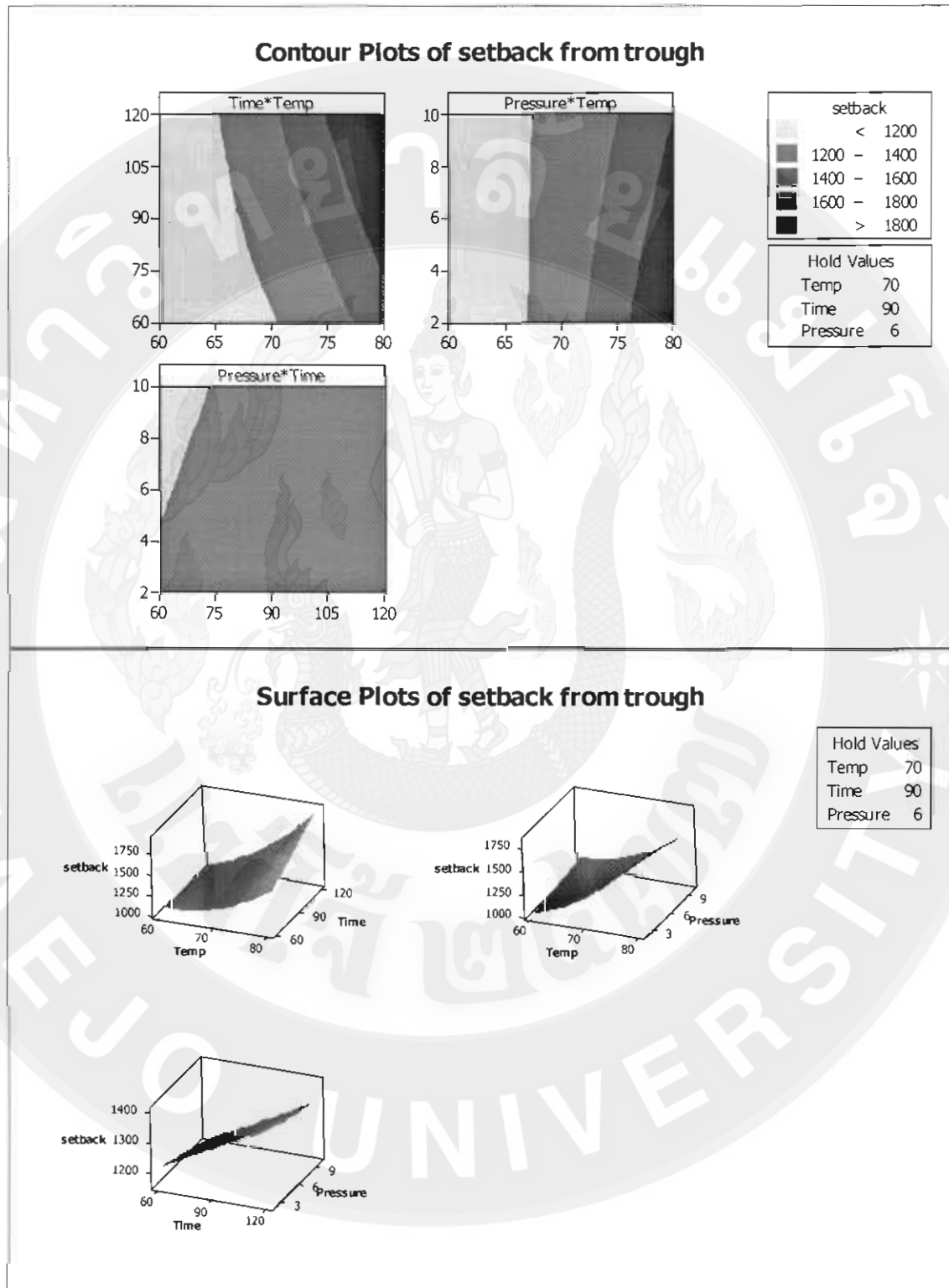
กราฟ Contour Plots และ Surface Plots ของผลตอบสนองค่าต่าง ๆ



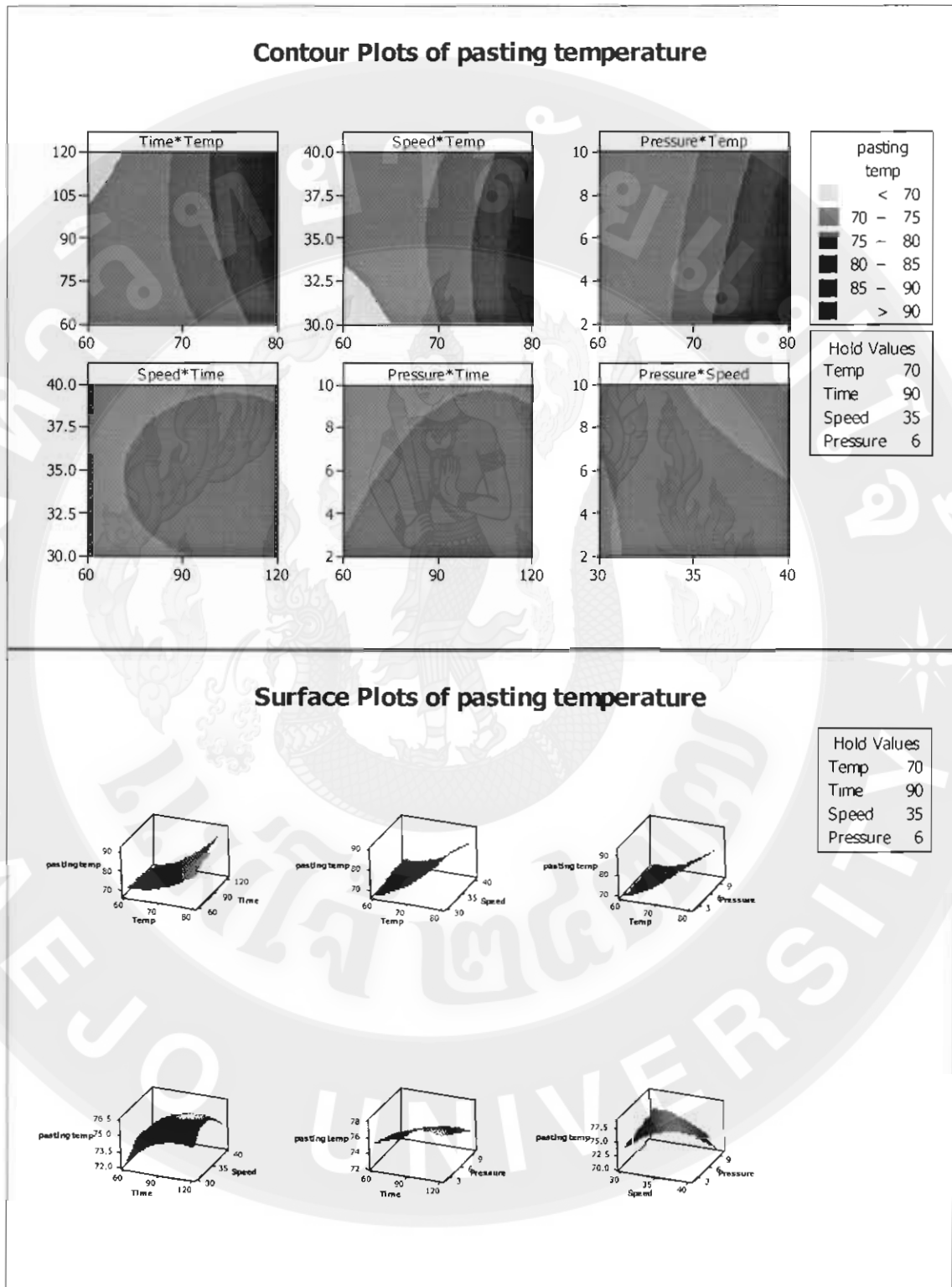
ภาพผนวก 23 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืดของน้ำแข็ง breakdown



ภาพผนวก 24 กราฟความถี่พื้นผิวของค่าความหนืดของน้ำแป้ง final viscosity



ภาพผนวก 25 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืดของน้ำแข็ง setback from trough

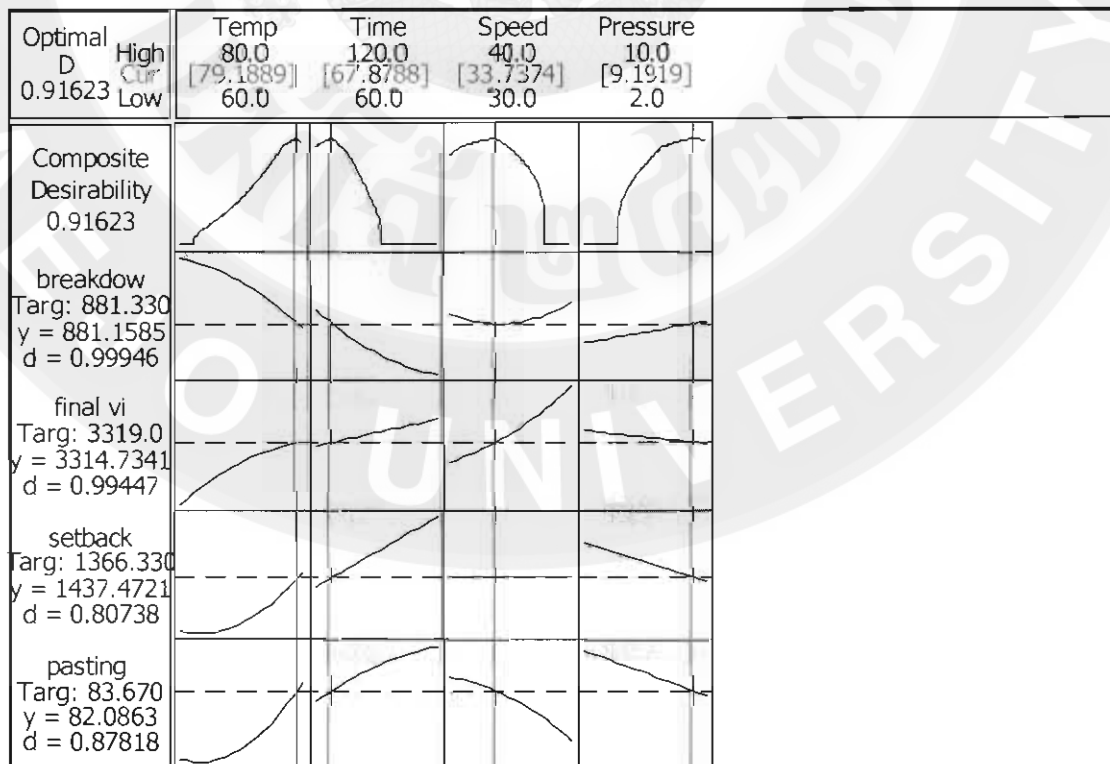


ภาพผนวก 26 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนืด pasting temperature

การประมาณค่าหาสภาวะที่เหมาะสม

ตารางผนวก 17 Response Optimization

Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
breakdown	Target	563.33	881.33	1458.33	1	1
final viscosity	Target	2547.00	3319.00	3798.00	1	1
setback from trough	Target	1032.00	1366.33	1735.67	1	1
pasting temperature	Target	70.67	83.67	85.98	1	1
Global Solution						
Temp	=	79.1889				
Time	=	67.8788				
Speed	=	33.7374				
Pressure	=	9.1919				
Predicted Responses						
breakdown	=	881.62	,	desirability =	0.999461	
final viscosity	=	3314.49	,	desirability =	0.994474	
setback from trough	=	1437.23	,	desirability =	0.807381	
pasting temperature	=	81.30	,	desirability =	0.878177	
Composite Desirability = 0.916231						



ภาพผนวก 27 กราฟสภาวะที่เหมาะสม

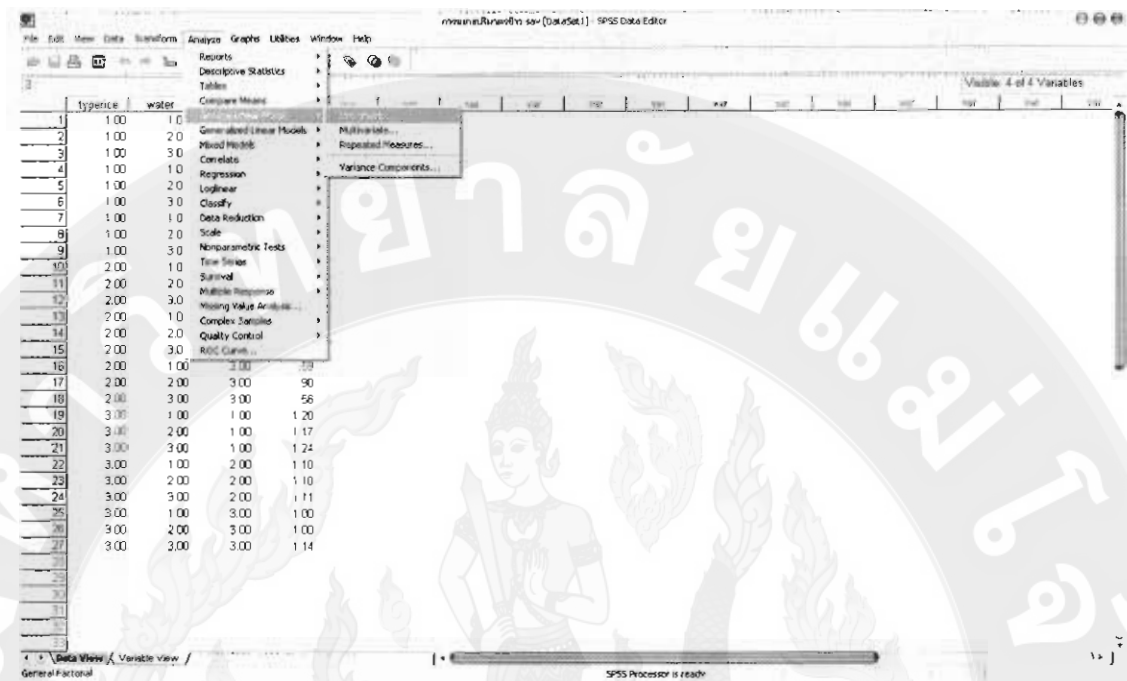
ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบสุ่มไม่บล็อกสมบูรณ์

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ โดยการนำค่าการขยายปริมาตรที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบหลายทาง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหากค่า Sig. ที่ได้ น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

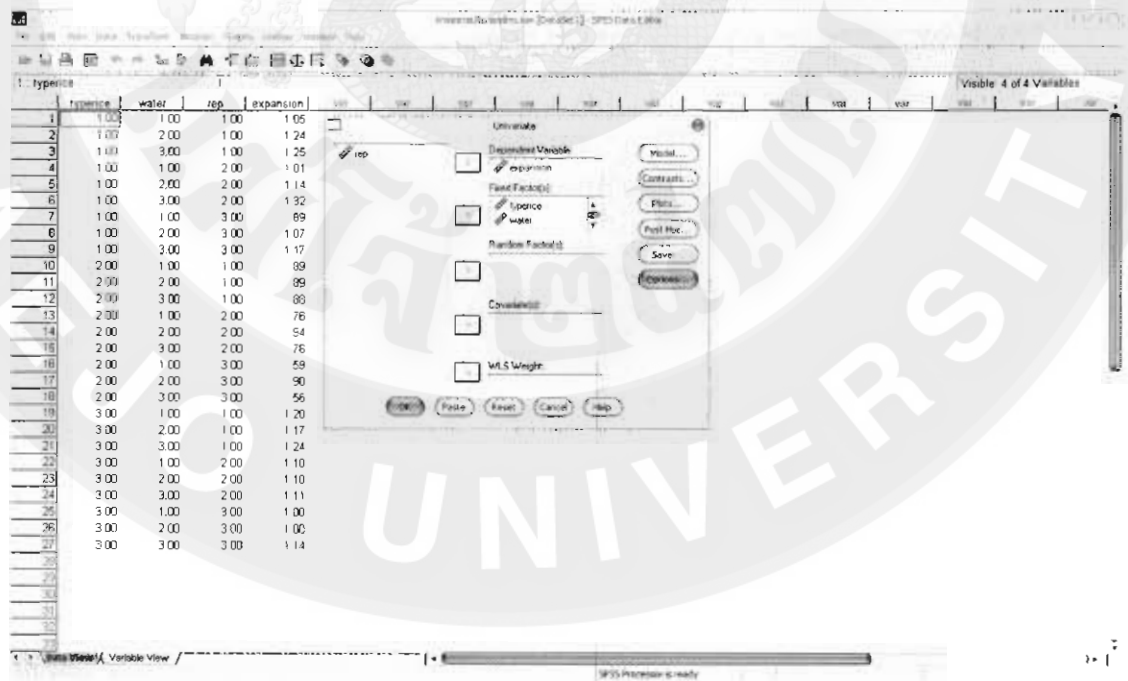
1. ทำการกรอกตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ ประกอบด้วยตัวแปรอิสระได้แก่ ชนิดของข้าว และปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้ม และตัวแปรตามได้แก่ ค่าการขยายปริมาตรของข้าว ลงในโปรแกรม ดังแสดงในภาพผนวก 28

	type	water	temp	expansion
1	1.00	1.00	1.00	1.05
2	1.00	2.00	1.00	1.24
3	1.00	3.00	1.00	1.25
4	1.00	1.00	2.00	1.01
5	1.00	2.00	2.00	1.14
6	1.00	3.00	2.00	1.32
7	1.00	1.00	3.00	0.89
8	1.00	2.00	3.00	1.07
9	1.00	3.00	3.00	1.17
10	2.00	1.00	1.00	0.89
11	2.00	2.00	1.00	0.89
12	2.00	3.00	1.00	0.88
13	2.00	1.00	2.00	0.76
14	2.00	2.00	2.00	0.94
15	2.00	3.00	2.00	0.76
16	2.00	1.00	3.00	0.59
17	2.00	2.00	3.00	0.80
18	2.00	3.00	3.00	0.56
19	3.00	1.00	1.00	1.20
20	3.00	2.00	1.00	1.17
21	3.00	3.00	1.00	1.24
22	3.00	1.00	2.00	1.10
23	3.00	2.00	2.00	1.10
24	3.00	3.00	2.00	1.11
25	3.00	1.00	3.00	1.00
26	3.00	2.00	3.00	1.00
27	3.00	3.00	3.00	1.14

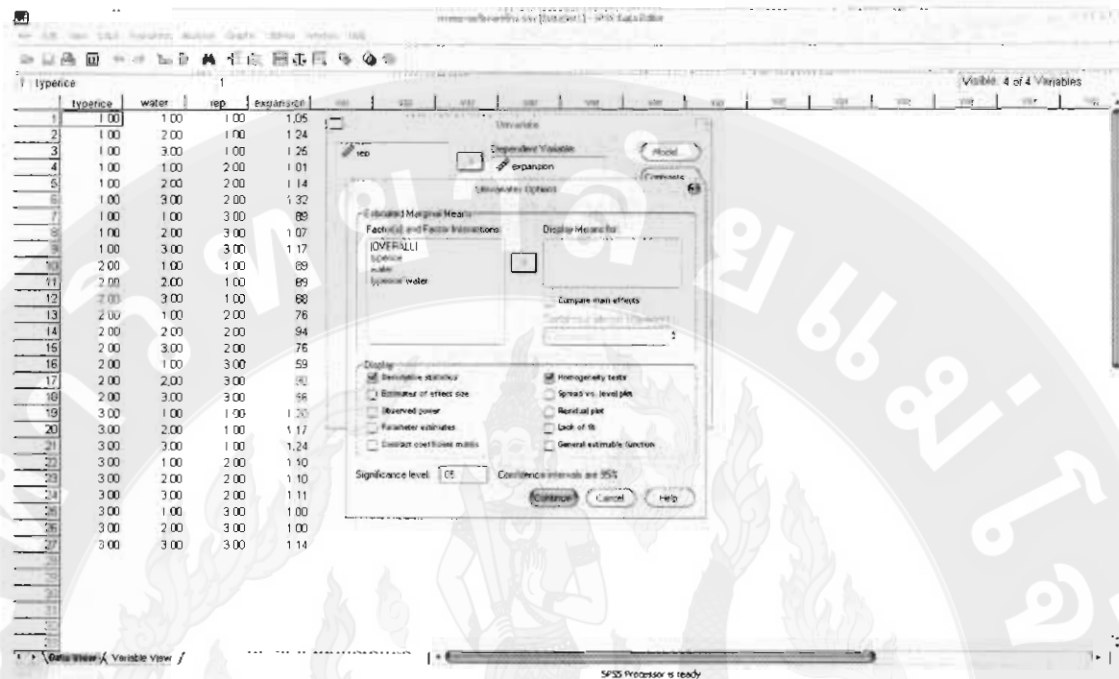
ภาพผนวก 28 การกรอกตัวแปรลงใน Data View



ภาพผนวก 30 การเลือกคำสั่งเพื่อทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ

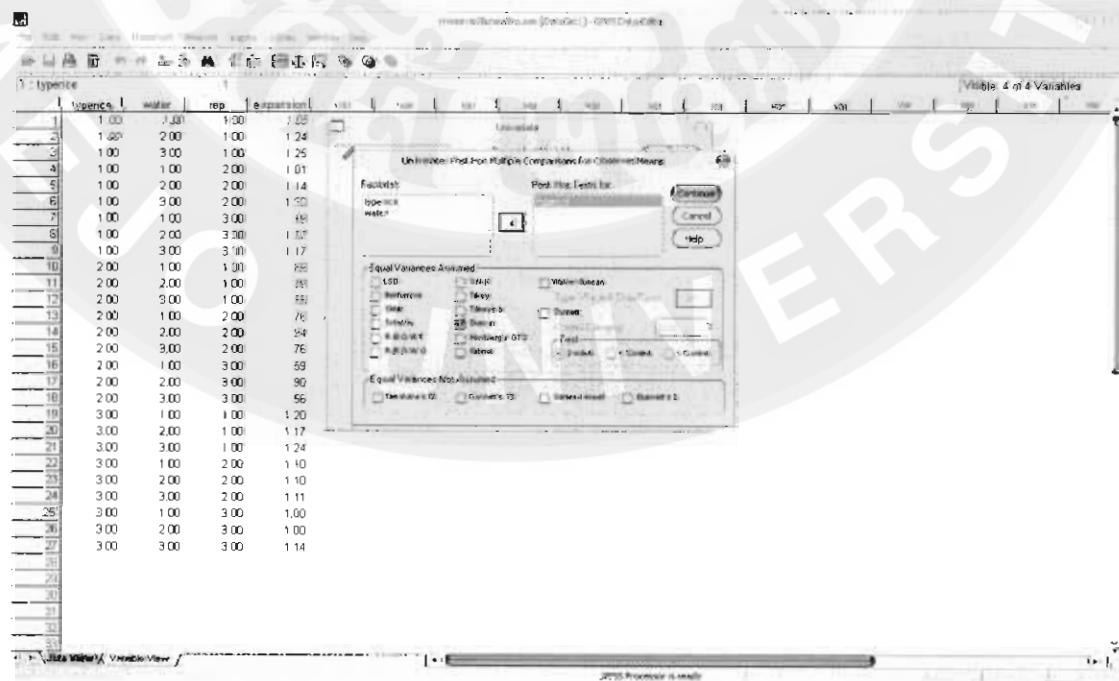


ภาพผนวก 31 การเลือกตัวแปร



ภาพผนวก 32 การเลือกข้อมูลที่แสดงในผลลัพธ์

4. ทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อน โดยเลือกคำสั่ง Analyze > General Linear Model > Univariate > Post Hoc > Duncan > Continue > OK ดังแสดงในภาพผนวก 33



ภาพผนวก 33 การเลือกคำสั่งเปรียบเทียบเชิงซ้อน

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์

Tests of Normality

typерice	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
newexpension trt rice	.133	9	.200*	.978	9	.951
fresh rice	.280	9	.041	.833	9	.048
aging rice	.175	9	.200*	.947	9	.662

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

ภาพผนวก 34 ลักษณะการแจกแจงของข้อมูล

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: newexpension

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	361.492 ^a	8	45.186	9.767	.000
Intercept	12322.157	1	12322.157	2663.342	.000
typерice	284.233	2	142.117	30.717	.000
water	29.556	2	14.778	3.194	.065
typерice * water	47.703	4	11.926	2.578	.073
Error	83.278	18	4.627		
Total	12766.927	27			
Corrected Total	444.770	26			

a. R Squared = .813 (Adjusted R Squared = .730)

ภาพผนวก 35 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

newexpension

Duncan^{a,b}

typерice	N	Subset	
		1	2
fresh rice	9	16.7756	
aging rice	9		23.5700
trt rice	9		23.7433
Sig.		1.000	.866

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Based on Type III Sum of Squares

The error term is Mean Square(Error) = 4.627.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9.000.

b. Alpha = .05.

ภาพผนวก 36 การเปรียบเทียบเงื่อนไขแบบ Duncan



ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล		นางสาวนาฏชนก ปรางปรุ
เกิดเมื่อ		14 มีนาคม 2529
สถานที่เกิด		จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2546	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา
	พ.ศ. 2550	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดปทุมธานี
	พ.ศ. 2553	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการฝึกงาน	พ.ศ. 2549	นักศึกษาฝึกงาน บริษัท บี ฟู้ดส์โปรดักส์อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จังหวัดลพบุรี
ผลงานทางวิชาการ	พ.ศ. 2553	นาฏชนก ปรางปรุ สุทธา พิมพ์พิไล และสุนทร สืบคำ. 2553. การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งความเก่าของข้าวสาร โดยวิธีผลตบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว. ใน งานสัมมนา วิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 1-3 กันยายน 2553 ณ โรงแรมดิเอ็มเพลส. เชียงใหม่: ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.