

การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของข้าวเนื่อง

FEASIBILITY STUDY OF IMPROVING THE MECHANICAL
PROPERTIES OF PARBOILED RICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-090

การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง

FEASIBILITY STUDY OF IMPROVING THE MECHANICAL
PROPERTIES OF PARBOILED RICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-100-090

FEASIBILITY STUDY OF IMPROVING THE MECHANICAL
PROPERTIES OF PARBOILED RICE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-EN-M-100-090



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของข้าวนึ่ง
Thesis Title Feasibility Study of Improving the Mechanical Properties of Parboiled Rice
นักศึกษา นายพิสุทธิ์ ไม้ขุน
รหัสประจำตัว 60601142
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ประสันท์ ชุ่มใจหาญ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-100-090

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อนุพันธ์	เทอดวงศ์วรกุล	อนุพันธ์
ผศ.ดร.จิราพร	ศรัณย์โณวินชัย จงยิ่งเจริญ	จิราพร
รศ.ดร.ปานมนัส	ศิริสมบุญ	ปานมนัส
ผศ.ดร.ธีรพงศ์	ผลโพธิ์	ธีรพงศ์
ผศ.ดร.ประสันท์	ชุ่มใจหาญ	ประสันท์

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง AE-302 อาคาร CCA

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง
นักศึกษา	นาย พิสุทธิ ไม้ขุน
รหัสนักศึกษา	60601142
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเกษตร
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ประสันต์ ชุ่มใจหาญ

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายหลักของการทำข้าวหนึ่งคือการปรับปรุงข้าวคุณภาพต่ำให้มีคุณภาพในการสีที่ดีขึ้น โดยเฉพาะการลดเปอร์เซ็นต์การแตกหักของเมล็ดข้าว อย่างไรก็ตามการทำข้าวหนึ่งยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลบางประการของเมล็ดข้าวด้วยเช่นกัน การทำข้าวหนึ่งทำให้ค่าความแข็งของข้าวเพิ่มสูงขึ้น และค่าความเหนียวของเมล็ดข้าวลดลง ส่งผลทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสทางการรับประทานมีค่าไม่ดีเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านการหนึ่ง มีหลายงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้สารละลายต่างเพื่อให้ไฟเบอร์มีความอ่อนตัว และการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเพื่อช่วยลดความแข็งของข้าว ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลข้าวหนึ่งด้วยวิธีการแช่ในสารละลายต่าง และระบบคลื่นอัลตราโซนิกร่วมในกระบวนการแช่ โดยใช้สารละลายต่างที่ใช้คือ สารละลาย $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ NaHCO_3 และสำหรับความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้คือ 35 kHz จากผลการทดลองพบว่า ข้าวหนึ่งปกติที่อุณหภูมิการแช่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และข้าวหนึ่งที่แช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก ที่อุณหภูมิการแช่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5.5 ชั่วโมง ให้ค่าความแข็งต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

Thesis	Feasibility study of improving the Mechanical Properties of Parboiled rice
Student	Mr. Pisut Maichoon
Student ID.	60601142
Degree	Master of Engineering
Program	Agricultural Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Prasan Choomjaihan

ABSTRACT

Producing parboiled rice is mainly to improve rice quality, especially decreasing the broken kernel. However, the parboiled rice also affects the mechanical properties of rice kernel; particularly, the grain hardness and stickiness. The hardness of kernel is increased, while the stickiness of the kernel is decreased. There are many researches that have applied alkaline solutions to generate softer and weak fiber and the application of ultrasonic waves to help reduce the hardness of rice. Thus, the purpose of this research was to study the feasibility for improving the mechanical properties of parboiled rice by soaking in a alkaline solution and ultrasonic waves in the soaking process. Alkaline solution used in this experiment are $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and NaHCO_3 as well as the frequency of ultrasonic wave used is 35 kHz. The result showed that the parboiled rice which was soaked at 65 °C for 5 hours and parboiled rice was soaked ultrasonic waves at a temperature of 70 °C for 5.5 hours, least the hardness significantly ($\alpha=0.05$).

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ประสงค์ ชุ่มใจหาญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ และ ผศ.ดร. จิราพร ศรีภิญโญวิชย์ จงยิ่งเจริญ ที่ช่วยเหลือดูแลการทดลองให้เป็นไปอย่างเรียบร้อย และขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในหลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ช่วยเหลือทำการทดลองและให้กำลังใจเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พิสุทธิ ไม้ซุน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความสำคัญของข้าว.....	3
2.2 การปรับปรุงคุณภาพข้าวโดยการทำข้าวหนึ่ง.....	5
2.3 สารละลายต่างกับการทำให้เส้นใยอ่อนตัว.....	17
2.4 การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแช่ข้าว.....	20
2.5 สมบัติเชิงกลบางประการของข้าว.....	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง.....	23
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	23
3.2 แผนการทดลอง.....	28
3.3 การศึกษาร้อยละการแตกหักเนื่องจากกระบวนการทำข้าวหนึ่ง.....	30
3.4 การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การตัดสินใจเลือกสภาวะที่เหมาะสม.....	32
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	34
4.1 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านมา กระบวนการหนึ่งแบบปกติ.....	34
4.2 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการแช่ ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่.....	38
4.3 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการแช่ ในสารละลายโซเดียมโบรไมด์ในกระบวนการแช่.....	44
4.4 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการแช่ ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก.....	49
4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของการทำข้าว หนึ่งในแต่ละวิธี.....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	62
ภาคผนวก ก. ร้อยละการแตกหัก.....	63
ภาคผนวก ข. ค่าความแข็งและความเหนียว.....	72
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA.....	86
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่.....	หน้า
2.1 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของข้าว.....	4
2.2 ค่าความสามารถในการแพร่ของน้ำ.....	10
2.3 ค่าความแข็งแรงแรงบิดและค่ามอดูลัสแรงบิดของไฟเบอร์จากสับปะรดและโพลีพรพิลีน.....	17
2.4 ค่าความแข็งแรงแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของไฟเบอร์จากสับปะรดและโพลีพรพิลีน.....	18
2.5 ค่าความแข็งแรงแรงดึงและมอดูลัสยืดหยุ่นของไฟเบอร์จากไผ่.....	18
2.6 ค่าคุณสมบัติเชิงกลของข้าว.....	21
4.1 ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติ.....	35
4.2 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติ.....	38
4.3 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติที่อุณหภูมิต่างๆ.....	38
4.4 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติที่เวลาต่างๆ.....	38
4.5 ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในกระบวนการแช่.....	40
4.6 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	43
4.7 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการ แช่ที่เวลาต่างๆ.....	43
4.8 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน กระบวนการแช่.....	43
4.9 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน กระบวนการแช่ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	45
4.10 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน กระบวนการแช่ที่เวลาต่างๆ.....	45
4.11 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการ แช่ที่อุณหภูมิในการแช่ต่างๆ.....	48
4.12 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการ แช่ที่เวลาต่างๆ.....	48
4.13 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการ แช่ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่.....	หน้า
4.14 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ที่เวลาต่างๆ.....	48
4.15 ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก.....	50
4.16 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก.....	53
4.17 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิในการแช่ต่างๆ.....	53
4.18 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกที่เวลาในการแช่ต่างๆ.....	53
4.19 ผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละการแตกหักของการทำข้าวหนึ่งแต่ละวิธี.....	54
4.20 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของการทำข้าวหนึ่งแต่ละวิธี.....	54
4.21 ผลการเปรียบเทียบค่าความเหนียวของการทำข้าวหนึ่งแต่ละวิธี.....	55

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่.....	หน้า
2.1 ลักษณะของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105.....	4
2.2 สีของข้าวหนึ่ง.....	6
2.3 ค่าการดูดซึมน้ำของข้าวกล้องและข้าวสารในระหว่างการหุงข้าว.....	11
2.4 การขยายตัวของเม็ดแป้ง.....	12
2.5 อสัณฐานของแป้ง.....	13
2.6 โครงสร้างทางเคมีของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$	19
2.7 ลักษณะของน้ำปูนใสที่เริ่มตกตะกอน.....	19
2.8 โครงสร้างทางเคมีของ NaHCO_3	20
2.9 ลักษณะของผงเบกกิ้งโซดา.....	20
2.10 กราฟแรง-เวลาในการทดสอบข้าวสวยด้วยวิธี Back extrusion.....	22
3.1 อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WNB29, Memmert	24
3.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบคลื่นอัลตราโซนิก รุ่น Sonorex digitec, Bandelin Electronic.....	24
3.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB350, Memmert	25
3.4 ตู้อบลมร้อน รุ่น UF260, Memmert	25
3.5 เครื่องวัดความชื้น Moisture Meter.....	26
3.6 เครื่องทดสอบการกะเทาะเปลือก รุ่น THU, SATAKE	26
3.7 เครื่องทดสอบการขัดขาว รุ่น TM05, SATAKE	27
3.8 เครื่องทดสอบการคัดขนาดของเมล็ดข้าว รุ่น TWSB, Japan	27
3.9 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล รุ่น TA HD Plus, Stable Micro System	28
3.10 แผนการทดลอง.....	29
3.11 การหุงข้าว.....	30
3.12 การตั้งค่าเพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธี Back extrusion.....	31
3.13 การคำนวณแบบ RICE BE.....	32
3.14 แผนผังการตัดสินใจ.....	33
4.1 ร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติ.....	35
4.2 ความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติ.....	36
4.3 ความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติ.....	37

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

ภาพที่.....	หน้า
4.4 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในกระบวนการแช่.....	40
4.5 ความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่	41
4.6 ความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน กระบวนการแช่.....	42
4.7 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน กระบวนการแช่.....	45
4.8 ความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่	47
4.9 ความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน กระบวนการแช่.....	47
4.10 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก.....	50
4.11 ความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก.....	52
4.12 ความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก.....	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้าวเป็นอาหารพื้นฐานที่ผู้คนมากกว่า 100 ประเทศทั่วโลกนิยมรับประทาน [1] เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ได้จากคาร์โบไฮเดรต รวมไปถึงสารอาหารที่จำเป็นเช่น วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ [2] ซึ่งก่อนที่ข้าวจะสามารถนำมารับประทานได้จะต้องผ่านกระบวนการสีข้าวที่ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆคือ การกะเทาะเปลือก การขัดขาว และการคัดขนาด ซึ่งในขั้นตอนการขัดขาวนี้เองที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณสารอาหารในข้าวเนื่องจากวิตามินและแร่ธาตุต่างๆส่วนใหญ่จะอยู่ที่ชั้นรำ วิธีการหนึ่งที่จะช่วยรักษาและลดการสูญเสียของสารอาหารต่างๆ เหล่านี้วิธีหนึ่งคือ การทำข้าวหึ่ง [3]

กระบวนการทำข้าวหึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนหลักดังนี้ การแช่ การนึ่ง และการทำแห้ง [4] โดยในแต่ละขั้นตอนจะมีกระบวนการต่างๆเกิดขึ้น ขั้นตอนการแช่จะเกิดกระบวนการแพร่ของของเหลว (น้ำ) เข้าไปในเมล็ดจนถึงสภาวะเกือบอิ่มตัว ขั้นตอนการนึ่งจะเกิดกระบวนการเจลลิตินไนซ์ของแป้ง กระบวนการรีโทรเกรเดชัน การเสียสภาพของโปรตีน และการเชื่อมต่อกันของพันธะไดซัลเฟต โดยการแพร่เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดคุณภาพคุณสมบัติสุดท้ายของข้าวหึ่ง ยกตัวอย่างเช่น สีของข้าวหึ่ง รวมถึงความแข็งของข้าวหึ่ง ซึ่งการแพร่จะเกิดขึ้นในกระบวนการแช่และกระบวนการอบแห้ง ขั้นตอนการอบแห้งเป็นกระบวนการที่นำน้ำภายในเมล็ดข้าวออก โดยเมล็ดข้าวยังคงกักเก็บสารอาหารสำคัญไว้ภายในเนื้อข้าว

ในขั้นตอนการแช่น้ำวิตามินและแร่ธาตุต่างๆที่สามารถละลายน้ำได้จะถูกพาโดยน้ำให้เคลื่อนที่จากส่วนด้านนอก (ชั้นแกลบ และชั้นรำ) ทำให้สมบัติทางสารอาหารต่างๆของเมล็ดข้าวเปลี่ยนไปหลังจากผ่านกระบวนการนึ่ง ปัจจุบันจึงได้มีการทำข้าวเสริมสารสำคัญต่างๆ โดยผ่านกระบวนการทำข้าวหึ่ง ซึ่งได้แก่ การเสริมธาตุสังกะสี [5] การเสริมสารโฟเลต [6] ข้าวเสริมคาเทชิน [7]

นอกจากสมบัติทางสารอาหารภายในเมล็ดข้าวที่เปลี่ยนไปแล้วนั้น สมบัติเชิงกลบางประการที่สนใจคือ ความแข็ง และความเหนียวของเมล็ดข้าว มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ความแข็งของข้าวหึ่งน่าจะมาจาก 2 ประเด็นใหญ่ๆ คือ การทำข้าวหึ่งเป็นการทำให้ข้าวสารมีการสุกบางส่วน (partly cooked) ดังนั้นจึงทำให้ข้าวหึ่งเมื่อนำไปหุงจะไม่สามารถดูดซับน้ำและขยายตัวได้ดีเมื่อเทียบกับข้าวปกติ อีกสาเหตุหนึ่งคือชั้นรำของเมล็ดข้าวหึ่ง เนื่องจากชั้นรำมีโครงสร้างหลักเป็นไฟเบอร์ และเมื่อเกิดการให้ความร้อนกับโครงสร้างไฟเบอร์แล้วนั้น โครงสร้างไฟเบอร์จะเกิดการหดตัวส่งผลให้เกิดความเครียดสะสมภายในโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งของเมล็ดข้าว วิธีการที่ทำให้โครงสร้างไฟเบอร์คลายตัวนั้น ได้มีการนำสารละลายต่างๆมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่นอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมสิ่งทอ

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่สอดคล้องกันได้ทดสอบกับไฟเบอร์ของพืชให้มีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยกระบวนการแช่ในสารละลายที่มีระดับความเป็นกรด-ด่างต่างกัน ส่งผลให้คุณภาพทางกายภาพของไฟเบอร์นั้นมีลักษณะเป็นตามความต้องการ [8]

นอกจากที่กล่าวข้างต้นยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงการใช้คลื่นอัลตราโซนิคร่วมกับการแช่ข้าวกล้อง ทำการวัดคุณสมบัติเชิงกลพบว่าค่าความแข็งของข้าวกล้องที่ผ่านการแช่ด้วยระบบคลื่นอัลตราโซนิคมีค่าลดลง [9] [10]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้สารละลายต่างและคลื่นอัลตราโซนิคเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งด้วยวิธีการแช่ในสารละลายต่างและใช้ระบบคลื่นอัลตราโซนิคร่วมในกระบวนการแช่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ข้าวเปลือกพันธุ์ หอมมะลิ105 จากเขตพื้นที่ ท่งกุลาร้องไห้ ปีการเก็บเกี่ยว พ.ศ. 2560 เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การทำข้าวหนึ่งจะเป็นการทำให้ข้าวที่มีคุณภาพในการสีที่ต่ำให้ดีขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มคุณค่าทางอาหารอีกทางหนึ่งด้วย แต่ข้าวหนึ่งนั้นมีความแข็งและความเหนียวทำให้ไม่เป็นที่นิยมนักงานวิจัยนี้จึงหวังว่า หากผลการทดลองเป็นไปตามวัตถุประสงค์จะสามารถช่วยลดข้อด้อยของข้าวหนึ่งด้านความแข็งและเหนียวลงเพื่อให้ผู้บริโภคหันมารับประทานข้าวหนึ่งเพิ่มขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง ถือเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของข้าวหนึ่ง ซึ่งผู้วิจัยได้รวบรวมเอกสารข้อมูลรวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อสนับสนุนการทำงาน ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อหลักๆ คือ 1) ความสำคัญของข้าว 2) การปรับปรุงคุณภาพข้าวโดยการทำข้าวหนึ่ง 3) สารละลายต่างกับการทำให้เส้นใยอ่อนตัว 4) การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิคในกระบวนการแช่ข้าว และ 5) สมบัติเชิงกลบางประการของข้าว โดยรายละเอียดของข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอธิบายดังนี้

2.1 ความสำคัญของข้าว

ข้าวเป็นธัญพืชสำคัญที่สุดในด้านโภชนาการและการได้รับแคลอรีของมนุษย์ คิดเป็นพลังงานกว่าหนึ่งในห้าที่มนุษย์ทั่วโลกบริโภค [11] สำหรับประเทศไทยพบว่ามีปริมาณการบริโภคข้าวที่สูง โดยข้าวที่คนไทยนิยมรับประทานคือข้าวหอมมะลิ [12] ข้าวมีโครงสร้างเป็นชั้นๆ ห่อหุ้มกันไว้ ซึ่งมีโครงสร้างหลักๆ ประกอบไปด้วย ชั้นแกลบ ชั้นรำ และชั้นเมล็ดข้าว จึงทำให้ข้าวต้องผ่านขั้นตอนการแปรรูปข้าวเปลือกหรือการสีข้าวก่อนนำมารับประทาน ซึ่งการสีข้าวประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ ดังนี้คือ

1. การกะเทาะเปลือก คือการกะเทาะเปลือกเพื่อแยกแกลบออกจากเมล็ดข้าวโดยข้าวที่ได้ในขั้นตอนนี้คือ ข้าวกล้องดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งข้าวกล้องประกอบด้วยชั้นรำที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวไว้ ชั้นรำของข้าวนั้นมีโครงสร้างหลักเป็นโครงสร้างไฟเบอร์จึงทำให้ข้าวกล้องมีปริมาณไฟเบอร์มากกว่าข้าวขาวถึง 3 เท่า [13]

2. การขัดขาว คือการขัดเอาชั้นรำของข้าวกล้องออกซึ่งมีลักษณะเป็นสีน้ำตาล เพื่อให้ได้ข้าวขาวหรือข้าวสารที่สามารถนำไปหุงรับประทานได้ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ซึ่งหลังจากข้าวผ่านกระบวนการสีข้าวแล้วพบว่าค่าปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของข้าวมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 [14]

ตารางที่ 2.1 ปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของข้าว (มิลลิกรัม) [15]

ส่วนของข้าว	วิตามินบี 1	วิตามินบี 2	วิตามินบี 3	วิตามินอี	แคลเซียม	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม	เหล็ก	สังกะสี
ข้าวเปลือก	0.26-0.33	0.06-0.11	2.9-5.6	0.90-2.00	10-80	0.17-0.39	0.18-0.21	1.4-6.0	1.7-3.1
ข้าวกล้อง	0.29-0.61	0.04-0.14	3.5-5.3	0.90-2.50	10-50	0.17-0.43	0.13-0.27	0.2-5.2	0.6-2.8
ข้าวสาร	0.02-0.11	0.02-0.06	1.3-2.4	0.075-0.30	10-30	0.08-0.15	0.02-0.07	0.2-2.8	0.6-2.3
รำข้าว	1.20-2.40	0.18-0.43	26.7-49.9	2.60-13.3	30-120	1.1-2.5	0.9-2.2	8.6-43.0	4.3-25.8
แกลบ	0.09-0.21	0.05-0.07	1.6-4.2	0	60-130	0.03-0.07	0	3.9-9.5	0.9-4.0

จากตาราง 2.1 แสดงให้เห็นว่า รำเป็นแหล่งของวิตามิน และแร่ธาตุที่ดีที่สุด รองลงมาคือข้าวกล้อง และข้าวสารตามลำดับ จึงควรนำรำมาทำประโยชน์เพื่อเป็นอาหารมนุษย์มากกว่าอาหารสัตว์ หรือควรบริโภคข้าวกล้องที่มีคุณค่าทางอาหารมากกว่าข้าวสาร

สำหรับข้าวที่มีคุณภาพในการสีต่ำเมื่อผ่านกระบวนการสี นอกจากจะมีปริมาณวิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ ลดลงแล้วยังส่งผลต่อปริมาณข้าวต้นและข้าวหัก กล่าวคือข้าวที่มีคุณภาพในการสีต่ำเมื่อผ่านกระบวนการสีแล้วจะได้ปริมาณข้าวหักที่สูง ข้าวชนิดนี้จึงไม่นิยมนำมาบริโภคโดยตรงหรือมักถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ แทน

อย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าข้าวที่จะนำมารับประทานได้จำเป็นต้องผ่านกระบวนการสีข้าว ซึ่งเป็นปัจจัยหลักและสำคัญปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการลดลงของปริมาณวิตามินและแร่ธาตุของข้าว รวมถึงส่งผลต่อปริมาณข้าวหักที่สูงสำหรับข้าวที่มีคุณภาพในการสีต่ำ วิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดปริมาณการสูญเสียหรือช่วยกักเก็บปริมาณสารอาหารเหล่านั้น และยังช่วยปรับปรุงคุณภาพในการสีให้สูงขึ้นวิธีหนึ่งคือ การทำข้าวหนึ่ง ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2

2.2 การปรับปรุงคุณภาพข้าวโดยการทำข้าวหนึ่ง

ข้าวหนึ่ง หมายถึง ข้าวที่ผ่านการทำให้สุกด้วยกระบวนการให้ความร้อน โดยนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำทำให้น้ำซึมเข้าสู่เมล็ดจนอิมตัว ทำการนึ่งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำ เพื่อทำให้เนื้อที่มีเปลือกหุ้มสุกบางส่วนโดยเฉพาะที่ผิวรอบนอกของเมล็ด แล้วทำข้าวเปลือกหนึ่งให้แห้ง จนมีความชื้นใกล้เคียงกับข้าวเปลือกธรรมดาคือประมาณ 14% เพื่อจะทำให้ได้เมล็ดข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระบวนการแปรรูปข้าวหนึ่งจึงมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพข้าวเปลือกธรรมดาโดยเฉพาะข้าวเปลือกที่มีคุณภาพในการสีตำหรือข้าวเปลือกเปียกเป็นข้าวเปลือกหนึ่ง แล้วทำแห้งแล้วสีเป็นข้าวสารหนึ่ง เพื่อลดปริมาณข้าวหักระหว่างสี เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่นวิตามินบี และแร่ธาตุอื่นๆ บางชนิด ซึมเข้าสู่เนื้อเมล็ดข้าวพร้อมกับน้ำที่เข้าไปในเมล็ดขณะแช่ข้าวเปลือกในน้ำ [16]

กระบวนการแปรรูปให้ได้ข้าวหนึ่งที่มีคุณภาพดี ถึงแม้ว่าจะใช้ข้าวเปลือกที่ให้คุณภาพการสีตำหรือข้าวเปลือกเปียก หรือข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง แต่ยังคงจำเป็นต้องเลือกลักษณะข้าวเปลือกที่เหมาะสมโดยคำนึงถึงลักษณะเปลือกหุ้มแข็งที่หุ้มเมล็ดข้าวอย่างสมบูรณ์ไม่มีรอยแมลงกัดกิน หรือเกิดเชื้อรา มีสีของเปลือกและชั้นเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นในสีอ่อน ไม่มีขนติด ไม่เป็นข้าวเปลือกอ่อน เมล็ดลีบ ดังนั้นกระบวนการแปรรูปข้าวหนึ่ง จึงเริ่มจากกระบวนการทำความสะอาดข้าวเปลือก การคัดแยกข้าวเปลือก แล้วนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำ ต้มหรือนึ่ง การทำแห้ง การสีข้าวเปลือกหนึ่ง การแยกสีข้าวหนึ่งที่เข้มออกจากสีปกติ และการบรรจุ ตลอดจนการเก็บรักษาในถังเพื่อรอการจำหน่ายต่อไป รายละเอียดจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้ [17]

การทำความสะอาด จุดประสงค์เพื่อการแยกสิ่งเจือปนออกจากข้าวเปลือก เช่น เศษหญ้า เมล็ดพืชอื่น กรวด ดิน หวาย ตลอดจนลักษณะข้าวเปลือกที่ไม่เหมาะสมโดยใช้เครื่องทำความสะอาด เช่นเดียวกับที่ใช้ในการทำความสะอาดข้าวเปลือกธรรมดา แต่เพิ่มเครื่องทำความสะอาดแบบวิธีลอยน้ำเพื่อแยก กรวด ดิน หวาย และข้าวเปลือกที่มีลักษณะไม่เหมาะสม เช่น ข้าวที่มีลักษณะท้องไข่มาก เนื่องจากข้าวแบบนี้จะมีน้ำหนักที่เบาและจะลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ จึงทำให้สามารถคัดแยกได้โดยง่าย

การคัดแยกข้าวเปลือก จุดประสงค์เพื่อการคัดแยกขนาดข้าวเปลือกให้มีความหนาของเมล็ดสม่ำเสมอ โดยใช้วิธีการแยกด้วยระบบความถ่วงจำเพาะของข้าวเปลือก จะทำให้ได้ข้าวเปลือกที่มีเมล็ดสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลดีต่อสีของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการสี

การแช่ข้าวเปลือก จุดประสงค์เพื่อให้ น้ำที่แช่ซึมผ่านเปลือกเข้าสู่เนื้อในเมล็ดจนอิมตัว แต่ไม่ทำให้เปลือกนอกริบแตกออกจากกัน ความชื้นของข้าวหนึ่งจะเพิ่มขึ้นจนถึงที่ประมาณ 30 % ความชื้นฐานเปียก อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ประมาณ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลาทีไนเซชันของแป้ง เพื่อป้องกันการพองตัวมากเกินไปจนทำให้เปลือกข้าวที่

หุ้มเมล็ดข้าวปรีอกจากกันก่อนการนึ่ง ดังนั้นอุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ รวมไปถึงความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำที่ใช้ในการแช่มีผลต่อสี (ภาพที่ 2.2) กลิ่น และรสชาติของข้าวนึ่ง ซึ่งอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าสีของข้าวนึ่งโดยตรงคือสีของข้าวนึ่งจะเข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิน้ำที่ใช้แช่ข้าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่การแช่ไม่ควรใช้อุณหภูมิเกิน 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการแช่ควรมากกว่า 3 ชั่วโมง แต่ไม่ควรเกิน 5 ชั่วโมง [18] ความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ระดับประมาณ 5 จะให้ข้าวนึ่งสีอ่อน หากความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นสีของข้าวนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน กลิ่นและรสชาตินั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการแช่ เนื่องจากเวลาในการแช่มีผลต่อการย่อยสลายสารอาหารต่างๆที่มีในเมล็ดข้าว ยกตัวอย่างเช่น เอนไซม์อะไมเลสจะย่อยสลายสตาร์ชทำให้ได้น้ำตาลมอลโทสและกลูโคสมากขึ้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และน้ำจะช่วยให้การสลายพันธะโปรตีนชนิดแอลบิวมินและเกิดกรดอะมิโนหลายชนิด กรดอะมิโนที่มีธาตุซัลเฟอร์ในองค์ประกอบเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารซัลไฟด์อินทรีย์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ซึ่งสามารถรวมตัวกับสารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนินในชั้นเปลือกแข็งที่หุ้มเมล็ดข้าว กลายเป็นสารประกอบที่ให้กลิ่น ซึ่งให้กลิ่นรสเฉพาะของข้าวนึ่ง แต่หากเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวนึ่งเกิน 8 ชั่วโมง จะทำให้เกิดกลิ่นหมักที่เกิดจากแบคทีเรียในน้ำที่แช่ ส่งผลให้เกิดกลิ่นที่ผู้บริโภคบางกลุ่มไม่ชอบ จึงเป็นสาเหตุที่ต้องพัฒนาระบบการทำข้าวนึ่งโดยการควบคุมอุณหภูมิและเวลาให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดกลิ่น และสีที่ไม่พึงประสงค์ [19] [20]



ข้าวนึ่งสีอ่อน

ข้าวนึ่งสีเข้ม

ภาพที่ 2.2 สีของข้าวนึ่ง [21]

การนึ่งด้วยไอน้ำ จุดประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณข้าวเต็มเมล็ดหลังกระบวนการสี และยังช่วยในการเก็บรักษาและเพิ่มคุณภาพในการกินของข้าวนึ่ง เนื่องจากการนึ่งด้วยไอน้ำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเมล็ดข้าวเปลือกดังนี้

- 1) ความชื้นในข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นจากการควบแน่นของไอน้ำที่ผ่านเข้าไปกระทบข้าวเปลือก
- 2) สารอาหารที่ละลายน้ำได้จะกระจายภายในเมล็ดข้าวเปลือก
- 3) เกิดการเจลาทีไนซ์ของเม็ดสตาร์ชเนื่องจากความร้อน
- 4) การเกิดเจลาทีไนซ์ของเม็ดสตาร์ชทำให้รอยร้าวในเมล็ดประสานเชื่อมต่อกัน ทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวแน่น
- 5) เปลือกชั้นในที่หุ้มเมล็ด จะอ่อนตัวและติดแน่นกับเนื้อเมล็ดทำให้แยกออกได้ยากในขั้นตอนการสีข้าว
- 6) ข้าวเปลือกหนึ่งสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น เนื่องจากความร้อนสามารถทำลายสปอร์เชื้อรา ไข่แมลงและตัวอ่อนของแมลง และยังเป็นการหยุดการงอกของข้าวเปลือก

ขั้นตอนการนึ่งด้วยไอน้ำมีผลต่อคุณภาพของข้าวหนึ่งหลังจากการสี ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพของข้าวหนึ่งที่สำคัญคือ ปริมาณน้ำที่ข้าวเปลือกดูดซับไว้จากขั้นตอนการแช่น้ำ เวลาและอุณหภูมิในการนึ่ง รวมไปถึงความดันของไอน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- 1) *ข้าวหนึ่งสมบูรณ์ (fully parboiled rice)* คือ ข้าวหนึ่งที่เกิดการเจลาทีไนซ์อย่างสมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ดโดยเฉพาะใจกลางของเมล็ด
- 2) *ข้าวหนึ่งบางส่วน (partially or surface parboiled rice)* คือ ข้าวหนึ่งที่เกิดการเจลาทีไนซ์เฉพาะผิวนอกของเมล็ด ทำให้ใจกลางของเมล็ดมีสีขุ่นเนื่องจากยังไม่เกิดการเจลาทีไนซ์
- 3) *ข้าวหนึ่งสีอ่อน (light parboiled rice)* คือข้าวหนึ่งที่ผ่านการทำด้วยอุณหภูมิต่ำและเวลาที่สั้น
- 4) *ข้าวหนึ่งสีเข้ม (dark parboiled rice)* คือข้าวที่ผ่านการทำด้วยอุณหภูมิสูงและเวลานาน

การทำแห้ง จุดประสงค์เพื่อลดความชื้นในข้าวเปลือกที่ผ่านการนึ่งให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการสี สำหรับข้าวเปลือกหนึ่งซึ่งมีความชื้นและเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากข้าวเปลือก คือมีความชื้นที่สูงและลักษณะของเนื้อแป้งมีลักษณะเนื้อที่แน่นทำให้ในช่วงแรกของการอบแห้งอาจจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 100 องศาเซลเซียส จนความชื้นมีค่าประมาณ 16%wb และควรหยุดพักการให้ความร้อนเพื่อป้องกันเมล็ดเกิดรอยร้าวและแตกหักในขั้นตอนการสีข้าวเป็นเวลา 2-48 ชั่วโมง

การปรับสภาพ จุดประสงค์เพื่อพักข้าวเปลือกหนึ่งหลังจากผ่านกระบวนการทำแห้ง เพื่อให้อุณหภูมิและความชื้นเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเมล็ด และเวลาที่พักควรมากกว่า 48 ชั่วโมง โดยความชื้นที่เหมาะสมก่อนนำไปสีอยู่ที่ประมาณ 12-14%wb

การสีข้าวเปลือก เป็นการกะเทาะชั้นเปลือกแข็งที่หุ้มเมล็ดออกและทำการขัดขาวข้าวกล้อง หนึ่งจนได้มาเป็นข้าวสารหนึ่ง โดยขั้นตอนในการสีของข้าวหนึ่งมีขั้นตอนที่ไม่แตกต่างกันกับขั้นตอนการสี ข้าวปกติ เนื่องจากข้าวหนึ่งได้ผ่านกระบวนการต่างๆมาแล้วจึงทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดที่สูงขึ้นจน เกือบถึง 100% เมื่อเทียบกับข้าวปกติ

การคัดแยกสีข้าวสารหนึ่ง จุดประสงค์เพื่อแยกสีของข้าวหนึ่งที่มีสีคล้ำเกินไปหรือมีสีอื่นนอกจาก สีข้าวหนึ่งปกติ โดยสีของข้าวหนึ่งปกติจะมีสีนวลออกเหลืองหรือสีฟางข้าว ในปัจจุบันมีการใช้เครื่องคัด แยกสีอัตโนมัติ โดยใช้หลักการโฟโตอิเล็กทริกซึ่งทำงานเนื่องจากความเข้มของแสงที่สะท้อนเมื่อเมล็ด ข้าวผ่านแสง ทำให้เมล็ดข้าวสีปกติ และสีคล้ำแตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำให้ระบบสามารถแยกข้าวสี คล้ำออกจากข้าวสีปกติได้

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของ ข้าวในระหว่างกระบวนการทำข้าวหนึ่งนั้นคือ การแพร่ของน้ำหรือสารประกอบต่างๆที่อยู่ในน้ำทั้งใน ขั้นตอนการแช่ข้าวเปลือก ขั้นตอนการอบแห้ง รวมไปถึงขั้นตอนการหุงข้าว นอกจากการแพร่ของน้ำ แล้ว ยังมีเรื่องของเกิดการเกิดเจลลาโนสของแป้ง การสลายพันธะของโปรตีนเนื่องจากอุณหภูมิและเวลา และยังมีของการเกิดเรโทรเกรเดชันหลังกระบวนการให้ความร้อนด้วย รายละเอียดอธิบายดังต่อไปนี้ [22]

การแพร่ (Diffusion)

การแพร่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในการทำข้าวหนึ่งเป็นปกติ คุณสมบัติการแพร่ของข้าวขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของเมล็ดข้าว องค์ประกอบ กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว อุณหภูมิ และปริมาณ ความชื้น ส่วนต่อไปนี้จะพูดถึงโครงสร้างของเมล็ด, โครงสร้างทางจุลภาค, องค์ประกอบและการเปลี่ยน สถานะคล้ายแก้ว

1) การเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและสภาพการแพร่ (Glass transition and diffusivity)

เม็ดสตาร์ชหรือแป้งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว จะมีความสามารถในการขยายตัว ความถ่วงจำเพาะ และสภาพการแพร่ที่ต่ำ ในทางกลับกัน แป้งที่มี อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะมีลักษณะคล้ายยาง มีความสามารถในการ ขยายตัว ความถ่วงจำเพาะ และสภาพการแพร่ที่สูง การเปลี่ยนทางกายภาพนี้เป็นผลมาจากค่า ความชื้นสัมพัทธ์ของเมล็ดข้าวกล่าวคือความชื้นเพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะ ลดลง แป้งที่ผ่านการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วในระหว่างการอบแห้งมีบทบาทที่สำคัญในการกำหนด ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด ซึ่งการที่แป้งเปลี่ยนเป็นสถานะคล้ายแก้วจะสามารถลดปริมาณการแตกหักของ เมล็ดข้าวได้ ในขั้นตอนการแช่ข้าวอัตราการแพร่ของน้ำเข้าในเมล็ดหรือไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม

อุณหภูมิในการแช่ เมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิเจลลิตินของแป้งการดูดซึมของน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดขึ้นได้สำหรับส่วนประกอบอื่นๆที่สามารถละลายน้ำได้เช่น การแพร่เข้าและออกของเม็ดสีและแร่ธาตุอาหาร

อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของข้าวเปลือกหนึ่งอยู่ที่ประมาณ 20 องศาเซลเซียสหรืออาจน้อยกว่าขึ้นอยู่กับ การสลายตัวทางความร้อนของแป้งทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง การอบแห้งข้าวหนึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วจะทำให้การอบแห้งเร็วขึ้นเพราะจะมีแป้งเพิ่มมากขึ้นและน้ำสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นทำให้อัตราการแพร่สูงขึ้น เมื่อแป้งในเมล็ดข้าวมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว จะทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็ก และน้ำเคลื่อนที่ออกมาได้ยากทำให้มีความชื้นสะสมจึงต้องทำการอบลดความชื้นหลายครั้ง

2) รูปแบบการแพร่ (Diffusion models)

การเคลื่อนที่ของน้ำภายในเมล็ดข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่เข้าในระหว่างกระบวนการแช่ ความสามารถในการแพร่นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดข้าว รวมไปถึงส่วนประกอบต่างๆภายในเมล็ด ซึ่งปัจจัยหลักสำหรับการแพร่ในเมล็ดข้าวคืออุณหภูมิ

ในกระบวนการแช่และการอบแห้ง ความชื้นจะเคลื่อนที่เข้าและออกจากเมล็ดเป็นเรื่องปกติ โดยจะเป็นการเคลื่อนที่ระหว่างผิวภายนอกและภายในเมล็ด

ไฮเดรชัน (Hydration)

อุปสรรคของการนำน้ำเข้าไปมาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมล็ดข้าวและองค์ประกอบของเอนโดสเปิร์มในส่วนที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

1) โครงสร้างเมล็ด (Grain structure)

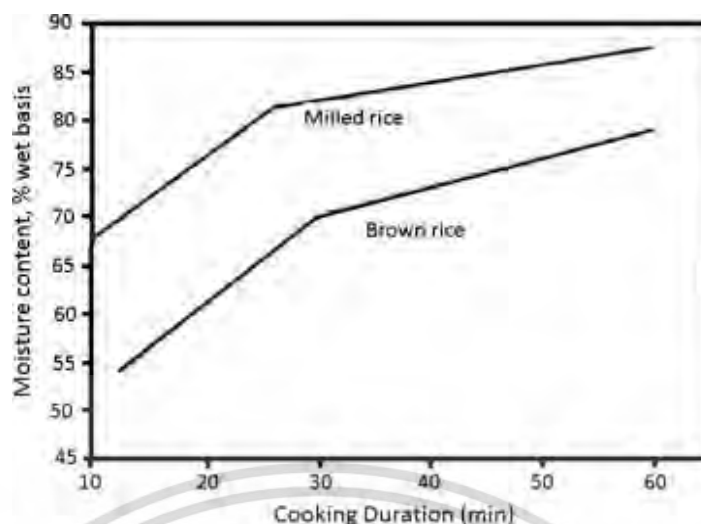
- สัดส่วนของเมล็ด (Grain dimensions) อัตราการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของเมล็ด ถึงแม้จะอยู่ในสภาวะเดียวกันเช่น ปลูกที่เดียวกัน พันธุ์เดียวกัน ขนาดของเมล็ดก็มีผลทำให้อัตราการแพร่ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิยังคงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออัตราการแพร่ดังแสดงในตารางที่ 2.2

- ชั้นแกลบ (Husk layer) เมล็ดข้าวเปลือกมีลักษณะเป็นการห่อหุ้มเป็นชั้นๆ ซึ่งประกอบด้วย แกลบ(ชั้นนอก) รำ (ชั้นกลาง) และเนื้อแป้ง (ชั้นใน) ซึ่งทั้ง3ชั้นนี้มีความแตกต่างกันของคุณสมบัติทางวัสดุและด้วยเหตุผลนี้ทำให้อัตราการแพร่ที่แตกต่างกัน ลักษณะของแกลบ เช่น ความหนา ความหนาแน่นของเปลือกนอกแผ่นใหญ่ ความหนาแน่นของเปลือกนอกแผ่นเล็ก ขนาดของรูพรุน และความเข้มข้นของซิลิกา อาจจะเป็นปัจจัยสำคัญในการแพร่ของน้ำ

ตารางที่ 2.2 ค่าความสามารถในการแพร่ของน้ำ

กระบวนการ	ความหลากหลายของเมล็ด	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความสามารถในการแพร่ ($\times 10^{-11}$ ตารางเมตรต่อวินาที)
ไฮเดรชัน	ข้าวเมล็ดยาว	25	1.78
	ข้าวเมล็ดยาว	35	1.78
	ข้าวเมล็ดยาว	45	2.08
	ข้าวเมล็ดยาว	55	2.59
	ข้าวเมล็ดยาว	60	4.1
	ข้าวเมล็ดยาว	65	7.2
	ข้าวเมล็ดยาว	75	7.17
	ข้าวเมล็ดยาว	80	7.34
	ข้าวเมล็ดยาว	90	9.36
	ดีไฮเดรชัน	ข้าวเมล็ดสั้น	43
ข้าวเมล็ดยาว		43	3.2
ข้าวนี้่ng banki		60	28
ข้าวนี้่ng de gold		60	57
ข้าวนี้่ng liberia		60	38

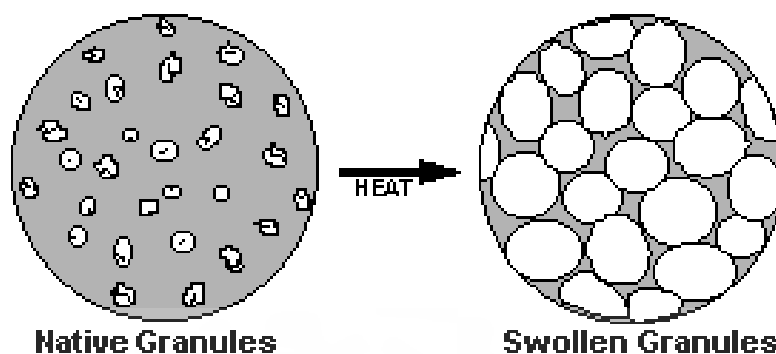
- ชั้นรำ (Bran layer) จากภาพที่ 2.3 พบว่าข้าวกล้องดูดซับน้ำได้น้อยกว่าข้าวสารในระหว่างการหุงต้ม โดยการศึกษาได้อ้างถึงชั้นรำ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นบางๆที่เคลือบด้วยขี้ผึ้งซึ่งเป็นตัวกีดขวางสำหรับการแพร่เข้าไปของน้ำในเมล็ดข้าว รำข้าวยังอุดมไปด้วยโปรตีนและนอกจากนี้ยังจำกัดการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปยังเมล็ดข้าวชั้นรำยังมีหนังกำพร้าที่มีไขมันสูง และมีพื้นผิวโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของน้ำ



ภาพที่ 2.3 ค่าการดูดซึมน้ำของข้าวกล้องและข้าวสารในระหว่างการหุงข้าว [22]

2) โครงสร้างจุลภาคของเมล็ดข้าว (Kernel microstructure)

โครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดข้าว เช่น เม็ดแป้ง รูพรุน และรอยแตกที่อยู่ในชั้นเนื้อข้าว ส่งผลกระทบต่อกระบวนการแพร่ การแพร่ของน้ำในระบบพอลิเมอร์มีความสัมพันธ์กับรูพรุนของโมเลกุลในโครงสร้างของพอลิเมอร์และความสัมพันธ์ทางพอลิเมอร์ของน้ำ จำนวนของรูพรุนขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางจุลภาคของพอลิเมอร์แป้ง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และความหนาแน่นของพันธะนอกจากรูพรุนแล้ว เมล็ดข้าวยังมีรอยแตกในเนื้อข้าวรวมไปถึงปริมาตรช่องว่างในเนื้อข้าว รอยแตกเกิดจากความเครียดของความชื้นในระหว่างก่อนการเก็บเกี่ยวหรือหลังการเก็บเกี่ยว รูพรุนและรอยแตกเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นช่องทางผ่านของน้ำที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่สำหรับระบบที่มีพอลิเมอร์แบบซับซ้อน และมีปริมาตรว่างที่สร้างขึ้นภายในวัสดุ (เนื่องจากผลของรูพรุนและรอยแตก) มีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการแพร่เพราะการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของพอลิเมอร์เนื่องจากการขยายตัวของความชื้นอย่างมีนัยสำคัญน้อยกว่าปริมาณการดูดซึมน้ำความชื้น นี้แสดงให้เห็นว่าการขยายตัวส่วนใหญ่มาจากการดูดซึมน้ำที่ขึ้นอยู่กับช่องว่างในเมล็ด (รูพรุนและรอยแตก) ความหนาแน่นจริงของเมล็ดข้าวเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแช่เป็น 40 องศาเซลเซียสแต่ก็ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแช่เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส สามารถสรุปได้ว่าจากผลของความหนาแน่นที่แท้จริงของเมล็ดเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิ่งที่ไนซ์ เพราะว่าได้รับมวลแต่ปริมาตรไม่ได้ขยายตัวมากดังแสดงในภาพที่ 2.4 ในระหว่างการไฮเดรชันของพอลิเมอร์ในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว น้ำที่เข้าไปครั้งแรกในรูพรุนและรอยแตกก่อนที่ปริมาตรของเมล็ดจะขยายตัว จำนวนของรูพรุนและรอยแตกจะช่วยให้การแพร่ของน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อผ่านอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว เม็ดแป้งจะขยายตัวและปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญมากกว่ามวลจึงช่วยลดความหนาแน่นของเมล็ดดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าสำหรับพอลิเมอร์ของแป้งยังมีปริมาตรที่ว่างเนื่องจากรอยแตกและโครงสร้างทางจุลภาคของแป้ง ที่ยังมีบทบาทที่โดดเด่นต่อการแพร่ก่อนที่แป้งจะเกิดการเจลลิ่งที่ไนซ์เช่นกัน



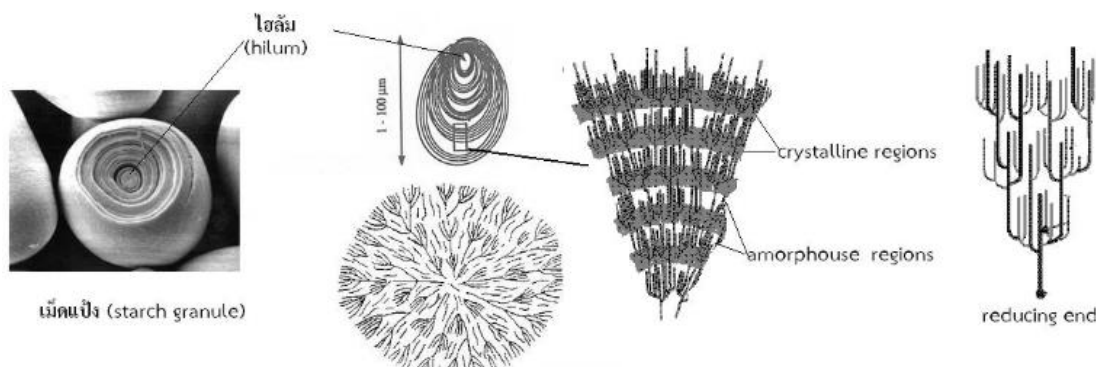
ภาพที่ 2.4 การขยายตัวของเม็ดแป้ง [23]

3) ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว (Composition)

- ลิพิด (Lipids) ลิพิดในข้าวสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ ลิพิดที่เป็นแป้ง และลิพิดที่ไม่เป็นแป้ง ลิพิดที่ไม่เป็นแป้งสะสมอยู่ในข้าวกล้องประมาณ 2.9-3.4%db และลิพิดที่เป็นแป้งมีประมาณ 0.66-0.76%db ในเมล็ดข้าวในชั้นแอลิวโรน และคัพพะ มีการสะสมของลิพิดที่ใช่แป้งถึง 60% ลิพิดที่สำคัญมักพบในชั้นรำซึ่งจะอยู่ในรูปหยดไขมันเล็กๆ ลิพิดที่อยู่ในรูปแป้งมีระดับความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ และส่วนใหญ่เป็นอไมโลสแบบซับซ้อน ข้าวที่ไม่ได้ผ่านการขัดมันจะมีปริมาณของอไมโลสที่สูงมากกว่า ลิพิดที่เป็นแป้ง และลิพิดที่ไม่ใช่แป้งรวมทั้งข้าวที่ผ่านการขัดมัน อุปสรรคของการแพร่เข้าไปของน้ำตามธรรมชาติ คือ ลิพิด การศึกษาเกี่ยวกับชั้นรำของธัญพืช(ข้าวสาลี,ข้าว,บาร์เลย์และข้าวโอ๊ต) พบว่ารำข้าวที่มีชั้นไขมันน้อยจะสามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่า

- โปรตีน (Proteins) โปรตีนพบมากที่สุดที่ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าวและในชั้นรำ พื้นผิวโปรตีนอาจจะมีบทบาทในการควบคุมการแพร่ของน้ำในเนื้อแป้งและควบคุมการขยายตัวเนื่องจากการเกิดกระบวนการเจลลิ่ง เพราะการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโปรตีนจะช้ากว่าแป้งเล็กน้อย และด้วยเหตุผลนี้ทำให้มีการดูดซึมน้ำสูงกว่าแป้ง ดังนั้นโปรตีนจึงเป็นตัวดูดซับน้ำที่สำคัญ จากการศึกษาพบว่าข้าวที่มีโปรตีนสูงจะต้องใช้ปริมาณน้ำมากและใช้เวลานานในการปรุงอาหาร การเข้าไปของน้ำผ่านโปรตีนได้เร็วกว่าแป้งซึ่งนำไปสู่บทสรุปทั่วไปที่ว่าโปรตีนมีสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำสูงกว่าแป้ง

- เม็ดสตาร์ชหรือแป้ง (Starch) แป้งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน บางพื้นที่ของแป้งเป็นพื้นที่ที่มีการจัดเรียงรูปร่างไม่แน่นอนหรืออสัณฐานดังแสดงในภาพที่ 2.5 ทำให้มีโครงสร้างที่อ่อนแอต่อปฏิกิริยาทางเคมี เพราะพื้นที่เหล่านั้นสามารถขยายตัวได้มากในกระบวนการไฮเดรชัน การกระจายตัวของเม็ดสตาร์ชและพื้นที่ที่เป็นอสัณฐานของแป้งสามารถกำหนดปัจจัยการแพร่ของน้ำในเม็ดแป้งได้



ภาพที่ 2.5 อณูฐานของแป้ง [24]

ดีไฮเดรชัน (Dehydration)

ดีไฮเดรชันเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการทำข้าวหนึ่งหลังจากแป้งในเนื้อข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ในระหว่างการแช่ และการให้ความร้อนในกระบวนการทำข้าวหนึ่ง การทำแห้งควรให้ความชื้นอยู่ในช่วง 12%wb เพื่อที่จะให้เหมาะสมสำหรับขั้นตอนต่อไปหรือการเก็บรักษา รูปแบบการอบแห้งของเมล็ดที่ผ่านการเจลาติไนซ์จะแตกต่างจากเมล็ดที่ไม่ผ่านการเจลาติไนซ์ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ แป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์จะเกิดการขยายตัวเมื่ออบแห้งอย่างรวดเร็ว จะทำให้น้ำที่อยู่ในช่องว่างหรือรอยแตกออกมาทำให้มีอัตราการแพร่ที่สูงขึ้น ทำให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดน้อย อย่างไรก็ตามเพื่อรักษาและปรับปรุงให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดเพิ่มมากขึ้นจะเห็นได้ว่าขั้นตอนการอบแห้งข้าวหนึ่งจึงมีความสำคัญความสามารถในการแพร่ของน้ำ ความสามารถในการแพร่ของน้ำในแป้งที่เจลาติไนซ์น้อยกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการเจลาติไนซ์ แต่ในกรณีของข้าวเปลือกที่มีรอยปริของเปลือก ส่งผลให้การนำความชื้นออกเป็นไปได้ง่ายขึ้น

รีไฮเดรชัน (Rehydration)

เมล็ดข้าวที่แห้งจะดูดซับน้ำได้น้อยกว่าข้าวหนึ่งที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิเจลาติไนซ์ของข้าว เมล็ดข้าวสารจะดูดซับน้ำได้มากกว่าข้าวหนึ่ง ความผิดปกติทางคุณสมบัติของการไฮเดรชันในเมล็ดข้าวที่ได้รับการอธิบายจากคุณสมบัติการแพร่ของน้ำในแป้ง ถูกควบคุมโดยขอบเขตการเจลาติไนซ์ของแป้งและ รีโทรเกรเดชัน รวมทั้งระดับของรูพรุน และรอยแยกที่อยู่ในเมล็ดข้าว อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการคืนตัวจากการแช่แข็งข้าวหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าระดับการเกิดเจลาติไนซ์สูงขึ้นและอัตราการคืนตัวก็จะเพิ่มตาม แสดงให้เห็นว่าไม่เพียงแต่ขอบเขตการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งแล้วยังมีโครงสร้างทางจุลภาคของเมล็ดที่มีผลต่อการคืนตัวของข้าวหนึ่ง

การเจลาติไนซ์และรีโทรเกรเดชันของแป้ง (Starch gelatinisation and retrogradation)

ข้าวหนึ่งเป็นผลผลิตที่เกิดจากการให้ความร้อนแก่แป้งที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์หลังจากการไฮเดรชันหรือการไฮเดรชันในน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ การเจลาติไนซ์และรีโทรเกรเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในแป้งข้าวที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำข้าวหนึ่ง ในระหว่างกระบวนการรีโทรเกรเดชันของแป้งทำให้เกิดความหลากหลายของเนื้อสัมผัสในการนำข้าวหนึ่งมาประกอบอาหาร ในระหว่างการเกิดเจลาติไนซ์ของเม็ดแป้งจะเกิดการขยายตัว และเกิดการเปลี่ยนแปลงของแป้งขึ้นเป็นผลให้คุณสมบัติทางแสง เช่นค่า light polarisation หรือ iodine colouration ของแป้งเปลี่ยนไปและแป้งบางประเภทภายในเมล็ดหายไปเนื่องจากการแตกของเม็ดแป้งที่ผนังเซลล์ โดยแป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์อย่างเต็มที่ จะกลายเป็นมวลหนืด ซึ่งจะจำกัดความสามารถในการดูดน้ำเนื่องจากกระบวนการแพร่ทำให้ไม่สามารถเอาชนะความต้านทานของแป้งที่มีความหนืดสูงได้ แป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์ยังมีผลกระทบต่อพฤติกรรมกรเข้าไของน้ำในข้าวเปลือกเนื่องจากการแช่ที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิต่ำและสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์มีอัตราการเกิดไฮเดรชันที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยการเพิ่มของความชื้นอย่างช้าๆ เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงจุดที่มีความชื้นสมดุลจะเกิดการอิมมิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์อัตราการเกิดไฮเดรชันก็จะสูงขึ้นนำไปสู่การแตกของเมล็ดแป้ง และการเสีรูปของแป้ง

จากปัจจัยต่างๆที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหนึ่งจะสังเกตได้ว่าปัจจัยหลักๆของแต่ละปัจจัยเกิดจากกระบวนการแพร่ทั้งสิ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพดังนี้

คุณสมบัติทางเคมีของข้าวหนึ่ง (Chemical properties of parboiled rice)

กระบวนการทำข้าวหนึ่งทำให้เมล็ดข้าวที่ได้มีโปรตีน ลิพิด และปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้น การที่องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันเนื่องจากกระบวนการทำข้าวหนึ่งที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นผลิตภัณฑ์ข้าวหนึ่งที่แช่ที่อุณหภูมิสูงก็จะมีปริมาณลิพิดที่น้อย ปริมาณวิตามินบี แต่แป้งจะสลายออกไป ในขณะที่เวลาในการนึ่งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณโปรตีน แคลเซียม เหล็กและโซเดียมลดลง แต่ ปริมาณไขมัน เถ้า และปริมาณเส้นใยในข้าวหนึ่งเพิ่มขึ้น องค์ประกอบทางเคมีที่ระดับโมเลกุลมีอิทธิพลต่อลักษณะการหุงต้มข้าวหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ องค์ประกอบทางเคมีหลักๆ ที่จะอธิบายมีดังนี้

1) สตาร์ชหรือแป้ง (Starch)

เนื่องจากการเกิดกระบวนการเจลาติไนซ์เซชันระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนหรือกระบวนการทำให้สุก ทำให้เกิดการขยายตัวของแป้งอย่างถาวรในข้าวหนึ่ง นอกจากนี้เมื่อผ่าน

กระบวนการให้ความร้อนแบ่งจะสลายตัวทำให้น้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา และอุณหภูมิ ร่วมกันในกระบวนการทำข้าวหนึ่ง เวลาและอุณหภูมิในการทำข้าวหนึ่งที่แตกต่างกันส่งผลต่อการ สลายตัวของแป้งอย่างมีนัยสำคัญ

2) โปรตีน (Proteins)

โปรตีนและกรดอะมิโนทั้งหมดของข้าวหนึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าลักษณะทางกายภาพ ของเมล็ดมีการฉีกขาดในระหว่างการทำข้าวหนึ่ง โปรตีนจะถูกย่อยนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพันธะได ซัลไฟด์ซึ่งจะเพิ่มความเหนียวและความแข็งในข้าว

3) ลิพิด (Lipids)

ในระหว่างการทำข้าวหนึ่งตัวของไขมันหรือ สเตอโรลของลิพิดที่ไม่ใช่แป้งจะแตกและไขมัน จะออกจากพื้นผิวของเมล็ดข้าว ไขมันพวกนี้จะกระจายตัวออกไปและด้วยเหตุผลนี้ทำให้ชั้นรำของ ข้าวหนึ่งมีความมันวาว ในขณะที่เมล็ดข้าวหนึ่งหลังจากกระบวนการสีจะมีไขมันน้อยกว่าข้าวกล้อง

4) วิตามินและแร่ธาตุ (Vitamins and minerals)

จากการศึกษาพบว่าข้าวหนึ่งมีวิตามินบีโดยเฉพาะวิตามินบีหนึ่งและกรดไนโคตินิกมากกว่า ข้าวสาร แม้จะมีความจริงที่ว่าวิตามินทั้งสองหายไปในระหว่างการทำข้าวหนึ่งการให้ความร้อนใน ขั้นตอนการแช่และนี้ ข้าวหนึ่งยังคงมีวิตามินมากกว่าข้าวสารเนื่องจากข้าวสารสูญเสียวิตามินเหล่านี้ไป ในกระบวนการขัดขาว จากการศึกษพบว่าปริมาณวิตามินบีในข้าวหนึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆในขั้นตอนการ แช่ที่อุณหภูมิในการแช่ 30 องศาเซลเซียสและหนึ่งที่เวลา 4 นาทีจนถึงอุณหภูมิการแช่ที่ 70 องศา เซลเซียสและหนึ่งที่ 12 นาทีและวิตามินบีจะเพิ่มอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิในการแช่ 90 องศาเซลเซียส และหนึ่งที่เวลา 12 นาที ปริมาณวิตามินบีจะเพิ่มขึ้นในขั้นตอนการให้ความร้อนนั่นคือการแช่และการ ึ่ง การสูญเสียของวิตามินเอและซีพบหลังจากกระบวนการทำหนึ่งซึ่งเกี่ยวข้องกับอิทธิพลของอุณหภูมิ เหตุผลของการเพิ่มของระดับวิตามินบีแม้จะมีการสูญเสียในบางส่วนนั้นเนื่องมาจากวิตามินจากชั้นรำ จะแพร่เข้าไปในเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการทำข้าวหนึ่ง แต่จากการศึกษาก่อนหน้านี้โดย Rao and Bhattacharya (1966) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของระดับของวิตามินบีไม่ได้เกิดขึ้นในระหว่าง การแช่แต่มันเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการหนึ่งได้ถูกตั้งสมมติฐานว่าการเกิดกระบวนการเจลลาที่ไนซ์จะ ทำให้เป็นการป้องกันการสูญเสียของวิตามินเหล่านี้ได้

คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหนึ่ง (Physical properties of parboiled rice)

ในระหว่างกระบวนการทางความร้อน คุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหนึ่งบางประการเกิดการ เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะอธิบายดังนี้

1) สัดส่วนของเมล็ด (Grain dimensions)

การแพร่ของน้ำควบคู่ไปกับกระบวนการให้ความร้อนทำให้เกิดการขยายตัวของเมล็ดแป้ง และด้วยเหตุนี้ทำให้ข้าวหนึ่งมีความหนาที่มากกว่าและสั้นกว่าข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการทำข้าวหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงนี้ถูกตั้งข้อสังเกตในกระบวนการทำข้าวหนึ่งภายใต้ระบบน้ำส่วนเกิน แต่ไม่ได้ใช้ในการกำจัดระบบน้ำเช่นการทำแห้ง และกระบวนการทำข้าวหนึ่งโดยใช้ความดัน

2) ข้าวท้องไข่ (Chalk)

แถบสีขาวทึบแสงที่เห็นบนท้องของข้าวสารหรือลักษณะท้องไข่เป็นผลมาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ที่มีความแตกต่างกันของเมล็ดแป้ง ข้าวท้องไข่ที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะที่ไม่พึงประสงค์อย่างมากในพันธุ์ข้าวทุกชนิดยกเว้นข้าวอาโบริโอ และ ข้าวสาเกเนื่องจากการบรรจุกันอย่างหลวมๆของเมล็ดแป้งทำให้มีปริมาตรว่างภายในเมล็ดข้าวทำให้สามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นกว่าชนิดปกติ การแพร่และกระบวนการเจลลาไทไนซ์ในระหว่างการทำข้าวหนึ่งเป็นการนำเอาช่องว่างนี้ออกและช่วยลดการเกิดข้าวท้องไข่ เพื่อให้ข้าวหนึ่งสามารถเพิ่มความดึงดูดใจในผลิตภัณฑ์ได้

3) สีของข้าวหนึ่ง (Colour)

สีของข้าวหนึ่งแตกต่างจากข้าวปกติ โดยที่ข้าวหนึ่งจะมีสีที่ค่อนข้างเหลือง เนื่องจากการแพร่ของสีจากกลีบเข้าไปในเนื้อข้าว สาเหตุอีกประการหนึ่งจากการศึกษาระดับที่เพิ่มขึ้น ของการลดระดับน้ำตาลและ free α -amino nitrogen (FAN) และการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสเป็นน้ำตาลฟรักโทส มีความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ของการเกิดสีน้ำตาลสำหรับการเปลี่ยนแปลงสีในข้าวหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงสีในข้าวหนึ่งเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการแช่ และเพิ่มระยะเวลาในการแช่ เช่นเดียวกับการเพิ่มความดันไอน้ำของเมล็ด การดูดซึมสีของกลีบยังมีค่าสูงที่อุณหภูมิการแช่สูง และการดูดซึมสีของวัสดุจากน้ำที่ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อความขาวของเมล็ดข้าว

4) คุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง (Mechanical properties)

อุณหภูมิของการทำข้าวหนึ่งและระยะเวลาเป็นอิทธิพลสำคัญต่อความแข็งของเมล็ดข้าว ความแข็งของข้าวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของน้ำในการแช่เพิ่มขึ้น และความแข็งของข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ ข้าวหนึ่งยังมีแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสของความยืดหยุ่นของเมล็ดข้าวที่เพิ่มขึ้นจากข้าวปกติ ค่าความแข็งแรงเหล่านี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะเวลาการแช่และระดับการเกิดเจลลาไทไนซ์ของแป้ง การเพิ่มขึ้นของความแข็งอาจจะเป็นเหตุผลที่ว่าทำไมการแตกหักของข้าวหนึ่งจึงลดลง เมื่อผ่านกระบวนการสีและทำไมข้าวหนึ่งจึงมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสมากกว่าข้าวปกติเมื่อนำไปหุงต้ม กล่าวคือ ข้าวหนึ่งที่หุงสุกจะมีลักษณะที่แข็งและร่วนมากกว่าข้าวปกติ

จากคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวหนึ่งที่เปลี่ยนไป พบว่ามีทั้งข้อดี คือกระบวนการทำข้าวหนึ่งสามารถลดการสูญเสียข้าวหรือเป็นการลดจำนวนข้าวที่ไม่พึงประสงค์เช่น ข้าวท้องไข่ แต่ก็มีข้อเสียที่

สำคัญคือด้านคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งหลังการหุงสุก พบว่ามีค่าความแข็งที่สูงกว่าข้าวปกติ อีกทั้งยังมีความร่วนที่มาก คือเมล็ดข้าวมีลักษณะที่ไม่ติดกันเป็นกลุ่มทำให้ไม่เกิดความนิยมนำมารับประทาน ซึ่งแนวทางที่ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลนี้จะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป โดยเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารละลายต่าง และระบบคลื่นอัลตราโซนิกในการปรับปรุงนี้

2.3 สารละลายต่างกับการทำให้เส้นใยอ่อนตัว

สารละลายต่างหรือสารละลายเบส (base solution) คือ สารละลายที่เบสละลายในน้ำ (เบสเป็นตัวละลาย น้ำเป็นตัวทำละลาย) ซึ่งสามารถแตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เมื่อละลายน้ำ [25] สารละลายต่างถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย อย่างในอุตสาหกรรมเหล็กก็มีการนำสารละลายต่างมาใช้ในขั้นตอนการทำความสะอาดคราบไขมันต่างๆ ในอุตสาหกรรมอาหารก็ถูกนำมาใช้เช่นกันแต่ใช้ในจุดประสงค์ที่แตกต่างกัน เนื่องจากสารละลายเบสมีความหลากหลายทางด้านการทำปฏิกิริยากับวัสดุต่างๆ แต่ที่ให้ความสนใจในกรณีศึกษานี้คือผลของสารละลายเบสที่มีผลต่อความแข็งแรงโครงสร้างไฟเบอร์ของพืช เนื่องจากข้าวที่ผ่านกระบวนการทำข้าวหนึ่งนั้นจะมีชั้นรำของข้าวที่มีโครงสร้างเป็นโครงสร้างไฟเบอร์ที่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวหนึ่ง

จากการศึกษาทางานวิจัยพบว่า มีงานวิจัยที่น่าสนใจซึ่งมีส่วนหนึ่งของการศึกษาเป็นการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของไฟเบอร์ที่ได้จากสับปะรด+โพลีโพรพิลีน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงของไฟเบอร์จากสับปะรดที่ผ่านการแช่ในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเป็นด่างสูง (pH13) มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 [26]

ตารางที่ 2.3 ค่าความแข็งแรงแรงบิดและค่ามอดูลัสแรงบิดของไฟเบอร์จากสับปะรดและโพลีโพรพิลีน

ไฟเบอร์ (vol%)	ไฟเบอร์ดิบ+โพลีโพรพิลีน		ไฟเบอร์ที่แช่ในด่าง+โพลีโพรพิลีน	
	ความแข็งแรงแรงบิด (MPa)	มอดูลัสแรงบิด (MPa)	ความแข็งแรงแรงบิด (MPa)	มอดูลัสแรงบิด (MPa)
0	38.00±0.3036	1650±2.549	38.00±0.3036	1650±2.549
5	38.93±0.1999	1673±2.000	22.33±0.5011	1142±3.125
10	41.62±0.3922	1760±3.162	11.88±0.6289	1210±2.341
15	39.95±0.2197	1703±2.915	11.82±0.4033	901±2.156
20	39.10±0.2286	1651±2.236	-	-

ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งแรงแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของไฟเบอร์จากสับปะรดและโพลีพรพิลีน

ไฟเบอร์ (vol%)	ไฟเบอร์ดิบ+โพลีพรพิลีน		ไฟเบอร์ที่แช่ในต่าง+โพลีพรพิลีน	
	ความแข็งแรงแรงดึง	มอดูลัสแรงดึง	ความแข็งแรงแรงดึง	มอดูลัสแรงดึง
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0	24.50±0.2145	560±4.472	24.50±0.2145	560±4.472
5	24.96±0.1029	652±3.162	6.91±0.3241	527±4195
10	26.95±0.2621	690±4.000	14.70±0.2436	513±4.125
15	29.92±0.2197	695±3.240	8.47±0.4625	521±5.624
20	31.54±0.2286	707±1.581	-	-

จากตารางผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่า ค่าความแข็งแรงของไฟเบอร์+โพลีพรพิลีนมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนของไฟเบอร์มีค่ามากขึ้น นั่นสื่อให้เห็นว่าค่าความเป็นต่างนั้นมีผลต่อค่าความแข็งแรงของไฟเบอร์

นอกจากงานวิจัยนี้ยังมีอีกหนึ่งงานวิจัยที่กล่าวถึงค่าความแข็งแรงของไฟเบอร์จากไม้ที่ผ่านการแช่ในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ด่างต่างกัน โดยใช้ระบบคลื่นอัลตราโซนิกช่วยพบว่า ค่าความแข็งแรงของไฟเบอร์นั้นๆลดลงเมื่อนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้ในการแช่ดังแสดงในตารางที่ 2.5 [27]

ตารางที่ 2.5 ค่าความแข็งแรงแรงดึงและมอดูลัสยืดหยุ่นของไฟเบอร์จากไม้

สารที่ใช้	วิธีการแช่	ความแข็งแรงแรงดึง	มอดูลัสยืดหยุ่น
HNO+KClO	อัลตราโซนิก	1.32(0.32)	34.4(0.20)
	ปกติ	1.32(0.32)	30.9(0.22)
NaClO	อัลตราโซนิก	1.16(0.19)	30.5(0.18)
	ปกติ	1.30(0.23)	42.0(0.32)
HO+Hac	อัลตราโซนิก	1.34(0.18)	30.2(0.22)
	ปกติ	1.78(0.15)	26.8(0.06)
NaOH	อัลตราโซนิก	1.45(0.36)	19.6(0.36)
	ปกติ	1.52(0.30)	18.3(0.18)

จากงานวิจัยนี้พบว่าระบบคลีนอัลตราโซนิคมีส่วนช่วยทำให้ความแข็งแรงของไฟเบอร์จากไผ่มีค่าลดลงเมื่อนำไปแช่ในสารละลายที่มีความเป็นกรด-ด่างต่างกันเมื่อเทียบกับการแช่แบบปกติแสดงให้เห็นว่านอกจากสารละลายต่างที่มีส่วนช่วยในการลดความแข็งแรงของไฟเบอร์แล้ว ระบบคลีนอัลตราโซนิคยังมีส่วนในการช่วยอีกด้วย ซึ่งระบบคลีนอัลตราโซนิคจะอธิบายในหัวข้อถัดไป แต่ก่อนอื่นจะมากล่าวถึงสารละลายเบส 2 ชนิดที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารนั่นคือ น้ำปูนใส และเบกิ้งโซดา

น้ำปูนใส [28]

น้ำปูนใส คือ สารละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.6 หรือสารละลายของปูนขาว (CaO) ที่ได้จากการเผาหินปูนหรือเปลือกหอย จนได้ของแข็งที่เป็นผงหรือเกร็ดสีขาวขุ่นที่เรียกว่า ปูนขาว หลังจากนั้น นำผงปูนขาวมาละลายในน้ำหรือนำผงปูนขาวมาผสมกับขมิ้นจนได้ปูนแดงแล้วนำมาละลายน้ำ ซึ่งจะเรียกสารละลายนี้ว่า น้ำปูนขาวหรือน้ำปูนแดง หลังจากนั้น ตั้งทิ้งไว้ให้ผงปูนตกตะกอน จนน้ำส่วนบนใส เรียกสารละลายส่วนบนนี้ว่าน้ำปูนใส (ภาพที่ 2.7) น้ำปูนใสเป็นคำเรียกที่นิยมใช้สำหรับประโยชน์ทางด้านอาหารเป็นหลัก น้ำปูนใสนั้นจะมีค่า pH ประมาณ 13



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ Ca(OH)_2 [29]

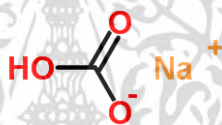


ภาพที่ 2.7 ลักษณะของน้ำปูนใสที่เริ่มตกตะกอน

โดยส่วนมากแล้วน้ำปูนใสจะถูกนำมาใช้ในการแช่ผักและผลไม้ เพื่อทำความสะอาดหรือบางครั้งอาจจะใช้ในการแปรรูปผลไม้เช่น การทำผลไม้แช่อิ่มเพื่อให้ผลไม้ที่ได้มีรูปร่างที่ไม่น่าเหี่ยวหลังจากการแปรรูป

เบกกิ้งโซดา [30]

เบกกิ้งโซดา (Baking Soda) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium Bicarbonate, NaHCO_3) มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2.8 หรือที่เราเรียกกันง่ายๆ ว่า โซดา ทำขนม โดยเบกกิ้งโซดานั้นเป็นเพียงส่วนประกอบที่อยู่ในผงฟู แต่ไม่ใช่ผงฟู มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว (ภาพที่ 2.9) มีรสเค็มคล้ายโซเดียมคาร์บอเนต เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและกรดอ่อนๆ ที่ได้มาจากส่วนผสมต่างๆ ก็จะทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นมา เบกกิ้งโซดาจึงถูกใช้เป็นส่วนผสมในผงฟู ดังนั้นเมื่อนำผงฟูผสมเข้ากับขนมปังแล้วเข้าเตาอบ ขนมปังจะมีลักษณะฟูขึ้น เนื่องจากผงฟูเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวได้น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อใส่เบกกิ้งโซดาในปริมาณที่มากเกินไป ขนมปังจะมีรสชาติเฝื่อนไม่น่ารับประทาน โดยส่วนมากแล้วเบกกิ้งโซดามักถูกใช้ในการทำความสะอาดผัก และผลไม้เพื่อลดปริมาณสารเคมีตกค้าง แต่ก็มีผู้บริโภคบางกลุ่มนำไปใช้สำหรับการเสริมความงาม



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของ NaHCO_3 [31]



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของผงเบกกิ้งโซดา [32]

2.4 การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแช่ข้าว

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ต ซึ่งสูงเกินกว่าที่มนุษย์ได้ยิน คลื่นอัลตราโซนิกมีคุณสมบัติที่เหมือนกันกับคลื่นเสียงความถี่ต่ำ แต่มีคุณสมบัติที่ต่างออกไปคือเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงและมีความยาวคลื่นที่สั้น มีการหักเหของคลื่นน้อย จึงง่ายต่อการบังคับทิศทาง

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางไม่สามารถเดินทางในสุญญากาศได้ ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกส์

คลื่นอัลตราโซนิกถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายๆด้าน เช่น ใช้ในการตรวจจับสิ่งผิดปกติหรือตรวจจับการเคลื่อนไหว [33] รวมไปถึงการตรวจสอบหาจุดบกพร่องภายในวัสดุแบบไม่ทำลาย [34] และนอกจากการนำไปใช้ประโยชน์ด้านต่างๆข้างต้นแล้วนั้น คลื่นอัลตราโซนิกยังถูกนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวกล้อง มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการแช่ข้าวกล้องเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของข้าวหลังการหุงสุกพบว่าค่าความแข็งของข้าวกล้องที่ผ่านการแช่น้ำด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าลดลงดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าคุณสมบัติเชิงกลของข้าว [9]

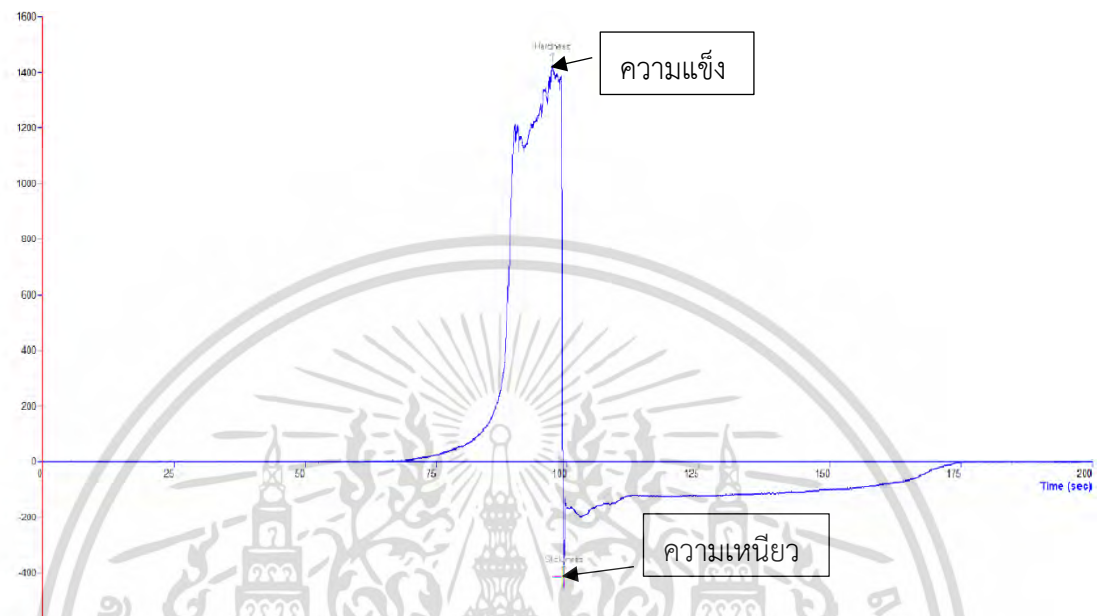
คุณสมบัติเชิงกล	ข้าวกล้อง	ข้าวกล้องแช่แบบปกติ	ข้าวกล้องแช่ด้วยอัลตราโซนิก	ข้าวขาว
ความแข็ง (g)	1192.3±0.3	1164.4±109.4	946±70.2	608.2±35.7
การยืดติด (g.sec)	-14.4±3.1	-14.0±1.192	-14.9±1.774	-33.4±5.14

นอกจากงานวิจัยนี้ ยังมีงานวิจัยอื่นที่มีการทดลองคล้ายกันแต่มีการศึกษาในเรื่องของอุณหภูมิที่แตกต่างกันเพื่อดูอิทธิพลด้านเวลาต่อค่าความแข็ง [10]

2.5 สมบัติเชิงกลบางประการของข้าว

การทดสอบสมบัติเชิงกลของข้าว เป็นการใช้เครื่องมือทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของข้าว โดยการให้แรงหรือความเค้นกระทำต่อตัวอย่างอาหาร โดยการใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะต่างๆกันทำให้เกิดแรงกระทำต่อตัวอย่างอาหารในลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น การกด (Compression) การเจาะ (Penetration หรือ Puncture) การเฉือน (Shear) การดึง (Tension) การผลักดัน (Extrusion) การยึด (Adhesion) เป็นต้น การทดสอบความแข็งและความเหนียวของข้าวถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ชี้วัดคุณภาพของข้าวอีกปัจจัยหนึ่ง โดยวิธีการวัดค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวแบบวิธีการผลักดันย้อนกลับ (Back extrusion) เป็นวิธีที่เหมาะสมแก่การวัดเนื้อของข้าวสวยสำหรับงานวิจัย โดยค่าที่ได้จากการทดสอบที่นำมาวิเคราะห์ จะพิจารณาจากกราฟแรง-เวลา หรือ กราฟแรง-ระยะทาง ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ในเชิงวัตถุวิสัยคือค่าแรงสูงสุดถึง %strain หรือระยะทาง

ที่กำหนดในการกด เปรียบเสมือนกับการเคี้ยวครั้งแรก มีหน่วยเป็นนิวตัน สำหรับค่าความเหนียว (stickiness) คือค่าแรงสูงสุดเมื่อทำการถอนหัดกดมีหน่วยเป็นนิวตัน แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 กราฟแรง-เวลาในการทดสอบข้าวสอยด้วยวิธี Back extrusion

บทที่ 3

อุปกรณ์และการดำเนินการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยการศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล (ความแข็ง และความเหนียว) ของข้าวหนึ่ง ข้าวที่นำมาใช้ในการดำเนินการทดลองนี้เป็นข้าวเปลือกพันธุ์ หอมมะลิ 105 จากเขตพื้นที่ทุ่งกุลาร้องไห้ จังหวัดสุรินทร์ ปีการเก็บเกี่ยว พ.ศ. 2560 ที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการทำข้าวหนึ่งที่ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอนคือ การแช่ การนึ่ง และการอบเพื่อลดความชื้น จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการสีเพื่อหาร้อยละการแตกหัก และทดสอบสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งต่อไป โดยรายละเอียดของขั้นตอนต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในหัวข้อต่อไปนี้จะบรรยายถึงอุปกรณ์ที่ใช้ตลอดการศึกษา โดยรายละเอียดของอุปกรณ์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. *อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WNB29, Memmert, Germany* ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งใช้ในขั้นตอนการแช่ข้าวในน้ำเปล่า สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิช่วงต่างๆที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้ทำให้เกิดการแพร่ของน้ำจากเมล็ดข้าวชั้นนอก (ชั้นรำ) สู่เมล็ดข้าวชั้นใน (เนื้อข้าว) นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้เมล็ดข้าวมีความชื้นที่สูงขึ้นโดยความชื้นของข้าวหนึ่งโดยประมาณคือ 30 เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก สำหรับอ่างควบคุมอุณหภูมินี้ถูกใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.2 และสำหรับการศึกษาเรื่องร้อยละการแตกหักและสมบัติเชิงกลซึ่งจะกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

2. *อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบคลื่นอัลตราโซนิก รุ่น Sonorex digitec, Bandelin, Germany* ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ซึ่งใช้ในขั้นตอนการแช่ข้าวในน้ำเปล่าเช่นเดียวกับอ่างควบคุมอุณหภูมิ PolyScience, USA แต่จะเป็นการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกที่ความถี่ 35 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับอ่างควบคุมอุณหภูมิกถูกใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.2 และสำหรับการศึกษาเรื่องร้อยละการแตกหักและสมบัติเชิงกลซึ่งจะกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.1 อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WNB29, Memmert



ภาพที่ 3.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบคลื่นอัลตราโซนิก รุ่น Sonorex digitec, Bandelin electronic

3. อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB350, Memmert, Germany แสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งใช้ในขั้นตอนการนึ่งข้าวที่เป็นขั้นตอนที่แบ่งโนเมล็ดข้าวเกิดการเจลาทีไนซ์เซชัน ในการทดลองทุกการทดลองในหัวข้อที่ 3.2 จะใช้อุปกรณ์นี้ เพื่อทำการศึกษาร้อยละการแตกหักและสมบัติเชิงกลซึ่งจะกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

4. ตู้อบลมร้อน รุ่น UF260, Memmert, Germany ดังแสดงในภาพที่ 3.4 ใช้สำหรับขั้นตอนการอบเพื่อลดความชื้นของเมล็ดข้าวให้มีความชื้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ ประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก อุปกรณ์นี้ถูกใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.2 ทุกการทดลองเพื่อทำการศึกษาร้อยละการแตกหักและสมบัติเชิงกลซึ่งจะกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ รุ่น WB350, Memmert



ภาพที่ 3.4 ตู้อบลมร้อน รุ่น UF260, Memmert

5. เครื่องวัดความชื้น Moisture Meter TA-5, Japan ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ใช้ในการวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเมล็ดข้าวหลังจากผ่านกระบวนการอบลดความชื้น สามารถวัดได้ทั้งข้าวเปลือกและข้าวกล้อง อุปกรณ์นี้ถูกใช้ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.2 ทุกการทดลองเพื่อทำการศึกษาเรื่องร้อยละการแตกหักและสมบัติเชิงกลซึ่งจะกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 3.5 เครื่องวัดความชื้น Moisture Meter

6. เครื่องทดสอบการกะเทาะเปลือก รุ่น THU, SATAKE HUSK TESTER, Japan ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ถูกใช้เพื่อกะเทาะเปลือกของเมล็ดข้าวก่อนนำไปขัดขาว อุปกรณ์นี้ถูกใช้ในการทดสอบและศึกษาเรื่องร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวในหัวข้อที่ 3.3



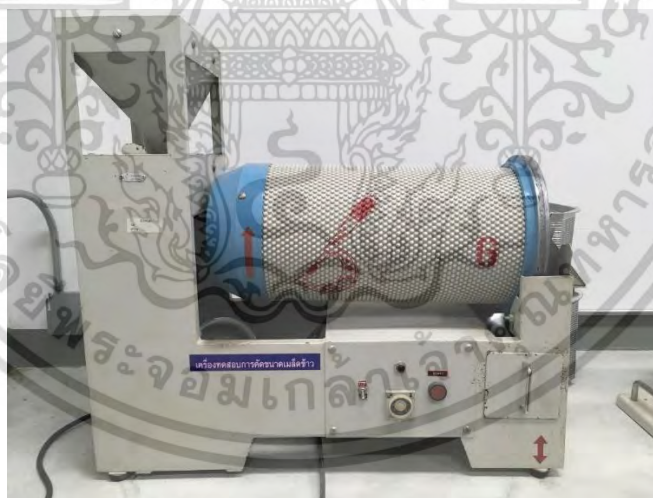
ภาพที่ 3.6 เครื่องทดสอบการกะเทาะเปลือก รุ่น THU, SATAKE

7. เครื่องทดสอบการขัดขาว รุ่น TM05, SATAKE, Japan ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ใช้เพื่อขัดข้าวขาวกล้องที่ผ่านกระบวนการสีข้าวเพื่อขจัดชั้นรำของข้าวก่อนนำข้าวขาวที่ได้ไปทำก่อนคัดขนาดในขั้นตอนต่อไป อุปกรณ์นี้ถูกใช้ในการทดสอบและศึกษาเรื่องร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวในหัวข้อที่ 3.3



ภาพที่ 3.7 เครื่องทดสอบการขัดขาว รุ่น TM05, SATAKE

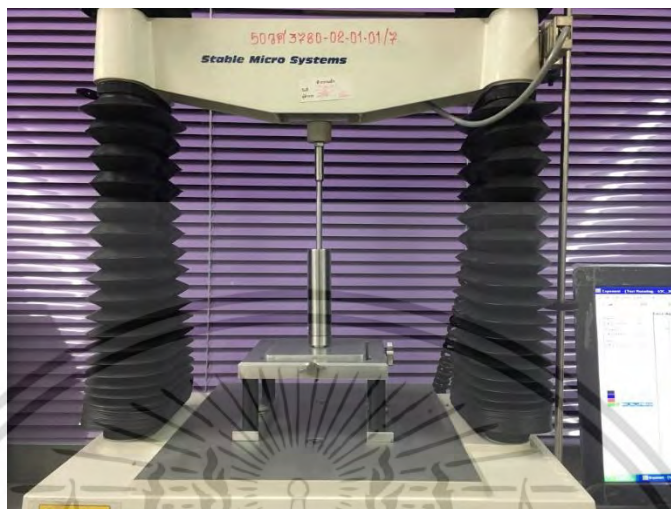
8. เครื่องทดสอบการคัดขนาดของเมล็ดข้าว รุ่น TWSB, SATAKE, Japan ดังแสดงในภาพที่ 3.8 ใช้ในการคัดขนาดของเมล็ดข้าว โดยจะทำการแยกข้าวต้นออกจากปลายข้าว เพื่อทำการศึกษาเรื่องร้อยละการแตกหักของข้าวในหัวข้อที่ 3.3 ต่อไป



ภาพที่ 3.8 เครื่องทดสอบการคัดขนาดของเมล็ดข้าว รุ่น TWSB, Japan

9. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Texture analyzer รุ่น TA HD Plus, Stable Micro System, UK ดังแสดงในภาพที่ 3.9 ใช้ในการวัดค่าสมบัติเชิงกลของข้าว โดยวิธีผลักดันย้อนกลับ (Back extrusion) เพื่อทดสอบค่าความแข็งและความเหนียวของข้าว หัวกดมีลักษณะเป็นทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.70 มิลลิเมตร และกระบอกทดสอบทรงกระบอกมีขนาดความสูง 90.17

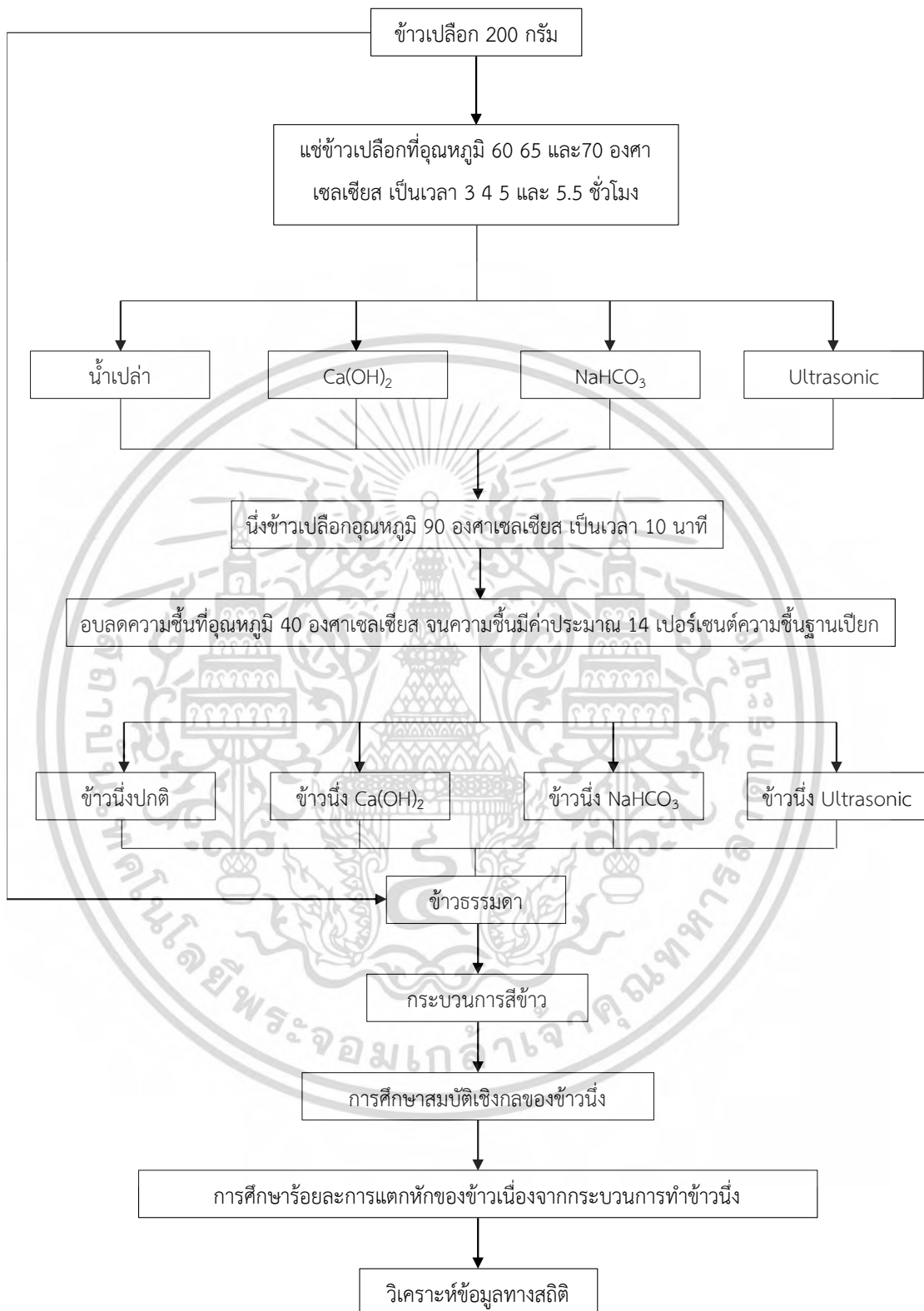
มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15.40 มิลลิเมตร ซึ่งอุปกรณ์นี้ถูกใช้เพื่อศึกษาเรื่องสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งในหัวข้อที่ 3.4



ภาพที่ 3.9 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล รุ่น TA HD Plus, Stable Micro System

3.2 แผนการทดลอง

แผนการทดลองของงานวิจัยนี้เป็นแผนการทดลองการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง โดยจะแสดงดังภาพที่ 3.10 โดยกระบวนการทำข้าวหนึ่งจะประกอบไปด้วยการทำข้าวหนึ่งโดยการแช่ข้าวในน้ำเปล่า แช่ในสารละลายต่าง 2 ชนิดคือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไบคาร์บอเนต และแช่ในน้ำเปล่าร่วมกับระบบคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาค่าร้อยละการแตกหักและค่าสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง โดยข้าวเปลือกที่ใช้ในแต่ละตัวอย่างมีขนาด 200 กรัม ทุกๆ ตัวอย่าง ในขั้นตอนการแช่จะแช่เป็นเวลา 3 4 5 และ 5.5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 65 และ 70 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิตามภาพที่ 3.1 และ 3.2 จากนั้นหนึ่งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 3.3 และทำการลดความชื้นของข้าวเปลือกให้เหลืออยู่ในเกณฑ์มาตรฐานหรือประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียก ด้วยตู้อบลมร้อนดังภาพที่ 3.4 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำข้าวเปลือกที่ได้มาเข้าสู่กระบวนการสี และวัดค่าร้อยละการแตกหักและสมบัติเชิงกลต่อไป



ภาพที่ 3.10 แผนการทดลอง

3.3 การศึกษาร้อยละการแตกหักของข้าวเนื่องจากกระบวนการทำข้าวหนึ่ง

การศึกษาร้อยละการแตกหักของข้าวเนื่องจากกระบวนการทำข้าวหนึ่ง ประกอบไปด้วยการกะเทาะเปลือกข้าวเปลือกทำให้ได้ข้าวกล้อง โดยการนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการทำข้าวหนึ่งแบบต่างๆ และข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการทำหนึ่ง มาผ่านการกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องทดสอบการกะเทาะเปลือกดังภาพที่ 3.6 โดยมีระยะห่างของลูกยางประมาณ 1 มิลลิเมตร เมื่อข้าวผ่านเครื่องทดสอบการกะเทาะเปลือกแล้วจะได้ข้าวที่เป็นข้าวกล้อง หลังจากนั้นจึงนำข้าวกล้องที่ได้ไปทำการขัดขาวด้วยเครื่องทดสอบการขัดขาวดังภาพที่ 3.7 เป็นเวลา 120 วินาที หลังจากผ่านกระบวนการขัดขาวข้าวที่ได้จะเป็นข้าวสาร หลังจากนั้นนำข้าวสารที่ได้ไปผ่านการคัดขนาดด้วยเครื่องทดสอบการคัดขนาดเมล็ดข้าวดังภาพที่ 3.8 โดยตะแกรงหลุมที่ใช้เป็นตะแกรงหลุมเบอร์ 6 การคัดขนาดจะทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหัก นำข้าวเต็มเมล็ดและข้าวหักมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง จดบันทึกค่า และคำนวณหาค่าร้อยละการแตกหักต่อไป

3.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง

การศึกษสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะทดสอบแบบ Back extrusion ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

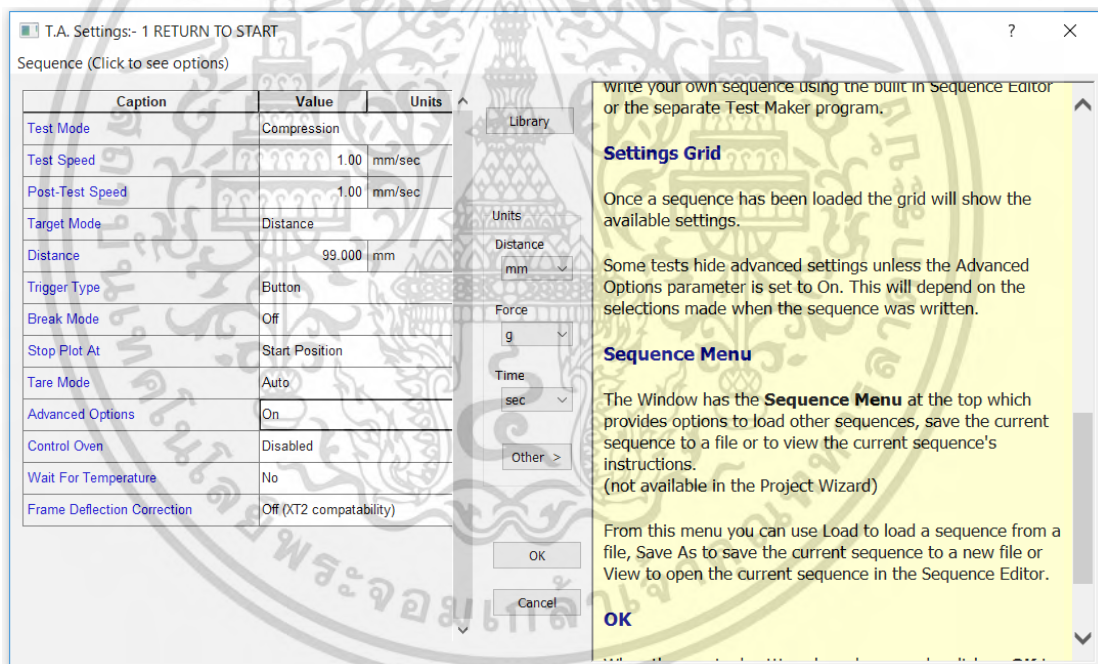
นำข้าวหนึ่งแบบต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการสีข้าวแล้วจำนวนตัวอย่างละ 10 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร และเติมน้ำลงไป 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำบีกเกอร์ที่เตรียมไว้ใส่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่ 97 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เพื่อป้องกันการสุกไม่สม่ำเสมอเนื่องจากสัดส่วนของน้ำไม่เพียงพอต่อการหุงต้ม ดังแสดงในภาพที่ 3.11



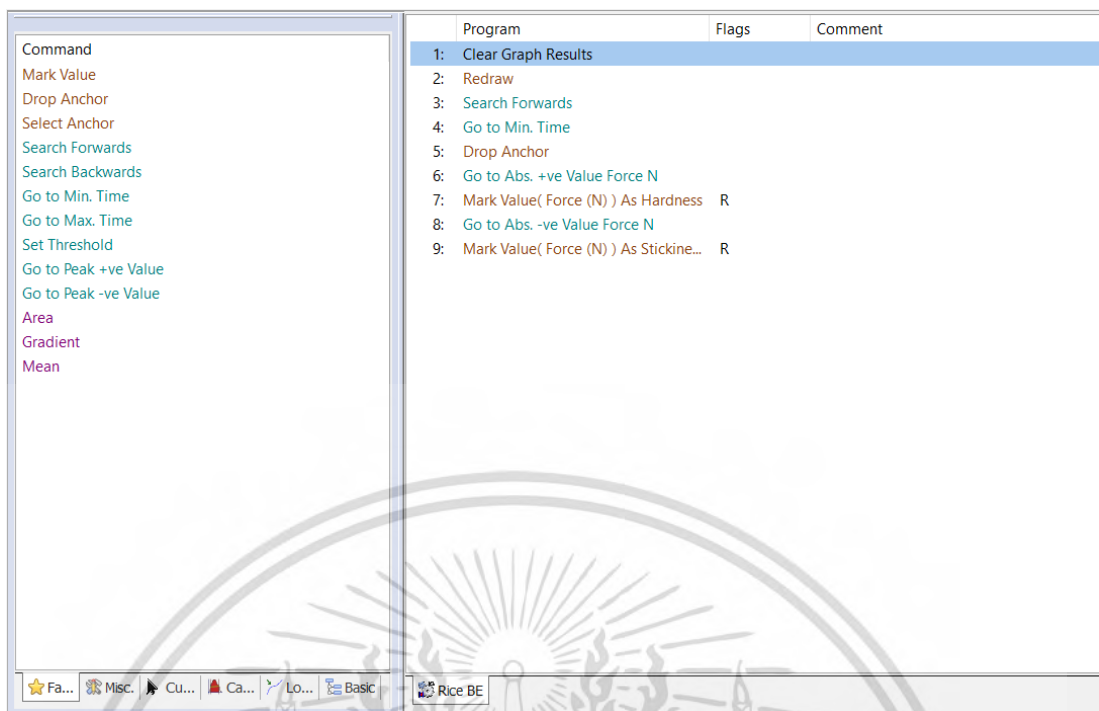
ภาพที่ 3.11 การหุงข้าว

3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Texture analyzer

ชั่งน้ำหนักแบบต่างๆ ที่ผ่านการหุงสุกแล้วจำนวน 3 กรัม ใส่ในบีกเกอร์และเก็บรักษาข้าวไว้ในกล่องโฟมเพื่อรักษาสภาพของข้าวไม่ให้เปลี่ยนแปลง เปิดเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล Texture analyzer และเปิดใช้โปรแกรม Texture Exponent version 6,1,13 เพื่อทำการ Calibration แรงและระยะทางก่อนทำการวัดค่า ประกอบหัววัดและฐานวัดแบบ Back extrusion ใช้ความเร็วในการกดและถอนหัวกดเท่ากับ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที กดที่ระยะ 99 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.12 ใส่ข้าวสุกตัวอย่างที่เตรียมไว้ลงในกระบอกสแตนเลส ทดสอบกับตัวอย่างข้าวทุกๆตัวอย่างตัวอย่างละ 5 กรัม บันทึกกราฟแรงและเวลา แล้วทำการหาค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Stickiness) โดยใช้คำสั่ง Process data > Macro > run > เลือกการคำนวณแบบ RICE BE ดังแสดงในภาพ 3.13 บันทึกค่าและผลการวิเคราะห์ โดยทำการสุ่มตัวอย่างการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design)



ภาพที่ 3.12 การตั้งค่าเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธี Back extrusion



ภาพที่ 3.13 การคำนวณแบบ RICE BE

3.5 การตัดสินใจเลือกสถานะที่เหมาะสม

การสร้างแผนการตัดสินใจ มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบแผนในการตัดสินใจเพื่อให้ง่ายเลือกสถานะที่เหมาะสมในการทำซ้ำหนึ่งในแต่ละวิธีโดยพิจารณาจากค่าสมบัติเชิงกลทั้ง 2 ค่าก่อน โดยพิจารณาจากค่าความแข็งก่อนเนื่องจากค่าความแข็งที่ได้จากการทดลองมีค่าที่แตกต่างกันชัดเจนมากกว่าค่าความเหนียวจึงทำให้ง่ายต่อการพิจารณาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดในแต่ละสถานะ โดยมีแผนผังในการตัดสินใจดังภาพที่ 3.14

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการวิเคราะห์ทางสถิติเป็น 2 ส่วนคือ 1) วิเคราะห์ค่าทางสถิติของค่าร้อยละการแตกหัก ความแข็ง และความเหนียวของซ้ำวิธีต่างๆ และ 2) วิเคราะห์ค่าทางสถิติของการเปรียบเทียบสถานะที่เหมาะสม ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

สำหรับส่วนที่ 1 มีการวางแผนการทดลองแบบ Factorial analysis in CRD โดยมีอิทธิพลจากปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเปลือกในการทำซ้ำหนึ่งในแต่ละวิธี มีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ two-way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ LSD

สำหรับส่วนที่ 2 มีการวางแผนการทดลองแบบ CRD โดยมีอิทธิพลจากปัจจัยหลักคือ วิธีในการทำข้าวหนึ่งแต่ละวิธี มีการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ one-way ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ LSD



ภาพที่ 3.14 แผนผังการตัดสินใจ (*ร้อยละการแตกหักของข้าวธรรมดาที่ไม่ผ่านกระบวนการทำข้าวหนึ่ง)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

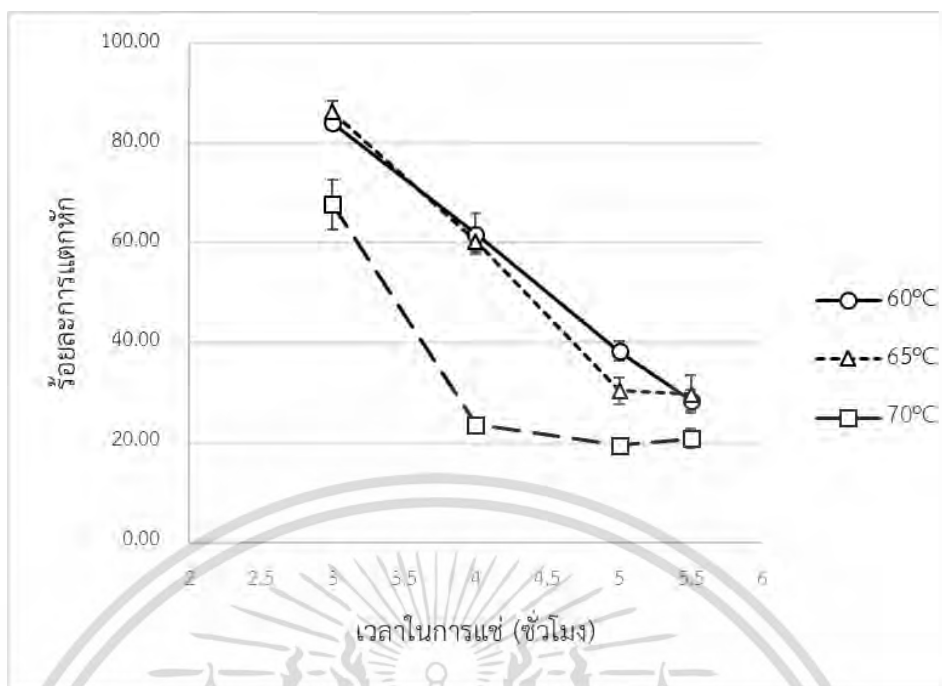
จากการศึกษาและทดลองตามแผนการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ถูกแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณีคือ การศึกษาร้อยละการแตกหักของข้าวเนื่องจากกระบวนการทำข้าวหนึ่ง และการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง โดยผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของแต่ละการทดลองเป็นการเปรียบเทียบการทดลองระหว่างการใส่สารละลายเบสทั้งสองชนิด กับการใช้คลื่นอัลตราโซนิกระหว่างกระบวนการแช่ข้าว ซึ่งรายละเอียดได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ

ผลจากการศึกษาการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ สามารถแบ่งผลการศึกษาดังนี้คือ 1) ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ 2) ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ และ 3) สภาพที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติโดยรายละเอียดจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

4.1.1 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ

ผลของค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยในภาพรวมร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการแช่นานขึ้นทั้งนี้ น่าจะเกิดจากเมื่อเวลาการแช่ข้าวที่นานขึ้นส่งผลให้เพิ่มเวลาในการที่น้ำแพร่เข้าไปในเนื้อข้าวมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อกนิษฐ์ ชุมวิสูตร [7] เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการแช่เพิ่มขึ้น พบว่าในภาพรวมการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำที่แช่มีแนวโน้มให้ร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการแช่ ความสามารถในการแพร่ของน้ำเข้าสู่เมล็ดจะเพิ่มสูงขึ้น [35] จึงน่าจะทำให้น้ำเข้าไปในเมล็ดข้าวได้มากเพียงพอที่จะส่งผลทำให้ข้าวมีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันที่สมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณาโดยละเอียดที่ระดับอุณหภูมิการแช่ข้าวต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการแช่ข้าวที่ 60 และ 65 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มการลดลงในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเวลาในการแช่ข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ข้าวให้นานขึ้นมีซึ่งค่าร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวลดลงเหลือประมาณร้อยละ 20 และมีแนวโน้มคงที่เมื่อเวลาในการแช่ข้าวมากกว่า 4 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะแนวโน้มแบบนี้ไม่เกิดขึ้นในผลการทดลองที่อุณหภูมิการแช่ข้าว 60 และ 65 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.1 ร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติมาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติ พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ปัจจัย สำหรับอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าร้อยละการแตกหักในทุกๆเวลาในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสำหรับเวลาในการแช่พบว่ามีผลต่อค่าร้อยละการแตกหักในทุกๆอุณหภูมิในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ

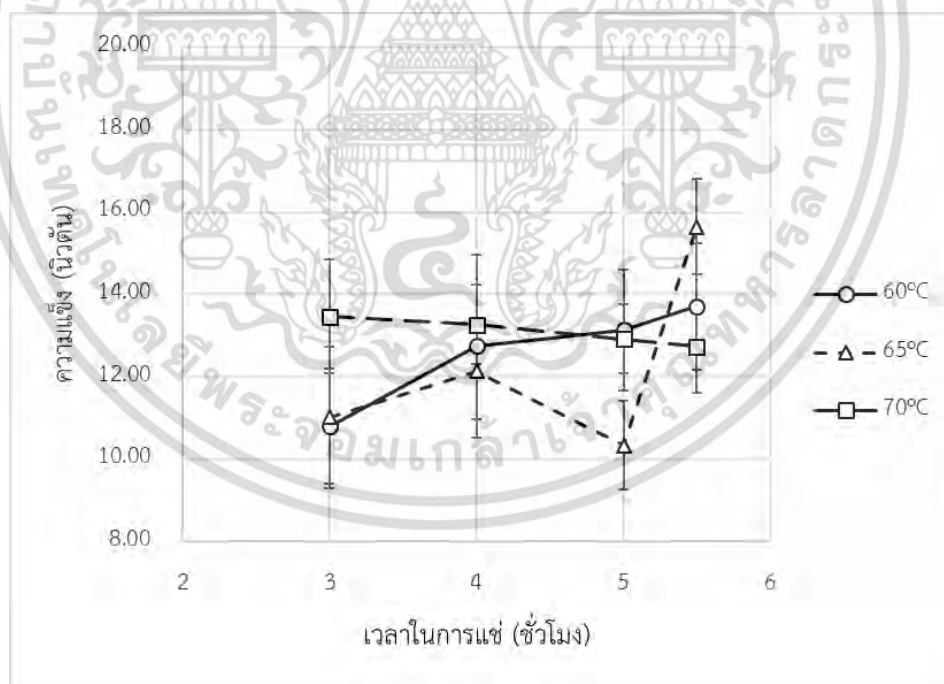
เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
3	84.17±1.48aA	86.38±2.28aA	67.86±5.03aB
4	61.87±3.97bA	60.45±2.12bA	23.58±0.81bB
5	38.37±1.95cA	30.39±2.70cB	19.52±1.18bC
5.5	28.49±2.10dA	29.70±3.75cA	20.82±1.93bB

* a, b, c, d – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

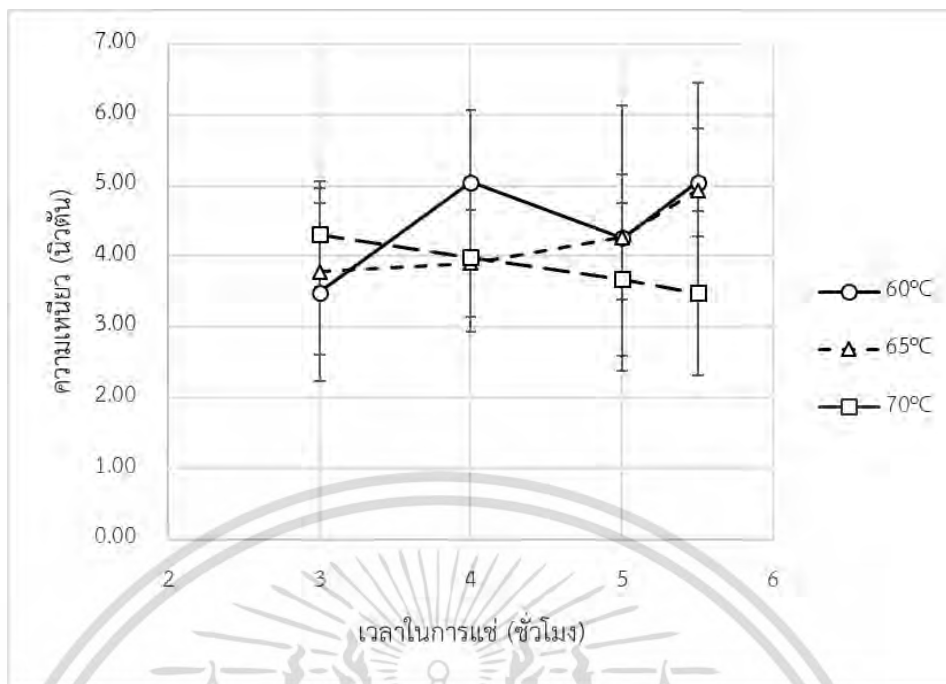
** A, B, C – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

4.1.2 ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ

ผลของค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 สำหรับค่าความแข็งพบว่าที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 60 และ 65 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ซึ่งความแข็งที่เพิ่มขึ้นมานี้ อาจเป็นผลมาจากเวลาการแช่ข้าวที่นานขึ้น ส่งผลให้เพิ่มเวลาในการที่น้ำแพร่เข้าไปในเนื้อข้าวมากขึ้น จึงน่าจะทำให้น้ำเข้าไปในเมล็ดข้าวได้มากเพียงพอที่จะส่งผลทำให้ข้าวมีแนวโน้มที่จะเกิดกระบวนการเจลาติไนเซชันที่สมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ดข้าว ซึ่งส่งผลต่อการเกิดการรีโทรเกรเดชันที่มากขึ้นจึงอาจจะส่งผลต่อค่าความแข็งของข้าวให้มีค่าสูงขึ้น ในส่วนของอุณหภูมิการแช่ที่ 70 องศาเซลเซียส ที่มีค่าความแข็งที่ค่อนข้างคงที่ทั้งนี้อาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิของน้ำที่ใช้แช่มีค่าสูงขึ้นอัตราการแพร่ของน้ำก็มีค่าสูงขึ้นซึ่งอาจจะทำให้น้ำซึมเข้าเมล็ดข้าวก่อนจะถึงเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวที่กำหนดจึงทำให้การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งไม่แตกต่างกัน สำหรับค่าความเหนียวพบว่าที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 60 และ 65 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของค่าความเหนียวที่เพิ่มขึ้นแต่สำหรับที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่อุณหภูมิในการแช่สูงขึ้นส่งผลให้แป้งเกิดการขยายตัวได้เร็วขึ้นและนานขึ้นจึงอาจจะส่งผลให้แป้งบางประเภทหายไปเนื่องจากการเสีรูปของแป้ง [36]



ภาพที่ 4.2 ความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ



ภาพที่ 4.3 ความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ

สำหรับค่าความแข็งเมื่อนำข้อมูลความแข็งของข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติมาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติ พบว่ามีปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ปัจจัย โดยอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติในทุกๆเวลาการแช่ ยกเว้นที่เวลาการแช่ที่ 4 ชั่วโมง และเวลาในการแช่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวเหนียวปกติในทุกๆอุณหภูมิในการแช่ยกเว้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.2

สำหรับค่าความเหนียวเมื่อนำข้อมูลความเหนียวของข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติมาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติ พบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 โดยค่าความเหนียวของข้าวเหนียวปกติมีค่าความความเหนียวไม่แตกต่างกันในทุกๆอุณหภูมิและเวลาในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.1.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำข้าวเหนียวปกติ

จากการตัดสินใจตามแผนผังการตัดสินใจในหัวข้อที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำข้าวเหนียวปกติ คือ ที่สภาวะการแช่ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ (นิวตัน)

เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
3	10.80±1.39bB	11.01±1.73cbB	13.46±1.37nsA
4	12.75±2.22aNS	12.13±1.16bNS	13.27±0.95nsNS
5	13.13±1.48aA	10.33±1.07cB	12.92±0.84nsA
5.5	13.71±1.54aB	15.64±1.15aA	12.74±1.12nsB

* ns – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

** NS – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

*** a, b, c – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

**** A, B – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.3 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเหนียว (นิวตัน)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
	4.46±1.36ns	4.22±1.13ns	3.86±0.99ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.4 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติที่เวลาต่างๆ

ความเหนียว (นิวตัน)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)			
	3	4	5	5.5
	3.86±1.06ns	4.31±1.03ns	4.07±1.28ns	4.49±1.33ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

4.2 ผลการศึกษา ร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่

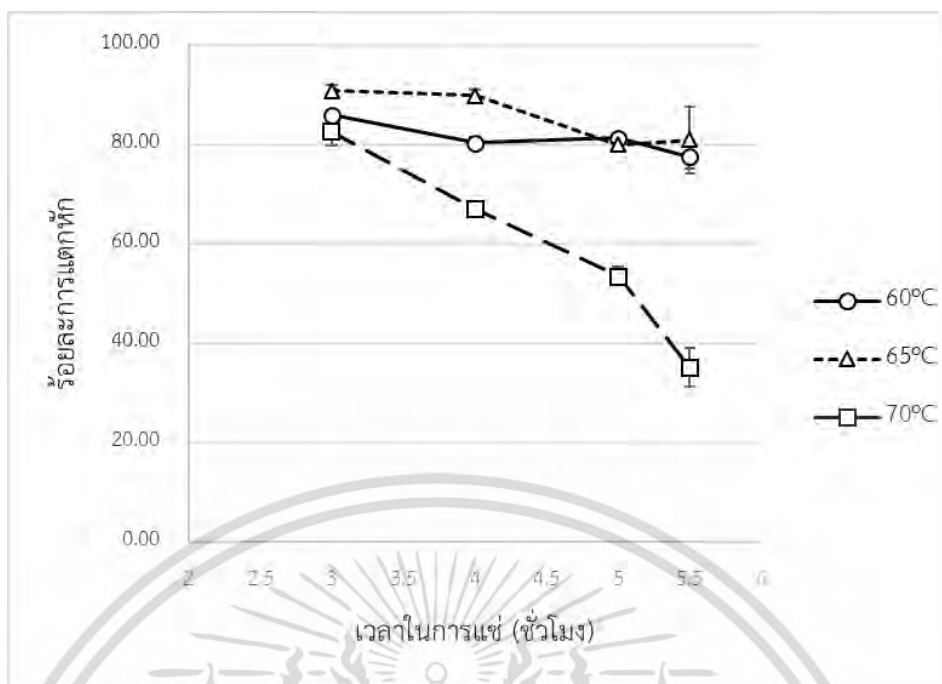
ผลจากการศึกษาการทำข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ สามารถแบ่งผลการศึกษาได้ดังนี้คือ 1) ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ใน

สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ 2) ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่ง ที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ และ 3) สภาพที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ โดยรายละเอียดจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

4.2.1 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่

ผลของค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยในภาพรวมร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเหมือนในกรณีของข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการหนึ่งแบบปกติ แต่พบว่ามีแนวโน้มในการสามารถลดร้อยละการแตกหักลงได้น้อยกว่าทั้งนี้ น่าจะเกิดจากความแตกต่างของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเมล็ดข้าว เมื่อพิจารณาโดยละเอียดที่ระดับอุณหภูมิการแช่ข้าวต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการแช่ข้าวที่ 60 และ 65 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยโดยมีลักษณะการลดลงที่คล้ายกัน และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเวลาในการแช่ข้าวเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส คือเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ข้าวให้นานขึ้นมีทำให้ค่าร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวค่อยๆลดลงเหลือประมาณร้อยละ 35 ที่เวลาการแช่ 5.5 ชั่วโมง ซึ่งลักษณะแนวโน้มแบบนี้ไม่เกิดขึ้นในผลการทดลองที่อุณหภูมิการแช่ข้าว 60 และ 65 องศาเซลเซียส ที่ให้ร้อยละการแตกหักที่สูงในทุกช่วงเวลาในการแช่

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่า มีปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ปัจจัย สำหรับปัจจัยอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าร้อยละการแตกหักในทุกๆเวลาในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสำหรับเวลาในการแช่พบว่า มีผลต่อค่าร้อยละการแตกหักในทุกๆอุณหภูมิในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกันดังแสดงในตารางที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ร้อยละการแตกหักของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน
กระบวนกรแช่

ตารางที่ 4.5 ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใน
กระบวนกรแช่

เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
3	85.98±0.81aB	90.81±1.24aA	82.65±2.75aB
4	80.37±1.13bB	89.84±1.17aA	67.07±0.53bC
5	81.34±0.88bA	79.95±1.16bA	53.49±1.84cB
5.5	77.51±2.39cA	80.93±6.71bA	35.15±3.87dB

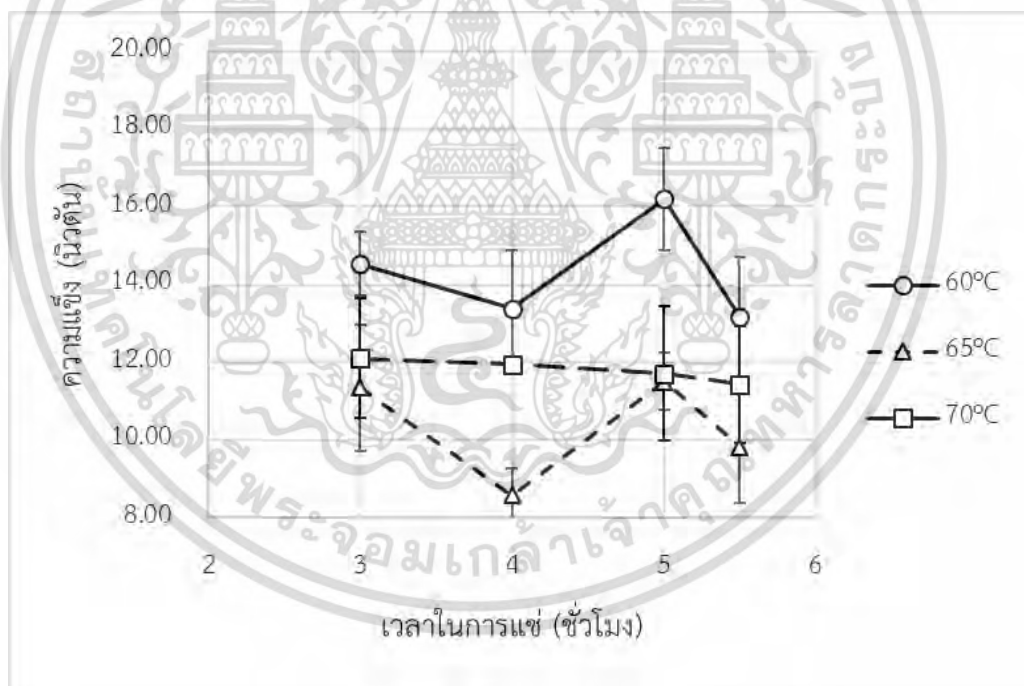
* a, b, c, d – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

** A, B, C – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

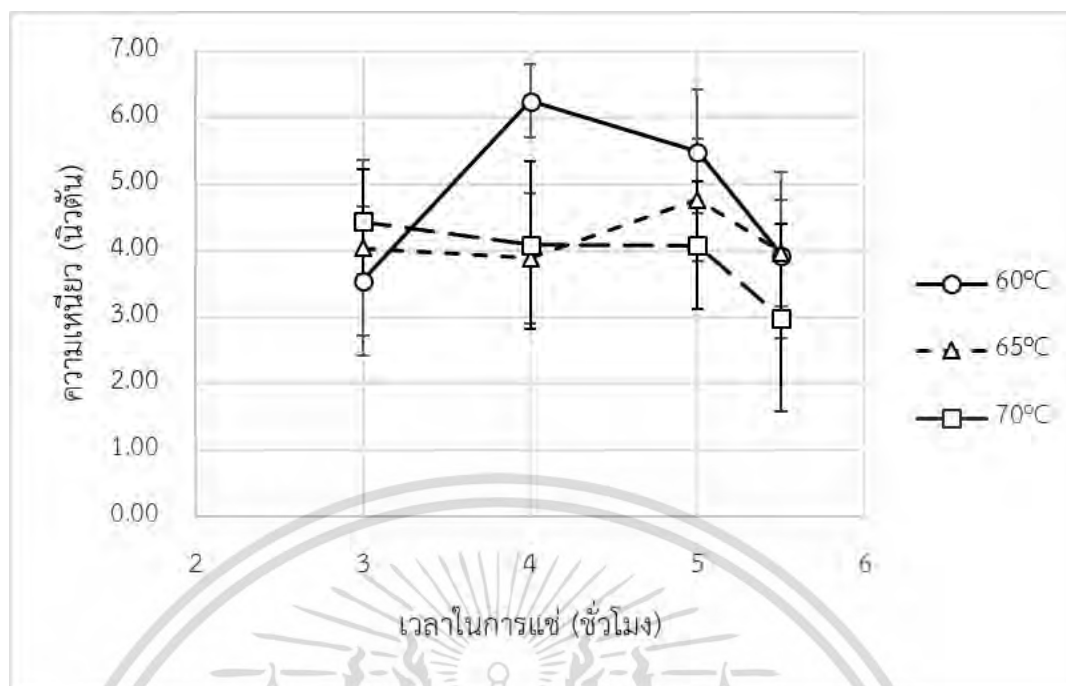
4.2.2 ความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนกรแช่

ผลของค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนกรแช่แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 สำหรับค่าความแข็งพบว่าโดยภาพรวมแล้วมี

แนวโน้มที่ไม่ค่อยชัดเจนสำหรับปัจจัยเวลาที่ใช้ในการแช่ แต่สำหรับปัจจัยอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้แนวโน้มของความแข็งแรงลดลง เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าที่อุณหภูมิการแช่ที่ 60 และ 65 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของความแข็งแรงที่ไม่แน่นอนเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่แต่มีลักษณะของข้อมูลที่คล้ายกัน ซึ่งต่างจากที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 70 องศาเซลเซียส ที่มีแนวโน้มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาในการแช่ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ยังไม่สามารถทราบได้อย่างชัดเจนว่าเหตุใดข้อมูลจึงมีแนวโน้มเช่นนี้แต่คาดว่าน่าจะเกิดจากความแตกต่างของสารละลายที่ใช้ในการแช่ส่งผลต่อโครงสร้างของเมล็ด และสำหรับค่าความเหนียวพบว่ามีความแข็งแรงที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแช่ แต่สำหรับปัจจัยด้านเวลาในการแช่พบว่าค่าความเหนียวเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนักเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าค่าความเหนียวที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 65 และ 70 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มที่คล้ายกันและมีความเหนียวใกล้เคียงกัน แต่สำหรับที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 60 องศาเซลเซียสพบว่าค่าความเหนียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากที่เวลาในการแช่ที่ 4 ชั่วโมง และค่อยๆลดลงและมีความเหนียวที่ใกล้เคียงกับที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 65 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5.5 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.5 ความแข็งแรงของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่



ภาพที่ 4.6 ความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่

เมื่อนำข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่า ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย โดยค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่สำหรับปัจจัยเรื่องอุณหภูมิพบว่ามีความแข็งแตกต่างกันทุกอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.6 และสำหรับปัจจัยเวลาพบว่าที่เวลา 3 และ 5 ชั่วโมงมีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่เวลา 4 และ 5.5 ชั่วโมงก็มีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกันดังแสดงในตารางที่ 4.7

สำหรับค่าความเหนียวเมื่อนำข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่า มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ในทุกๆเวลาการแช่ยกเว้นที่เวลา 3 และ 5.5 ชั่วโมง และเวลาในการแช่มีผลต่อค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ในทุกๆอุณหภูมิในการแช่ยกเว้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ที่อุณหภูมิต่างๆ

ความแข็ง (นิวตัน)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
	14.32±1.73a	10.32±1.65c	11.80±1.29b

* a, b, c – ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ที่เวลาต่างๆ

ความแข็ง (นิวตัน)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)			
	3	4	5	5.5
	12.66±1.89a	11.31±2.26b	13.14±2.55a	11.48±1.97b

* a, b – ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.8 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านมาการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ (นิวตัน)

เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
3	3.55±1.12bNS	4.04±1.32nsNS	4.44±0.79aNS
4	6.25±0.54aA	3.89±0.98nsB	4.09±1.26abB
5	5.49±0.93aA	4.77±0.92nsAB	4.08±0.96abB
5.5	3.93±1.25bNS	3.97±0.80nsNS	2.99±1.41bNS

* ns – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

** NS – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

*** a, b – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

**** A, B – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

4.2.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่

จากการตัดสินใจตามแผนผังการตัดสินใจในหัวข้อที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ คือ ที่สภาวะการแช่ที่อุณหภูมิ 70 C ที่เวลา 5.5 ชั่วโมง

4.3 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่

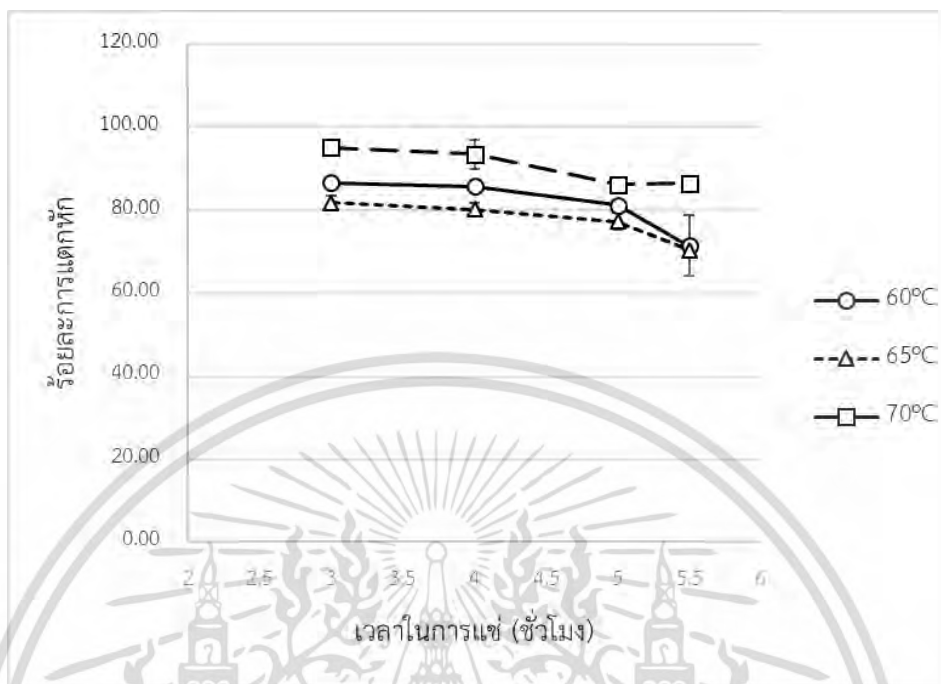
ผลจากการศึกษาการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ สามารถแบ่งผลการศึกษาได้ดังนี้คือ 1) ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ 2) ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ และ 3) สภาวะที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ โดยรายละเอียดจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

4.3.1 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่

ผลของค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่แสดงดังรูปที่ 4.7 โดยในภาพรวมร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาในการแช่นานขึ้น โดยแนวโน้มของการลดลงของทั้งสามช่วงอุณหภูมิมิแนวโน้มที่คล้ายกัน แต่พบว่าค่าร้อยละการแตกหักมีค่าที่สูงมากโดยเฉพาะที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 70 องศาเซลเซียส ที่ให้ค่าร้อยละการแตกหักที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับร้อยละการแตกหักของวิธีการทำข้าวหนึ่งแบบอื่นๆ ทั้งนี้จะเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำและความร้อนจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดฟองอากาศภายในเมล็ดข้าวจึงส่งผลให้ข้าวหนึ่งเกิดการแตกหักได้ง่ายขึ้น

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ปัจจัย สำหรับปัจจัยอุณหภูมิในการแช่ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่โซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่มีค่าร้อยละการแตกหักแตกต่างกันในทุกอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และสำหรับปัจจัยเวลาในการแช่ค่าร้อยละการแตกหักของ

ข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่โซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ที่เวลาในการแช่ 3 และ 4 ชั่วโมงมีค่าร้อยละการแตกหักไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.10



ภาพที่ 4.7 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่

ตารางที่ 4.9 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ที่อุณหภูมิต่างๆ

ร้อยละการแตกหัก	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
	81.24±7.08b	77.40±4.72c	90.28±4.51a

* a, b, c – ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.10 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ที่เวลาต่างๆ

ร้อยละการแตกหัก	เวลาในการแช่ (องศาเซลเซียส)			
	3	4	5	5.5
	87.80±5.94a	86.45±6.09a	81.52±4.02b	76.11±8.65c

* a, b, c – ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

4.3.2 ความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่

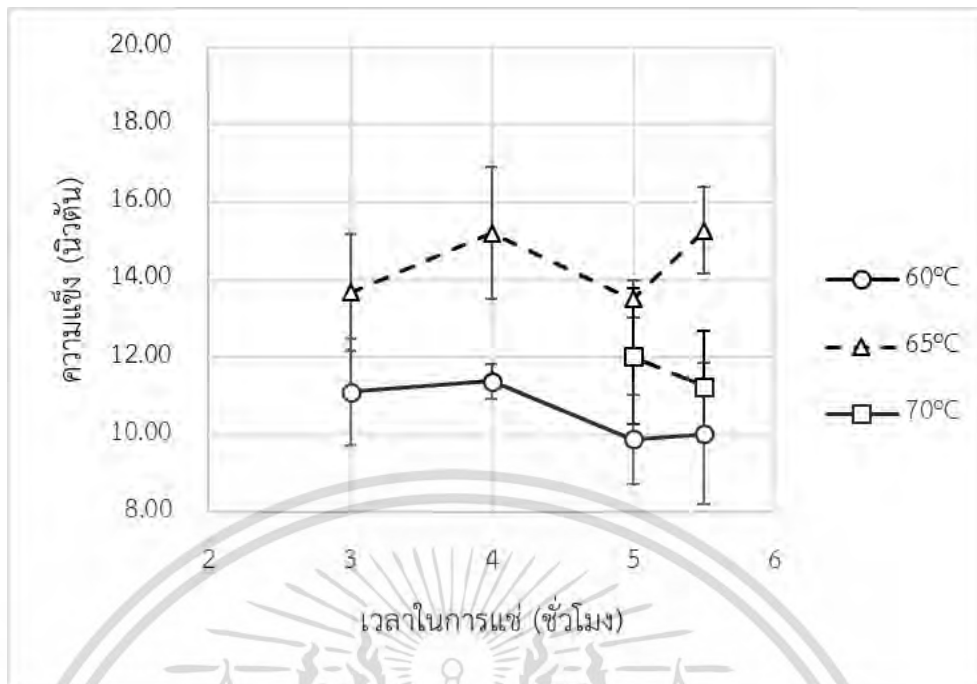
ผลของค่าความแข็งแรงและความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 สำหรับค่าความแข็งแรงพบว่าโดยภาพรวมแล้วมีแนวโน้มที่ไม่ค่อยชัดเจนสำหรับปัจจัยเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่ เมื่อพิจารณาที่ปัจจัยอุณหภูมิพบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 60 เป็น 65 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 70 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แต่ยังคงสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเกิดจากที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสมีค่าร้อยละการแตกหักที่สูงกว่าที่อุณหภูมิต่างๆที่น่าจะเกิดจากการเกิดฟองอากาศเป็นจำนวนมากจึงทำให้ความแข็งแรงมีค่าลดลง และสำหรับค่าความเหนียวพบว่าโดยภาพรวมมีแนวโน้มที่คล้ายกันเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ เมื่อพิจารณาจากเส้นเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้วพบว่าค่าความเหนียวมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน

เมื่อนำข้อมูลความแข็งแรงของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย โดยค่าความแข็งแรงของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่สำหรับปัจจัยเรื่องอุณหภูมิพบว่ามีความแข็งแรงที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียสไม่แตกต่างกันและมีความแข็งแรงน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.11 และสำหรับปัจจัยเวลาพบว่าค่าความแข็งแรงของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.12

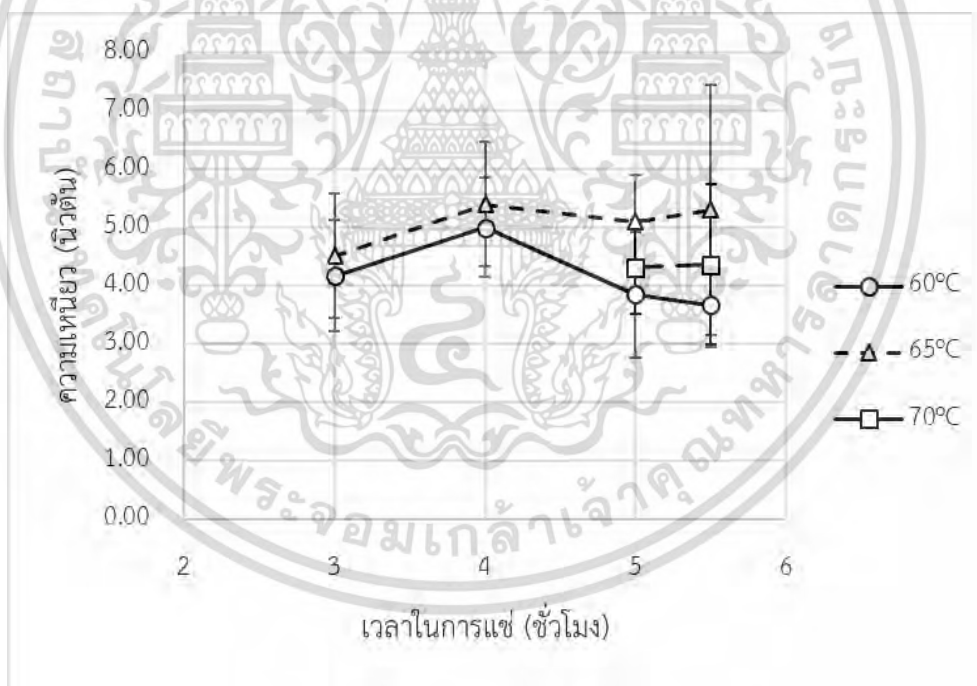
สำหรับค่าความเหนียวเมื่อนำข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย โดยค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่สำหรับปัจจัยเรื่องอุณหภูมิและเวลาในการแช่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14

4.3.3 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่

จากการตัดสินใจตามแผนผังการตัดสินใจในหัวข้อที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่า ไม่มีสภาวะที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่



ภาพที่ 4.8 ความแข็งแรงของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่



ภาพที่ 4.9 ความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่

ตารางที่ 4.11 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน
กระบวนการแช่ที่อุณหภูมิในการแช่ต่างๆ

ความแข็ง (นิวตัน)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
	10.60±1.37b	14.41±1.46a	11.63±1.56b

* a, b – ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน
กระบวนการแช่ที่เวลาต่างๆ

ความแข็ง (นิวตัน)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)			
	3	4	5	5.5
	12.39±1.92ns	13.29±2.33ns	11.81±1.92ns	12.18±2.70ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.13 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน
กระบวนการแช่ที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเหนียว (นิวตัน)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
	4.18±0.99ns	5.09±1.31ns	4.35±1.06ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.14 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตใน
กระบวนการแช่ที่เวลาต่างๆ

ความเหนียว (นิวตัน)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)			
	3	4	5	5.5
	4.35±0.98ns	5.20±0.94ns	4.43±0.99ns	4.45±1.58ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

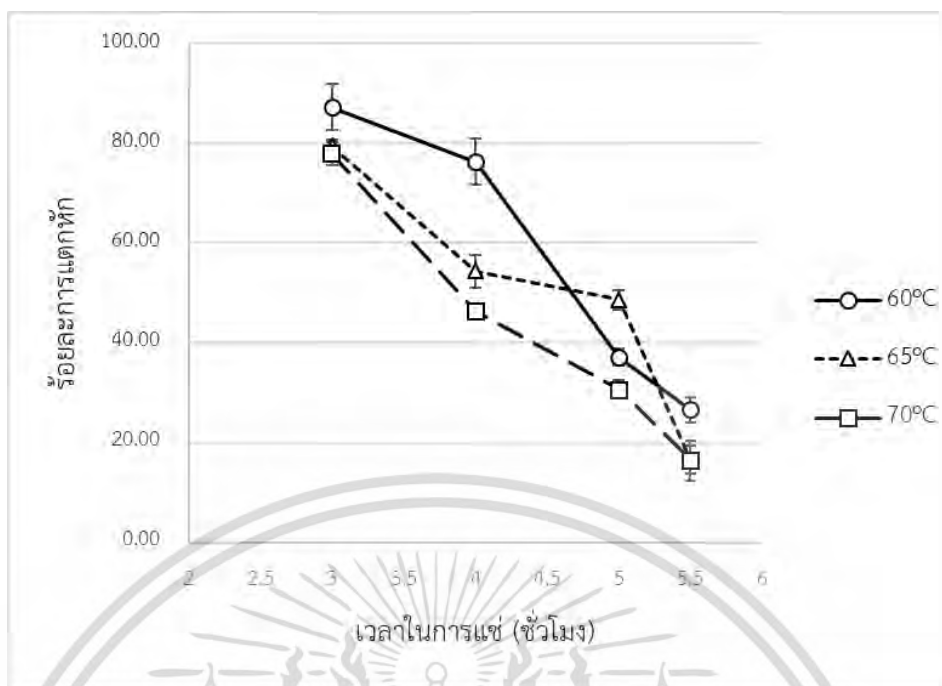
4.4 ผลการศึกษาร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

ผลจากการศึกษาการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก สามารถแบ่งผลการศึกษาได้ดังนี้คือ 1) ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก 2) ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกและ 3) สภาพที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก โดยรายละเอียดจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

4.4.1 ร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

ผลของค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยในภาพรวมร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการนึ่งแบบปกติ แต่สำหรับการทำข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกมีแนวโน้มของค่าร้อยละการแตกหักที่คล้ายกันเมื่อเวลาในการแช่นานขึ้นซึ่งน่าจะเกิดจากการที่นำข้าวไปแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกจะทำให้หน้าสามารถแพร่เข้าสู่เมล็ดข้าวได้ดีขึ้น [38] จึงทำให้สามารถลดร้อยละการแตกหักได้มากเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ในทุกๆช่วงอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าที่ระดับอุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ 65 และ 70 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มของค่าร้อยละการแตกหักที่ใกล้เคียงกัน โดยที่เวลาในการแช่ที่ 5.5 ชั่วโมง สามารถลดร้อยละการแตกหักต่ำกว่าร้อยละ 20 และใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากที่อุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ 60 องศาเซลเซียส ที่ไม่สามารถลดร้อยละการแตกหักได้ต่ำกว่าร้อยละ 20 ที่เวลาดังกล่าว

เมื่อนำข้อมูลร้อยละการแตกหักของเมล็ดข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกมาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่า มีปฏิสัมพันธ์ของปัจจัย 2 ปัจจัย สำหรับอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าร้อยละการแตกหักในทุกๆเวลาในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสำหรับเวลาในการแช่พบว่า มีผลต่อค่าร้อยละการแตกหักในทุกๆอุณหภูมิในการแช่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.15



ภาพที่ 4.10 ร้อยละการแตกหักของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.15 ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
3	87.31±4.61aA	79.60±1.15aB	78.03±2.40aB
4	76.42±4.69bA	54.43±3.32bB	46.44±1.30bC
5	37.18±1.69cB	48.67±1.90cA	30.72±1.73cC
5.5	26.62±2.50dA	16.37±3.94dB	16.60±2.71dB

* a, b, c, d – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

** A, B, C – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

4.4.2 ความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

ผลของค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแช่แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 สำหรับค่าความแข็งพบว่าโดยภาพรวมแล้วมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการแช่นานขึ้นยกเว้นที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 70 องศาเซลเซียส ที่มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากอุณหภูมิที่สูงพร้อมกับเป็นระบบอัลตราโซนิกจึงทำให้การแพร่ส่งผลต่อการขยายตัวของเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งบางประเภทหาย [36] ไปซึ่งอาจจะเป็นส่วนของอะไมโลสจึงส่งผล

ให้ค่าสัดส่วนอะไมโลสลดลงส่งผลให้ค่าความแข็งของเมล็ดข้าวลดน้อยลงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่าลักษณะแวนโน้มที่ระดับอุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ 60 และ 65 องศาเซลเซียส มีแวนโน้มที่คล้ายกันคือมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ ซึ่งต่างจากที่อุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ 70 องศาเซลเซียส ที่มีแวนโน้มลดลงตั้งแต่ที่เวลาในการแช่ 4 ชั่วโมงและค่อยๆคงที่ที่เวลา 5 และ 5.5 ชั่วโมง และสำหรับค่าความเหนียวพบว่าเมื่อเพิ่มแวนโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ยกเว้นที่ระดับอุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ 70 องศาเซลเซียส พบว่าที่เวลาในการแช่ข้าวที่ 5.5 ชั่วโมง ความเหนียวมีค่าลดลงเมื่อพิจารณาจากเส้นของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้วพบว่าค่าความเหนียวของแต่ละสภาวะน่าจะมีแวนโน้มที่ไม่แตกต่างกัน

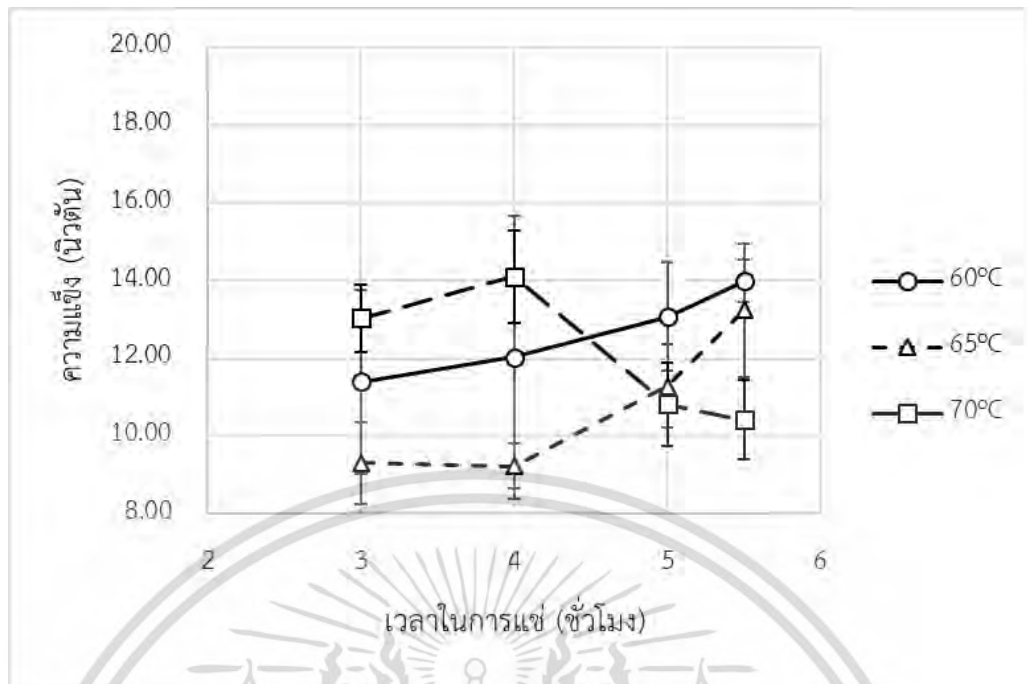
เมื่อนำข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย โดยค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่สำหรับปัจจัยเรื่องอุณหภูมิพบว่ามีความแข็งที่อุณหภูมิในการแช่ที่ 60 และ 70 องศาเซลเซียสไม่แตกต่างกันและมีความแข็งน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.11 และสำหรับปัจจัยเวลาพบว่าค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.12

เมื่อนำข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการแช่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกในทุกๆเวลาในการแช่ และเวลาในการแช่มีผลต่อค่าความแข็งของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกในทุกๆอุณหภูมิในการแช่ ยกเว้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 4.16

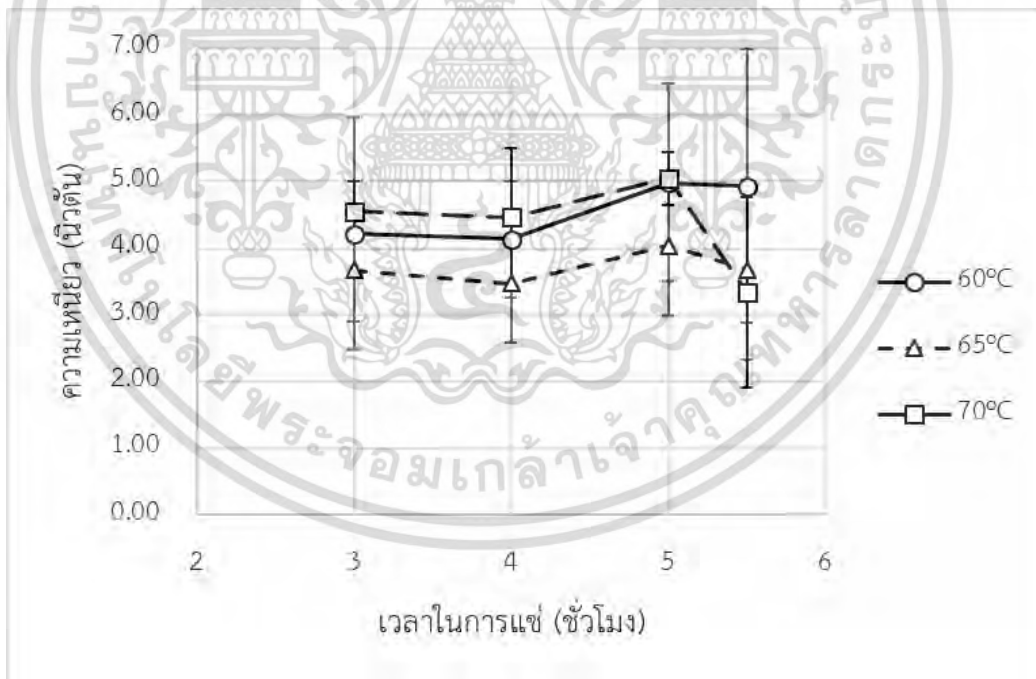
สำหรับค่าความเหนียวเมื่อนำข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกในกระบวนการแช่มาทดสอบเปรียบเทียบความแปรปรวนทางสถิติพบว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 2 ปัจจัย โดยค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกสำหรับปัจจัยเรื่องอุณหภูมิและเวลาในการแช่มีค่าความเหนียวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.17 และ 4.18

4.4.3 สถานะที่เหมาะสมสำหรับการทำข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

จากการตัดสินใจตามแผนผังการตัดสินใจในหัวข้อที่ 3.5 ในบทที่ 3 พบว่า สถานะที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งทีผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก คือที่สภาวะการแช่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5.5 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.11 ความแข็งแรงของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก



ภาพที่ 4.12 ความเหนียวของข้าวเหนียวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก

ตารางที่ 4.16 ค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก (นิวตัน)

เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
3	11.41±2.36nsAB	9.31±1.06cB	13.03±0.86aA
4	12.03±3.64nsAB	9.22±0.57cB	14.11±1.19aA
5	13.07±1.3nsA	11.28±1.06bB	10.81±1.06bB
5.5	13.99±0.54nsA	13.23±1.73aA	10.41±1.02bB

* ns – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

** a, b, c – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

*** A, B – ค่าเฉลี่ยในแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.17 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิในการแช่ต่างๆ

ความเหนียว (นิวตัน)	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)		
	60	65	70
	4.57±1.52ns	3.72±0.97ns	4.36±1.07ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.18 ค่าความเหนียวของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกที่เวลาในการแช่ต่างๆ

ความเหนียว (นิวตัน)	เวลาในการแช่			
	3	4	5	5.5
	4.15±1.11ns	4.03±0.97ns	4.69±1.11ns	3.98±1.68ns

* ns – ค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของการทำข่าวนึ่งในแต่ละวิธี

การเปรียบเทียบค่าร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข่าวนึ่งในแต่ละวิธีการทำที่ต่างกััน เป็นการนำเสนอภาวะที่เหมาะสมที่สุดตามแผนการตัดสินใจในการทำแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูแนวโน้ม ซึ่งแสดงดังตาราง 4.19 4.20 และ 4.21

ตารางที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบค่าร้อยละการแตกหักของการทำข่าวนึ่งแต่ละวิธี

วิธีการทำข่าวนึ่ง	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	ร้อยละการแตกหัก
ข่าวธรรมดา	-	-	36.82±1.67a
ข่าวนึ่งปกติ	65	5	30.39±2.70b
ข่าวนึ่ง (Ca(OH) ₂)	70	5.5	35.15±3.87ab
ข่าวนึ่งอัลตราโซนิค	70	5.5	16.60±2.71c

* a, b, c – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบค่าความแข็งของการทำข่าวนึ่งแต่ละวิธี

วิธีการทำข่าวนึ่ง	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	ความแข็ง (นิวตัน)
ข่าวธรรมดา	-	-	12.53±1.03a
ข่าวนึ่งปกติ	65	5	10.33±1.07b
ข่าวนึ่ง (Ca(OH) ₂)	70	5.5	11.43±1.51ab
ข่าวนึ่งอัลตราโซนิค	70	5.5	10.41±1.02b

* a, b – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

ตารางที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบค่าความเหนียวของการทำข้าวหนึ่งแต่ละวิธี

วิธีการทำข้าวหนึ่ง	อุณหภูมิในการแช่ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการแช่ (ชั่วโมง)	ความเหนียว (นิวตัน)
ข้าวธรรมดา	-	-	3.01±0.63ns
ข้าวหนึ่งปกติ	65	5	4.27±0.88ns
ข้าวหนึ่ง (Ca(OH) ₂)	70	5.5	2.99±1.41ns
ข้าวหนึ่งอัลตราโซนิค	70	5.5	3.34±1.43ns

* ns – ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

จากตารางผลการเปรียบเทียบพบว่า ค่าร้อยละการแตกหักของข้าวที่ผ่านการแช่ในคลื่นอัลตราโซนิคมีค่าต่ำสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และข้าวธรรมดาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และข้าวธรรมดาให้ค่าความแข็งมากที่สุด ส่วนความเหนียวของการทำข้าวหนึ่งทั้ง 3 วิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่ และวิธีการแช่ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการแตกหัก ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่ง เพื่อศึกษาแนวทางปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง สามารถสรุปผลงานวิจัย และมีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่ และวิธีการแช่ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการแตกหัก ความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งพบว่า สำหรับข้าวหนึ่งปกติ อิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการแตกหักและความแข็ง แต่ไม่มีผลต่อค่าความเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการแช่ แต่ค่าความแข็งนั้นมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ถูกเลือกตามแผนการตัดสินใจพบว่า ที่สภาวะการแช่ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้ค่าความแข็งมีค่าน้อยที่สุดโดยไม่กระทบต่อค่าร้อยละการแตกหัก สำหรับข้าวที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในกระบวนการแช่ อิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการแตกหัก ความแข็ง และความเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการแช่ แต่ค่าความแข็งนั้นมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ถูกเลือกตามแผนการตัดสินใจพบว่า ที่สภาวะการแช่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5.5 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้ค่าความแข็งมีค่าน้อยที่สุดโดยไม่กระทบต่อค่าร้อยละการแตกหัก สำหรับข้าวที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ อิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการแตกหัก โดยอิทธิพลด้านอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอิทธิพลด้านเวลามีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการแช่ ในส่วนของความ แข็งพบว่าไม่มีเพียงอิทธิพลด้านอุณหภูมิที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง และอิทธิพลด้านเวลาและอุณหภูมิในการแช่ ไม่มีผลต่อค่าความเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อทำการหาสภาวะที่เหมาะสมตามแผนการตัดสินใจพบว่าข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายโซเดียมโบคาร์บอเนตในกระบวนการแช่ ไม่มีสภาวะใดที่เหมาะสมเนื่องจากค่าร้อยละการแตกหักที่สูง สำหรับข้าวที่ผ่านการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิก อิทธิพลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่มีอิทธิพลต่อค่าร้อยละการแตกหัก และค่าความแข็ง

อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าร้อยละการแตกหักมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในการแช่ แต่ค่าความแข็งนั้นมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ถูกเลือกตามแผนการตัดสินใจพบว่า ที่สภาวะการแช่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่เวลา 5.5 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้ค่าความแข็งมีค่าน้อยที่สุดโดยไม่กระทบต่อค่าร้อยละการแตกหัก จากการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำข้าวหนึ่งแล้วนำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งโดยเปรียบเทียบร่วมกับพบว่า วิธีการทำข้าวหนึ่งโดยการแช่ในระบบคลื่นอัลตราโซนิกสามารถลดค่าร้อยละการแตกหักของข้าวได้มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับค่าความแข็งของข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและให้ค่าความแข็งมากที่สุด และสำหรับความเหนียวพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสรุปได้ว่าผลการวิจัยในครั้งนี้สามารถบอกถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ต่อร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่งในแต่ละวิธีการทำข้าวหนึ่งโดยสามารถทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ข้าวหนึ่งในแต่ละวิธีมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดโดยไม่กระทบต่อค่าร้อยละการแตกหัก และพบว่าวิธีการทำข้าวหนึ่งด้วยระบบคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิในการแช่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5.5 ชั่วโมง และข้าวหนึ่งที่อุณหภูมิการแช่ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าค่าความแข็งของข้าวธรรมดาซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในครั้งนี้พบว่า ค่าความแข็งและความเหนียวของข้าวหนึ่งในแต่ละวิธีนั้นมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนซึ่งอาจเกิดจากวิธีการวัด ดังนั้นหากต้องการให้งานวิจัยสมบูรณ์ยิ่งขึ้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังมีรายละเอียดดังนี้

1. ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธีอื่นๆเพื่อเปรียบเทียบและหาวิธีที่ดีที่สุดในการวัด
2. ทำการทดสอบการทำข้าวหนึ่งด้วยวิธีอื่นๆเพิ่มเติมนอกจากวิธีการทำในงานวิจัยนี้เพื่อดูความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวหนึ่ง
3. ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยปรับปรุงขั้นตอนการอื่นๆในกระบวนการทำข้าวหนึ่งเพิ่มเติม เช่นในขั้นตอนการนึ่ง หรือขั้นตอนการทำแห้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Opportunities for Micronutrient Interventions (OMNI). 1994. **Micronutrient fortification and enrichment of P.L. 4OMNI**. USA : John Snow, Inc.
- [2] สุนทร ตรีนันทวัน. “คุณค่าทางโภชนาการของข้าว.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.scimath.org/article-biology/item/517-nutritional>. 2553
- [3] Kyritsi, A., Tzia, C. and . Karathanos, V.T. “Vitamin fortified rice grain using spraying and soaking methods.” **Food Science and Technology**, 2011. Vol. 44. Pp. 312–320.
- [4] Velupillai, L., and Verma, L. R. “Parboiled rice quality as affected by the level and distribution of moisture after the soaking process.” **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**. 1982. 1450–1456.
- [5] Chanakan, P., Benjavan, R., Ismail, C. and Longbin, H. “Zinc fortification of whole rice grain through parboiling process.” **Food Chemistry**. 2010. Vol. 120. Pp. 858-863.
- [6] Karrie, K., Jayashree, A., and Rachele, W. “Fortification of rice with folic acid using parboiling technique: Effect of parboiling conditions on nutrient uptake and physical characteristics of milled rice.” **Journal of Cereal Science**. 2012. Vol. 56. Pp. 587-594.
- [7] อภนิษฐ์ ชุมวิสูตร. 2558. “การเพิ่มคาเทชินในเมล็ดข้าวโดยกระบวนการทำข้าวหนึ่ง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] Norlin N., Hazizan M.A., Zainal A.M.I., Azhar A.B. “Behavior of kenaf fibers after immersion in several water conditions.” **BioResources**. 2011. Vol. 6(2). Pp. 950-960.
- [9] Zhang X., Wang L., Cheng M., Wang R., Luo X., Li Y., Chen Z. “Influence of ultrasonic enzyme treatment on the cooking and eating quality of brown rice.” **Journal of Cereal Science**. 2015. 63. Pp. 140-146.

- [10] Park, D.J., and Han, J.A. “Quality controlling of brown rice by ultrasound treatment and its effect on isolated starch.” *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 137. Pp. 30–38.
- [11] Smith, D., Bruce. “The Emergence of Agriculture”. *The Agricultural History Review*. Vol. 44. 1998. Pp. 230-232.
- [12] นิพนธ์ พัวพงศกร, บุญจิต ฐิตาภิวัฒน์กุล, ประพิณวดี ศิริสุภลักษณ์, อีสริยา นิตินันท์ประภาส และวาริรัตน์ เพชรสีช่วง. “อุปสงค์การบริโภคข้าวของไทย.” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, กรกฎาคม 2556.
- [13] United States Department of Agriculture (USDA). “National Nutrient Database for Standard Reference Legacy Release.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/20036?fgcd=&manu=&format=&count=&max=25&offset=&sort=default&order=asc&qlookup=20036&ds=&qt=&qp=&qa=&qn=&q=&ing=.> 2561
- [14] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. “ข้าวหอมดอกมะลิ.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1730/jasmine-rice-ข้าวหอมดอกมะลิ>. 2561
- [15] อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. *ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [16] เครือวัลย์ อัดตะวีริยะสุข. 2536. “คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพและการแปรสภาพเมล็ด.” หน้า 1-53. ใน *เอกสารประกอบการบรรยายอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว*. กรุงเทพฯ : กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [17] Luh, B.S. 1991. *Rice : Utilization*. Volume II. 2nd ed. New York : AVI. Van Nostrand Reinhold.
- [18] น้ำฝน ศีตะจิตต์ และอรอนงค์ นัยวิกุล. 2546. “กระบวนการผลิตข้าวเปลือกนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ.” หน้า 36-44. ใน *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41*. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [19] Ali, S.Z. and Bhattacharya. “Changes in sugars and amino acids during parboiling of rice.” *J. Food Biochem*. 1980. Vol. 4. Pp. 169-179.
- [20] Pillaiyar, P. “Rice parboiling research in India.” *Cereal Food World*. 1990. Vol. 35 (2). Pp. 225-227.

- [21] ไทยเสรีกรู๊ป 339. “ผลิตภัณฑ์ข้าวหนึ่ง 100% เกรดพรีเมียม.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://ts9339.com/ผลิตภัณฑ์ข้าวหนึ่ง-100-เกรด/>. 2561.
- [22] Prakash O., Rachele W., Benu A. and Peter T. “Parboiled rice: Understanding from a materials science approach.” *Journal of Food Engineering*. 2014. Vol. 124. Pp. 173-183.
- [23] Carbohydrate Technology. “เคมีและสมบัติของแป้ง.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html. 2561
- [24] ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. “อสังฐาน” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1730/jasmine-rice-ข้าวหอมดอกมะลิ>. 2561
- [25] ไทยก๊วดิวทอคอม. “สารละลายเบส.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.thaigoodview.com/node/103281>. 2554
- [26] Ujwala H., Sanjay K.C., Ramagopal U. and Alope K.G. “Effect of maleic anhydride grafted polypropylene on the mechanical and morphological properties of chemically modified short-pineapple-leaf-fiber-reinforced polypropylene composites.” *Journal of Applied Polymer Science*. 2007. Vol. 107(3).
- [27] Chen H., Wang G. and Cheng H.T. “Properties of single bamboo fibers isolated by different chemical methods.” *Wood and Fiber Science*. 2011. Vol. 43(2). Pp. 111-120.
- [28] Siamchemi.com. “น้ำปูนใสและประโยชน์น้ำปูนใส.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.siamchemi.com/น้ำปูนใส/>. 2561
- [29] Santa Cruz biotechnology. “Calcium hydroxide.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://www.scbt.com/scbt/product/calcium-hydroxide-1305-62-0>. 2561
- [30] honestdocs. “เบกกิ้งโซดา ใช้ประโยชน์ได้ลหลายอย่างมากกว่าที่คุณคิด.” [Online]. เข้าถึงจาก : <https://www.honestdocs.co/baking-soda-benefits>. 2561
- [31] ChemSpider. “Sodium bicarbonate.” [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.8609.html>. 2561

- [32] Dr. axe Food is medicine. “33 Surprising Baking Soda Uses & Remedies.” [Online]. เข้าถึงจาก : <https://draxe.com/baking-soda-uses/>. 2561
- [33] บริษัท คอมโพแม็กซ์ จำกัด. “Ultrasonic Theory.” [Online]. เข้าถึงจาก : <http://www.compomax.co.th/product/ultrasonic-theory/>. 2561
- [34] DACON. “การทดสอบแบบไม่ทำลายพื้นฐาน.” [Online]. เข้าถึงจาก : <https://www.dacon-inspection.com/th/services/inspection-services/conventional-ndt/ultrasonic-testing/>. 2561
- [35] Bello M.O., Tolaba M.P. and Suarez C. “Water absorption and starch gelatinization in whole rice grain during soaking.” **Food Science and Technology**. 2007. Vol. 40(2). Pp. 313-318.
- [36] Mahanta C.L. and Bhattacharya K.R. “Thermal degradation of starch in parboiled rice.” **Starch – Stärke**. 1989. Vol. 41(3). Pp. 91-94.
- [37] Chiang P.Y. and Yeh A.I. “Effect of soaking on wet-milling of rice.” **Journal of Cereal Science**. 2002. Vol. 35, Pp. 85-94.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

ร้อยละการแตกหัก

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวหนึ่งปกติ	60	3	130.65	110.70	84.73
	60	3	128.39	109.50	85.29
	60	3	127.74	105.39	82.50
	60	4	135.19	85.62	63.33
	60	4	134.36	87.21	64.91
	60	4	136.36	78.24	57.38
	60	5	142.89	57.06	39.93
	60	5	141.69	51.28	36.19
	60	5	141.38	55.14	39.00
	60	5.5	132.68	40.55	30.56
	60	5.5	133.73	35.25	26.36
	60	5.5	133.57	38.13	28.55
	65	3	118.75	104.14	87.70
	65	3	128.18	112.40	87.69
	65	3	126.05	105.56	83.74
	65	4	129.88	75.45	58.09
	65	4	131.69	80.42	61.07
	65	4	132.53	82.42	62.19
	65	5	129.04	39.34	30.49
	65	5	130.62	43.15	33.03
65	5	128.37	35.48	27.64	

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวหนึ่งปกติ	65	5.5	139.20	45.55	32.72
	65	5.5	130.03	40.15	30.88
	65	5.5	134.51	34.30	25.50
	70	3	134.36	88.43	65.82
	70	3	129.41	95.23	73.59
	70	3	132.71	85.17	64.18
	70	4	134.60	32.02	23.79
	70	4	131.26	29.78	22.69
	70	4	133.58	32.43	24.28
	70	5	131.16	27.39	20.88
	70	5	135.62	25.48	18.79
	70	5	133.64	25.24	18.89
	70	5.5	130.94	27.66	21.12
	70	5.5	130.41	29.44	22.57
	70	5.5	134.99	25.31	18.75

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวเหนียว CaOH ₂	60	3	125.22	107.68	85.99
	60	3	129.37	110.19	85.17
	60	3	129.39	112.28	86.78
	60	4	136.55	110.31	80.78
	60	4	135.01	109.68	81.24
	60	4	133.13	105.30	79.10
	60	5	140.05	113.81	81.26
	60	5	138.40	111.41	80.50
	60	5	140.17	115.29	82.25
	60	5.5	134.07	107.00	79.81
	60	5.5	135.93	105.60	77.69
	60	5.5	135.53	101.70	75.04
	65	3	134.28	120.38	89.65
	65	3	133.07	122.57	92.11
	65	3	132.78	120.41	90.68
	65	4	134.57	122.30	90.88
	65	4	134.86	119.46	88.58
	65	4	134.24	120.91	90.07
	65	5	138.34	108.82	78.66
	65	5	130.05	104.92	80.31
65	5	135.73	109.80	80.90	

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวเหนียว CaOH ₂	65	5.5	129.58	113.14	87.31
	65	5.5	133.24	108.63	81.53
	65	5.5	133.59	98.77	73.94
	70	3	142.26	115.71	81.34
	70	3	143.62	116.87	81.37
	70	3	139.99	120.12	85.81
	70	4	137.19	92.54	67.45
	70	4	134.49	90.50	67.29
	70	4	134.81	89.61	66.47
	70	5	135.20	74.75	55.29
	70	5	135.24	69.80	51.61
	70	5	134.22	71.89	53.56
	70	5.5	134.22	53.07	39.54
	70	5.5	135.52	45.67	33.70
	70	5.5	134.85	43.43	32.21

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สถานะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวเหนียว NaHCO ₃	60	3	124.09	106.93	86.17
	60	3	128.17	110.48	86.20
	60	3	127.21	111.35	87.53
	60	4	127.29	109.35	85.91
	60	4	125.08	106.28	84.97
	60	4	127.57	110.21	86.39
	60	5	129.30	106.65	82.48
	60	5	127.12	102.21	80.40
	60	5	127.88	103.13	80.65
	60	5.5	125.24	92.12	73.55
	60	5.5	121.81	94.20	77.33
	60	5.5	127.16	80.46	63.27
	65	3	131.74	106.84	81.10
	65	3	131.58	105.70	80.33
	65	3	129.09	108.12	83.76
	65	4	132.97	108.77	81.80
	65	4	132.74	105.33	79.35
	65	4	131.43	104.21	79.29
	65	5	136.56	102.51	75.07
	65	5	133.64	105.44	78.90
65	5	132.91	103.52	77.89	

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวเหนียว NaHCO ₃	65	5.5	135.93	95.43	70.21
	65	5.5	136.54	95.12	69.66
	65	5.5	136.01	97.10	71.39
	70	3	134.78	129.23	95.88
	70	3	133.70	125.30	93.72
	70	3	134.09	128.11	95.54
	70	4	131.80	128.20	97.27
	70	4	132.90	120.20	90.44
	70	4	133.50	123.63	92.61
	70	5	139.58	121.01	86.70
	70	5	141.19	122.22	86.56
	70	5	141.30	120.18	85.05
	70	5.5	139.57	122.19	87.55
	70	5.5	138.98	118.78	85.47
	70	5.5	139.92	121.12	86.56

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวหนึ่ง Ultrasonic	60	3	125.17	103.49	82.68
	60	3	126.18	110.22	87.35
	60	3	129.48	119.00	91.91
	60	4	189.15	91.70	71.00
	60	4	126.72	100.10	78.99
	60	4	125.69	99.63	79.27
	60	5	127.17	47.05	37.00
	60	5	126.68	45.08	35.59
	60	5	129.56	50.47	38.95
	60	5.5	133.44	39.04	29.26
	60	5.5	134.50	35.41	26.33
	60	5.5	134.99	32.77	24.28
	65	3	124.44	98.59	79.23
	65	3	126.17	102.05	80.88
	65	3	127.17	100.06	78.68
	65	4	126.30	69.01	82.68
	65	4	127.53	65.05	87.35
	65	4	130.49	75.20	91.91
	65	5	136.37	63.42	71.00
	65	5	135.61	67.07	78.99
65	5	131.86	66.00	79.27	

ตารางที่ ก.1 ร้อยละการแตกหัก (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ข้าวทั้งหมด(g)	ข้าวหัก(g)	ร้อยละการแตกหัก
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)			
ข้าวนึ่ง Ultrasonic	65	5.5	130.80	15.51	11.86
	65	5.5	130.89	25.01	19.11
	65	5.5	137.02	24.87	18.15
	70	3	132.58	102.96	77.66
	70	3	129.72	104.55	80.60
	70	3	133.20	101.01	75.83
	70	4	134.67	61.97	46.02
	70	4	133.72	60.71	45.40
	70	4	135.93	65.10	47.89
	70	5	129.60	42.12	32.50
	70	5	128.04	39.22	30.63
	70	5	125.64	36.48	29.04
	70	5.5	131.11	25.86	19.72
	70	5.5	134.05	20.03	14.94
	70	5.5	135.96	20.57	15.13
ข้าวธรรมดา			139.58	49.12	35.19129
			136.22	50.07	36.75672
			135.43	52.18	38.52913



ภาคผนวก ข.

ค่าความแข็งและความเหนียว

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวหนึ่งปกติ	60	3	10.52	3.04
	60	3	8.58	1.82
	60	3	11.92	5.03
	60	3	12.00	3.12
	60	3	10.95	4.42
	60	4	11.05	5.16
	60	4	10.69	6.01
	60	4	11.74	4.94
	60	4	15.47	5.74
	60	4	14.80	3.40
	60	5	13.77	6.49
	60	5	13.68	2.96
	60	5	11.40	6.11
	60	5	14.97	3.12
	60	5	11.85	2.62
	60	5.5	13.34	5.67
	60	5.5	12.39	5.20
	60	5.5	13.01	5.87
	60	5.5	16.36	4.32
	60	5.5	13.44	4.20

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวหนึ่งปกติ	65	3	9.15	4.70
	65	3	10.47	5.22
	65	3	10.09	2.77
	65	3	11.76	3.72
	65	3	13.61	2.51
	65	4	10.96	3.63
	65	4	11.67	5.13
	65	4	12.03	3.38
	65	4	14.08	4.10
	65	4	11.92	3.25
	65	5	9.27	5.41
	65	5	11.78	3.34
	65	5	9.62	3.46
	65	5	11.13	4.35
	65	5	9.87	4.79
	65	5.5	13.97	4.23
	65	5.5	15.99	4.49
	65	5.5	16.04	7.03
	65	5.5	15.15	3.08
65	5.5	17.05	5.84	

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวหนึ่งปกติ	70	3	12.37	5.04
	70	3	12.11	3.85
	70	3	13.64	3.46
	70	3	13.62	4.07
	70	3	15.58	5.14
	70	4	12.71	4.55
	70	4	12.16	4.57
	70	4	12.95	4.56
	70	4	14.36	2.14
	70	4	14.17	4.10
	70	5	13.29	4.70
	70	5	12.16	3.10
	70	5	12.53	3.33
	70	5	12.41	2.36
	70	5	14.22	4.88
	70	5.5	11.89	4.69
	70	5.5	11.53	1.81
	70	5.5	13.67	4.49
	70	5.5	14.11	3.30
	70	5.5	12.50	3.11

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวเหนียว CaOH ₂	60	3	14.54	5.17
	60	3	13.59	2.03
	60	3	13.93	3.37
	60	3	15.69	3.50
	60	3	14.88	3.66
	60	4	14.42	6.66
	60	4	11.09	6.35
	60	4	13.92	5.48
	60	4	12.80	6.82
	60	4	14.75	5.95
	60	5	15.71	6.46
	60	5	18.28	5.66
	60	5	16.61	4.37
	60	5	14.89	6.28
	60	5	15.55	4.70
	60	5.5	13.85	6.00
	60	5.5	10.50	3.98
	60	5.5	13.36	2.80
	60	5.5	14.38	3.13
	60	5.5	13.75	3.75

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวเหนียว CaOH ₂	65	3	10.39	4.34
	65	3	10.66	2.50
	65	3	10.32	3.99
	65	3	14.20	6.04
	65	3	11.20	3.34
	65	4	7.62	4.30
	65	4	8.88	4.11
	65	4	8.11	4.02
	65	4	9.16	2.22
	65	4	9.19	4.79
	65	5	11.15	5.08
	65	5	10.64	5.72
	65	5	11.33	5.45
	65	5	12.60	3.68
	65	5	11.85	3.89
	65	5.5	7.98	3.33
	65	5.5	9.37	3.26
	65	5.5	11.45	5.23
	65	5.5	9.24	4.12
	65	5.5	11.12	3.88

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวเหนียว CaOH ₂	70	3	11.04	4.77
	70	3	10.88	4.06
	70	3	12.21	4.20
	70	3	11.71	3.55
	70	3	14.67	5.62
	70	4	11.99	3.08
	70	4	11.77	2.89
	70	4	12.25	4.96
	70	4	11.83	3.70
	70	4	11.91	5.83
	70	5	9.18	4.74
	70	5	11.25	2.65
	70	5	12.58	4.77
	70	5	11.74	4.73
	70	5	13.83	3.52
	70	5.5	10.32	4.64
	70	5.5	11.44	2.29
	70	5.5	14.03	2.14
	70	5.5	10.72	4.34
	70	5.5	10.65	1.52

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวเหนียว NaHCO ₃	60	3	9.71	4.61
	60	3	10.22	3.18
	60	3	11.11	4.72
	60	3	13.31	3.14
	60	3	11.20	5.23
	60	4	11.41	5.46
	60	4	11.00	5.43
	60	4	11.79	4.71
	60	4	11.85	5.79
	60	4	10.85	3.65
	60	5	8.61	2.97
	60	5	8.88	3.89
	60	5	10.64	2.75
	60	5	9.99	5.44
	60	5	11.30	4.25
	60	5.5	8.09	4.23
	60	5.5	8.91	4.42
	60	5.5	9.94	2.58
	60	5.5	12.91	3.55
	60	5.5	10.29	3.61

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวเหนียว NaHCO ₃	65	3	12.32	4.37
	65	3	11.98	3.60
	65	3	15.28	6.21
	65	3	13.75	4.81
	65	3	15.03	3.62
	65	4	12.42	3.65
	65	4	16.34	5.85
	65	4	14.75	5.82
	65	4	16.51	5.23
	65	4	15.99	6.46
	65	5	13.71	4.04
	65	5	13.10	5.11
	65	5	13.50	5.68
	65	5	13.03	6.04
	65	5	14.21	4.69
	65	5.5	14.86	7.67
	65	5.5	15.28	6.46
	65	5.5	14.28	3.03
	65	5.5	14.78	6.38
	65	5.5	17.17	3.01

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวเหนียว NaHCO ₃	70	5	11.24	5.23
	70	5	14.66	3.92
	70	5	10.97	3.68
	70	5	10.36	3.63
	70	5	12.88	5.19
	70	5.5	13.79	6.02
	70	5.5	10.69	2.65
	70	5.5	10.57	3.32
	70	5.5	10.61	4.71
	70	5.5	10.56	5.15

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวหนึ่ง Ultrasonic	60	3	15.02	6.45
	60	3	11.92	3.61
	60	3	9.91	4.00
	60	3	8.79	1.83
	60	3	11.39	5.20
	60	4	9.09	4.60
	60	4	11.66	2.89
	60	4	13.38	5.22
	60	4	17.51	3.77
	60	4	8.51	4.21
	60	5	13.41	6.91
	60	5	10.91	5.36
	60	5	12.63	5.24
	60	5	13.88	2.77
	60	5	14.54	4.65
	60	5.5	13.34	3.61
	60	5.5	14.07	4.20
	60	5.5	13.73	6.77
	60	5.5	14.80	7.42
	60	5.5	14.00	2.67

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สถานะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวนึ่ง Ultrasonic	65	3	7.54	3.16
	65	3	9.48	4.98
	65	3	9.32	3.70
	65	3	10.18	3.08
	65	3	10.05	3.45
	65	4	8.69	4.18
	65	4	8.59	4.02
	65	4	9.45	3.28
	65	4	9.45	3.90
	65	4	9.94	2.00
	65	5	9.70	5.35
	65	5	11.33	4.43
	65	5	12.14	4.42
	65	5	10.92	2.64
	65	5	12.35	3.35
	65	5.5	10.46	2.20
	65	5.5	13.24	4.62
	65	5.5	13.09	5.13
65	5.5	14.50	4.12	
65	5.5	14.87	2.33	

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวหนึ่ง Ultrasonic	70	3	12.35	4.32
	70	3	12.73	4.43
	70	3	13.69	4.13
	70	3	14.16	5.29
	70	3	12.21	4.62
	70	4	12.14	3.34
	70	4	14.42	5.74
	70	4	15.13	5.38
	70	4	13.95	3.96
	70	4	14.90	3.94
	70	5	11.28	5.75
	70	5	8.92	4.83
	70	5	11.19	4.97
	70	5	11.25	4.94
	70	5	11.43	4.79
	70	5.5	9.66	3.52
	70	5.5	9.00	3.84
	70	5.5	11.03	1.61
	70	5.5	11.35	5.35
	70	5.5	11.00	2.39

ตารางที่ ข.1 ค่าความแข็งและความเหนียว (ต่อ)

ตัวอย่างข้าว	สภาวะในการแช่		ความแข็ง (N)	ความเหนียว (N)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)		
ข้าวธรรมดา	-	-	11.223	2.848
	-	-	12.494	3.525
	-	-	13.29	3.131
	-	-	11.876	2.004
	-	-	13.766	3.55





ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้้งปกติ

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable:fracture

F	df1	df2	Sig.
2.102	11	24	.062

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้้งปกติ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:fracture

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	20214.659 ^a	11	1837.696	249.839	.000
Intercept	76064.004	1	76064.004	1.034E4	.000
Time	16097.168	3	5365.723	729.481	.000
Temp	3065.711	2	1532.856	208.395	.000
Time * Temp	1051.779	6	175.297	23.832	.000
Error	176.533	24	7.356		
Total	98455.195	36			
Corrected Total	20391.192	35			

a. R Squared = .991 (Adjusted R Squared = .987)

ตารางที่ ค.3 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้ปกติ สำหรับปัจจัยอุณหภูมิ

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: fracture

Time	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
3 hours	60 C	65 C	-2.204	2.214	.330	-6.774	2.366
		70 C	16.313 [*]	2.214	.000	11.742	20.883
	65 C	60 C	2.204	2.214	.330	-2.366	6.774
		70 C	18.517 [*]	2.214	.000	13.946	23.087
	70 C	60 C	-16.313 [*]	2.214	.000	-20.883	-11.742
		65 C	-18.517 [*]	2.214	.000	-23.087	-13.946
4 hours	60 C	65 C	1.423	2.214	.527	-3.148	5.993
		70 C	38.287 [*]	2.214	.000	33.717	42.857
	65 C	60 C	-1.423	2.214	.527	-5.993	3.148
		70 C	36.864 [*]	2.214	.000	32.294	41.435
	70 C	60 C	-38.287 [*]	2.214	.000	-42.857	-33.717
		65 C	-36.864 [*]	2.214	.000	-41.435	-32.294
5 hours	60 C	65 C	7.988 [*]	2.214	.001	3.418	12.559
		70 C	18.857 [*]	2.214	.000	14.286	23.427
	65 C	60 C	-7.988 [*]	2.214	.001	-12.559	-3.418
		70 C	10.868 [*]	2.214	.000	6.298	15.439
	70 C	60 C	-18.857 [*]	2.214	.000	-23.427	-14.286
		65 C	-10.868 [*]	2.214	.000	-15.439	-6.298
5.5 hours	60 C	65 C	-1.211	2.214	.590	-5.781	3.359
		70 C	7.673 [*]	2.214	.002	3.102	12.243
	65 C	60 C	1.211	2.214	.590	-3.359	5.781
		70 C	8.884 [*]	2.214	.001	4.313	13.454
	70 C	60 C	-7.673 [*]	2.214	.002	-12.243	-3.102
		65 C	-8.884 [*]	2.214	.001	-13.454	-4.313

Based on estimated marginal means

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.4 ผลการเปรียบเทียบค่าค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่งปกติ สำหรับปัจจัยเวลา

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: fracture

Tem p	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
60 C	3 hours	4 hours	22.301 [*]	2.214	.000	17.731	26.871
		5 hours	45.798 [*]	2.214	.000	41.228	50.368
		5.5 hours	55.684 [*]	2.214	.000	51.114	60.254
	4 hours	3 hours	-22.301 [*]	2.214	.000	-26.871	-17.731
		5 hours	23.497 [*]	2.214	.000	18.927	28.067
		5.5 hours	33.383 [*]	2.214	.000	28.813	37.953
	5 hours	3 hours	-45.798 [*]	2.214	.000	-50.368	-41.228
		4 hours	-23.497 [*]	2.214	.000	-28.067	-18.927
		5.5 hours	9.886 [*]	2.214	.000	5.316	14.456
	5.5 hours	3 hours	-55.684 [*]	2.214	.000	-60.254	-51.114
		4 hours	-33.383 [*]	2.214	.000	-37.953	-28.813
		5 hours	-9.886 [*]	2.214	.000	-14.456	-5.316
65 C	3 hours	4 hours	-25.928 [*]	2.214	.000	-21.357	30.498
		5 hours	55.990 [*]	2.214	.000	51.420	60.561
		5.5 hours	56.677 [*]	2.214	.000	52.107	61.247
	4 hours	3 hours	-25.928 [*]	2.214	.000	-30.498	-21.357
		5 hours	30.063 [*]	2.214	.000	25.492	34.633
		5.5 hours	30.749 [*]	2.214	.000	26.179	35.320
	5 hours	3 hours	-55.990 [*]	2.214	.000	-60.561	-51.420
		4 hours	-30.063 [*]	2.214	.000	-34.633	-25.492
		5.5 hours	.687	2.214	.759	-3.884	5.257
	5.5 hours	3 hours	-56.677 [*]	2.214	.000	-61.247	-52.107
		4 hours	-30.749 [*]	2.214	.000	-35.320	-26.179
		5 hours	-.687	2.214	.759	-5.257	3.884
70 C	3 hours	4 hours	44.275 [*]	2.214	.000	39.705	48.846
		5 hours	48.342 [*]	2.214	.000	43.772	52.912
		5.5 hours	47.044 [*]	2.214	.000	42.474	51.614
	4 hours	3 hours	-44.275 [*]	2.214	.000	-48.846	-39.705
		5 hours	4.067	2.214	.079	-.504	8.637
		5.5 hours	2.769	2.214	.223	-1.802	7.339
	5 hours	3 hours	-48.342 [*]	2.214	.000	-52.912	-43.772
		4 hours	-4.067	2.214	.079	-8.637	.504
		5.5 hours	-1.298	2.214	.563	-5.868	3.272
	5.5 hours	3 hours	-47.044 [*]	2.214	.000	-51.614	-42.474
		4 hours	-2.769	2.214	.223	-7.339	1.802
		5 hours	1.298	2.214	.563	-3.272	5.868

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the .05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งปกติ

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable:hardness

F	df1	df2	Sig.
1.212	11	48	.305

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งปกติ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	115.900 ^a	11	10.536	5.506	.000
Intercept	9613.321	1	9613.321	5.024E3	.000
Time	44.577	3	14.859	7.765	.000
Temp	6.811	2	3.406	1.780	.180
Time * Temp	64.511	6	10.752	5.619	.000
Error	91.850	48	1.914		
Total	9821.071	60			
Corrected Total	207.751	59			

a. R Squared = .558 (Adjusted R Squared = .457)

ตารางที่ ค.7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งปกติสำหรับ
ปัจจัยอุณหภูมิ

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: hardness

Time	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
3 hours	60 C	65 C	-.220	.875	.803	-1.979	1.539
		70 C	-2.668*	.875	.004	-4.427	-.909
	65 C	60 C	.220	.875	.803	-1.539	1.979
		70 C	-2.448*	.875	.007	-4.207	-.689
	70 C	60 C	2.668*	.875	.004	.909	4.427
		65 C	2.448*	.875	.007	.689	4.207
4 hours	60 C	65 C	.620	.875	.482	-1.139	2.379
		70 C	-.520	.875	.555	-2.279	1.239
	65 C	60 C	-.620	.875	.482	-2.379	1.139
		70 C	-1.139	.875	.199	-2.898	.620
	70 C	60 C	.520	.875	.555	-1.239	2.279
		65 C	1.139	.875	.199	-.620	2.898
5 hours	60 C	65 C	2.800*	.875	.002	1.041	4.559
		70 C	.212	.875	.809	-1.547	1.971
	65 C	60 C	-2.800*	.875	.002	-4.559	-1.041
		70 C	-2.588*	.875	.005	-4.347	-.829
	70 C	60 C	-.212	.875	.809	-1.971	1.547
		65 C	2.588*	.875	.005	.829	4.347
5.5 hours	60 C	65 C	-1.934*	.875	.032	-3.693	-.175
		70 C	-.968	.875	.274	-.791	2.727
	65 C	60 C	1.934*	.875	.032	.175	3.693
		70 C	2.902*	.875	.002	1.143	4.661
	70 C	60 C	-.968	.875	.274	-2.727	.791
		65 C	-2.902*	.875	.002	-4.661	-1.143

Based on estimated marginal means

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่งปกติสำหรับ
ปัจจัยเวลา

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: hardness

Tem p	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
60 C	3 hours	4 hours	-1.955 [*]	.875	.030	-3.714	-.196
		5 hours	-2.338 [*]	.875	.010	-4.097	-.579
		5.5 hours	-2.911 [*]	.875	.002	-4.670	-1.152
	4 hours	3 hours	1.955 [*]	.875	.030	.196	3.714
		5 hours	-.384	.875	.663	-2.143	1.375
		5.5 hours	-.956	.875	.280	-2.715	.803
	5 hours	3 hours	2.338 [*]	.875	.010	.579	4.097
		4 hours	.384	.875	.663	-1.375	2.143
		5.5 hours	-.573	.875	.516	-2.332	1.186
	5.5 hours	3 hours	2.911 [*]	.875	.002	1.152	4.670
		4 hours	.956	.875	.280	-.803	2.715
		5 hours	.573	.875	.516	-1.186	2.332
65 C	3 hours	4 hours	-1.116	.875	.208	-2.875	.643
		5 hours	.681	.875	.440	-1.078	2.440
		5.5 hours	-4.626 [*]	.875	.000	-6.385	-2.867
	4 hours	3 hours	1.116	.875	.208	-.643	2.875
		5 hours	1.797 [*]	.875	.045	.038	3.556
		5.5 hours	-3.510 [*]	.875	.000	-5.269	-1.751
	5 hours	3 hours	-.681	.875	.440	-2.440	1.078
		4 hours	-1.797 [*]	.875	.045	-3.556	-.038
		5.5 hours	-5.307 [*]	.875	.000	-7.066	-3.548
	5.5 hours	3 hours	4.626 [*]	.875	.000	2.867	6.385
		4 hours	3.510 [*]	.875	.000	1.751	5.269
		5 hours	5.307 [*]	.875	.000	3.548	7.066
70 C	3 hours	4 hours	-.193	.875	.826	-1.566	1.952
		5 hours	.542	.875	.539	-1.217	2.301
		5.5 hours	.724	.875	.412	-1.035	2.483
	4 hours	3 hours	-.193	.875	.826	-1.952	1.566
		5 hours	.349	.875	.692	-1.410	2.108
		5.5 hours	.531	.875	.547	-1.228	2.290
	5 hours	3 hours	-.542	.875	.539	-2.301	1.217
		4 hours	-.349	.875	.692	-2.108	1.410
		5.5 hours	.183	.875	.836	-1.576	1.942
	5.5 hours	3 hours	-.724	.875	.412	-2.483	1.035
		4 hours	-.531	.875	.547	-2.290	1.228
		5 hours	-.183	.875	.836	-1.942	1.576

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the .05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่งปกติ

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: stickiness

F	df1	df2	Sig.
1.675	11	48	.108

ตารางที่ ค.10 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่งปกติ

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: stickiness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	18.094 ^a	11	1.645	1.236	.290
Intercept	1049.331	1	1049.331	788.244	.000
Time	3.393	3	1.131	.850	.474
Temp	3.645	2	1.822	1.369	.264
Time * Temp	11.056	6	1.843	1.384	.240
Error	63.899	48	1.331		
Total	1131.324	60			
Corrected Total	81.993	59			

a. R Squared = .221 (Adjusted R Squared = .042)

ตารางที่ ค.11 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้ CaOH_2

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: fracture

F	df1	df2	Sig.
2.826	11	24	.016

ตารางที่ ค.12 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้ CaOH_2

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: fracture

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	8697.254 ^a	11	790.659	114.429	.000
Intercept	204881.310	1	204881.310	2.965E4	.000
Time	2434.803	3	811.601	117.460	.000
Temp	4596.277	2	2298.139	332.602	.000
Time * Temp	1666.174	6	277.696	40.190	.000
Error	165.830	24	6.910		
Total	213744.394	36			
Corrected Total	8863.084	35			

a. R Squared = .981 (Adjusted R Squared = .973)

ตารางที่ ค.13 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้ CaOH_2 สำหรับปัจจัยอุณหภูมิที่เวลา 3 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	-4.83400*	1.39650	.013	-8.2511	-1.4169
		70 C	3.14067	1.39650	.066	-.2764	6.5578
	65 C	60 C	4.83400*	1.39650	.013	1.4169	8.2511
		70 C	7.97467*	1.39650	.001	4.5576	11.3918
70 C	60 C	-3.14067	1.39650	.066	-6.5578	.2764	
	65 C	-7.97467*	1.39650	.001	-11.3918	-4.5576	

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.14 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย อุณหภูมิที่เวลา 4 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	-9.47200 [*]	.80475	.000	-11.4412	-7.5028
		70 C	13.30200 [*]	.80475	.000	11.3328	15.2712
	65 C	60 C	9.47200 [*]	.80475	.000	7.5028	11.4412
		70 C	22.77400 [*]	.80475	.000	20.8048	24.7432
	70 C	60 C	-13.30200 [*]	.80475	.000	-15.2712	-11.3328
		65 C	-22.77400 [*]	.80475	.000	-24.7432	-20.8048

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.15 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย อุณหภูมิที่เวลา 5 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	1.38300	1.10391	.257	-1.3182	4.0842
		70 C	27.85367 [*]	1.10391	.000	25.1525	30.5548
	65 C	60 C	-1.38300	1.10391	.257	-4.0842	1.3182
		70 C	26.47067 [*]	1.10391	.000	23.7695	29.1718
	70 C	60 C	-27.85367 [*]	1.10391	.000	-30.5548	-25.1525
		65 C	-26.47067 [*]	1.10391	.000	-29.1718	-23.7695

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.16 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย อุณหภูมิที่เวลา 5.5 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	-3.41400	3.82219	.406	-12.7666	5.9386
		70 C	42.36333 [*]	3.82219	.000	33.0108	51.7159
	65 C	60 C	3.41400	3.82219	.406	-5.9386	12.7666
		70 C	45.77733 [*]	3.82219	.000	36.4248	55.1299
	70 C	60 C	-42.36333 [*]	3.82219	.000	-51.7159	-33.0108
		65 C	-45.77733 [*]	3.82219	.000	-55.1299	-36.4248

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.17 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย เวลาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	5.60733 [*]	1.18357	.001	2.8780	8.3366
		5 hours	4.64233 [*]	1.18357	.004	1.9130	7.3716
		5.5 hours	8.46800 [*]	1.18357	.000	5.7387	11.1973
	4 hours	3 hours	-5.60733 [*]	1.18357	.001	-8.3366	-2.8780
		5 hours	-.96500	1.18357	.438	-3.6943	1.7643
		5.5 hours	2.86067 [*]	1.18357	.042	.1314	5.5900
	5 hours	3 hours	-4.64233 [*]	1.18357	.004	-7.3716	-1.9130
		4 hours	.96500	1.18357	.438	-1.7643	3.6943
		5.5 hours	3.82567 [*]	1.18357	.012	1.0964	6.5550
5.5 hours	3 hours	-8.46800 [*]	1.18357	.000	-11.1973	-5.7387	
	4 hours	-2.86067 [*]	1.18357	.042	-5.5900	-.1314	
	5 hours	-3.82567 [*]	1.18357	.012	-6.5550	-1.0964	

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.18 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย เวลาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	.96933	2.86473	.744	-5.6367	7.5754
		5 hours	10.85933*	2.86473	.005	4.2533	17.4654
		5.5 hours	9.88800*	2.86473	.009	3.2819	16.4941
	4 hours	3 hours	-.96933	2.86473	.744	-7.5754	5.6367
		5 hours	9.89000*	2.86473	.009	3.2839	16.4961
		5.5 hours	8.91867*	2.86473	.014	2.3126	15.5247
	5 hours	3 hours	-10.85933*	2.86473	.005	-17.4654	-4.2533
		4 hours	-9.89000*	2.86473	.009	-16.4961	-3.2839
		5.5 hours	-.97133	2.86473	.743	-7.5774	5.6347
	5.5 hours	3 hours	-9.88800*	2.86473	.009	-16.4941	-3.2819
		4 hours	-8.91867*	2.86473	.014	-15.5247	-2.3126
		5 hours	.97133	2.86473	.743	-5.6347	7.5774

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.19 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย เวลาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	15.76867*	2.05224	.000	11.0362	20.5011
		5 hours	29.35533*	2.05224	.000	24.6229	34.0878
		5.5 hours	47.69067*	2.05224	.000	42.9582	52.4231
	4 hours	3 hours	-15.76867*	2.05224	.000	-20.5011	-11.0362
		5 hours	13.58667*	2.05224	.000	8.8542	18.3191
		5.5 hours	31.92200*	2.05224	.000	27.1895	36.6545
	5 hours	3 hours	-29.35533*	2.05224	.000	-34.0878	-24.6229
		4 hours	-13.58667*	2.05224	.000	-18.3191	-8.8542
		5.5 hours	18.33533*	2.05224	.000	13.6029	23.0678
	5.5 hours	3 hours	-47.69067*	2.05224	.000	-52.4231	-42.9582
		4 hours	-31.92200*	2.05224	.000	-36.6545	-27.1895
		5 hours	-18.33533*	2.05224	.000	-23.0678	-13.6029

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.20 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง CaOH_2

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable:hardness

F	df1	df2	Sig.
1.003	11	48	.458

ตารางที่ ค.21 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง CaOH_2

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable:hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	222.548 ^a	11	20.232	11.942	.000
Intercept	8855.042	1	8855.042	5.227E3	.000
Time	36.109	3	12.036	7.105	.000
Temp	163.736	2	81.868	48.324	.000
Time * Temp	22.703	6	3.784	2.233	.056
Error	81.319	48	1.694		
Total	9158.909	60			
Corrected Total	303.867	59			

a. R Squared = .732 (Adjusted R Squared = .671)

ตารางที่ ค.22 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัย อุณหภูมิ

Multiple Comparisons

Dependent Variable:hardness

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	4.0010'	.41160	.000	3.1735	4.8286
		70 C	2.5239'	.41160	.000	1.6963	3.3515
	65 C	60 C	-4.0010'	.41160	.000	-4.8286	-3.1735
		70 C	-1.4772'	.41160	.001	-2.3047	-.6496
70 C	60 C	-2.5239'	.41160	.000	-3.3515	-1.6963	
	65 C	1.4772'	.41160	.001	.6496	2.3047	

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = 1.694.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.23 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัยเวลา

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	1.3493 [*]	.47528	.007	.3937	2.3049
		5 hours	-.4845	.47528	.313	-1.4401	.4711
		5.5 hours	1.1836 [*]	.47528	.016	.2280	2.1392
	4 hours	3 hours	-1.3493 [*]	.47528	.007	-2.3049	-.3937
		5 hours	-1.8338 [*]	.47528	.000	-2.7894	-.8782
		5.5 hours	-.1657	.47528	.729	-1.1213	.7899
	5 hours	3 hours	.4845	.47528	.313	-.4711	1.4401
		4 hours	1.8338 [*]	.47528	.000	.8782	2.7894
		5.5 hours	1.6681 [*]	.47528	.001	.7125	2.6237
5.5 hours	3 hours	-1.1836 [*]	.47528	.016	-2.1392	-.2280	
	4 hours	-.1657	.47528	.729	-.7899	1.1213	
	5 hours	-1.6681 [*]	.47528	.001	-2.6237	-.7125	

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 1.694.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.24 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง CaOH_2

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: stickiness

F	df1	df2	Sig.
.735	11	48	.700

ตารางที่ ค.25 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง CaOH_2

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: stickiness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	41.658 ^a	11	3.787	3.421	.001
Intercept	1104.495	1	1104.495	997.812	.000
Time	14.452	3	4.817	4.352	.009
Temp	8.651	2	4.325	3.908	.027
Time * Temp	18.554	6	3.092	2.794	.021
Error	53.132	48	1.107		
Total	1199.284	60			
Corrected Total	94.790	59			

a. R Squared = .439 (Adjusted R Squared = .311)

ตารางที่ ค.26 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง CaOH_2 สำหรับปัจจัยอุณหภูมิ

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: stickiness

Time	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
3 hours	60 C	65 C	.497	.665	.458	-.840	1.835
		70 C	.894	.665	.185	-.443	2.232
	65 C	60 C	-.497	.665	.458	-1.835	.840
		70 C	.397	.665	.554	-.941	1.735
	70 C	60 C	-.894	.665	.185	-2.232	.443
		65 C	-.397	.665	.554	-1.735	.941
4 hours	60 C	65 C	-2.362*	.665	.001	-3.700	-1.025
		70 C	-2.161*	.665	.002	-3.499	-.823
	65 C	60 C	2.362*	.665	.001	1.025	3.700
		70 C	.202	.665	.763	-1.136	1.539
	70 C	60 C	2.161*	.665	.002	.823	3.499
		65 C	-.202	.665	.763	-1.539	1.136
5 hours	60 C	65 C	-.727	.665	.280	-2.065	.611
		70 C	-1.410*	.665	.039	-2.748	-.073
	65 C	60 C	.727	.665	.280	-.611	2.065
		70 C	-.683	.665	.310	-2.021	.654
	70 C	60 C	1.410*	.665	.039	.073	2.748
		65 C	.683	.665	.310	-.654	2.021
5.5 hours	60 C	65 C	.035	.665	.959	-1.303	1.373
		70 C	-.942	.665	.163	-2.280	.396
	65 C	60 C	-.035	.665	.959	-1.373	1.303
		70 C	-.977	.665	.149	-2.315	.361
	70 C	60 C	.942	.665	.163	-.396	2.280
		65 C	.977	.665	.149	-.361	2.315

Based on estimated marginal means

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.27 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลความเหนียวของข้าวเหนียว CaOH_2 สำหรับปัจจัยเวลา

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: stickiness

Tem p	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
60 C	3 hours	4 hours	2.706 [*]	.665	.000	1.369	4.044
		5 hours	1.947 [*]	.665	.005	.609	3.285
		5.5 hours	.385	.665	.566	-.953	1.723
	4 hours	3 hours	-2.706 [*]	.665	.000	-4.044	-1.369
		5 hours	-.759	.665	.259	-2.097	.578
		5.5 hours	-2.322 [*]	.665	.001	-3.659	-.984
	5 hours	3 hours	-1.947 [*]	.665	.005	-3.285	-.609
		4 hours	.759	.665	.259	-.578	2.097
		5.5 hours	-1.562 [*]	.665	.023	-2.900	-.224
	5.5 hours	3 hours	-.385	.665	.566	-1.723	.953
		4 hours	2.322 [*]	.665	.001	.984	3.659
		5 hours	1.562 [*]	.665	.023	.224	2.900
65 C	3 hours	4 hours	-.153	.665	.819	-1.491	1.184
		5 hours	.723	.665	.283	-.615	2.060
		5.5 hours	-.078	.665	.907	-1.416	1.260
	4 hours	3 hours	.153	.665	.819	-1.184	1.491
		5 hours	.876	.665	.194	-.462	2.214
		5.5 hours	.076	.665	.910	-1.262	1.413
	5 hours	3 hours	-.723	.665	.283	-2.060	.615
		4 hours	-.876	.665	.194	-2.214	.462
		5.5 hours	-.800	.665	.235	-2.138	.537
	5.5 hours	3 hours	.078	.665	.907	-1.260	1.416
		4 hours	-.076	.665	.910	-1.413	1.262
		5 hours	.800	.665	.235	-.537	2.138
70 C	3 hours	4 hours	-.349	.665	.603	-1.687	.989
		5 hours	-.358	.665	.593	-1.696	.980
		5.5 hours	-1.452 [*]	.665	.034	-2.789	-.114
	4 hours	3 hours	.349	.665	.603	-.989	1.687
		5 hours	-.009	.665	.989	-1.347	1.329
		5.5 hours	-1.103	.665	.104	-2.441	.235
	5 hours	3 hours	.358	.665	.593	-.980	1.696
		4 hours	.009	.665	.989	-1.329	1.347
		5.5 hours	-1.094	.665	.107	-2.432	.244
	5.5 hours	3 hours	1.452 [*]	.665	.034	.114	2.789
		4 hours	1.103	.665	.104	-.235	2.441
		5 hours	1.094	.665	.107	-.244	2.432

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the .05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

ตารางที่ ค.28 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้ NaHCO_3

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: fracture

F	df1	df2	Sig.
4.933	11	24	.001

ตารางที่ ค.29 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้ NaHCO_3

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: fracture

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1907.628 ^a	11	173.421	25.761	.000
Intercept	247826.578	1	247826.578	3.681E4	.000
Time	761.455	3	253.818	37.703	.000
Temp	1050.055	2	525.027	77.990	.000
Time * Temp	96.119	6	16.020	2.380	.060
Error	161.568	24	6.732		
Total	249895.774	36			
Corrected Total	2069.196	35			

a. R Squared = .922 (Adjusted R Squared = .886)

ตารางที่ ค.30 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักข้าวนี้ NaHCO_3 สำหรับปัจจัย อุณหภูมิ

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	3.8440*	1.05924	.001	1.6578	6.0302
		70 C	-9.0404*	1.05924	.000	-11.2266	-6.8542
	65 C	60 C	-3.8440*	1.05924	.001	-6.0302	-1.6578
		70 C	-12.8844*	1.05924	.000	-15.0706	-10.6982
	70 C	60 C	9.0404*	1.05924	.000	6.8542	11.2266
		65 C	12.8844*	1.05924	.000	10.6982	15.0706

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = 6.732.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.31 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหักข้าวหนึ่ง NaHCO_3 สำหรับปัจจัย เวลา

Multiple Comparisons

Dependent Variable: fracture

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	1.3561	1.22311	.279	-1.1683	3.8805
		5 hours	6.2816 [*]	1.22311	.000	3.7572	8.8059
		5.5 hours	11.6931 [*]	1.22311	.000	9.1687	14.2175
	4 hours	3 hours	-1.3561	1.22311	.279	-3.8805	1.1683
		5 hours	4.9254 [*]	1.22311	.000	2.4011	7.4498
		5.5 hours	10.3370 [*]	1.22311	.000	7.8126	12.8614
	5 hours	3 hours	-6.2816 [*]	1.22311	.000	-8.8059	-3.7572
		4 hours	-4.9254 [*]	1.22311	.000	-7.4498	-2.4011
		5.5 hours	5.4116 [*]	1.22311	.000	2.8872	7.9359
	5.5 hours	3 hours	-11.6931 [*]	1.22311	.000	-14.2175	-9.1687
		4 hours	-10.3370 [*]	1.22311	.000	-12.8614	-7.8126
		5 hours	-5.4116 [*]	1.22311	.000	-7.9359	-2.8872

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 6.732.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.32 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง NaHCO_3

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: hardness

F	df1	df2	Sig.
1.196	9	40	.324

ตารางที่ ค.33 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง NaHCO_3

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	175.163 ^a	9	19.463	10.527	.000
Intercept	6981.004	1	6981.004	3.776E3	.000
Time	9.552	3	3.184	1.722	.178
Temp	147.324	2	73.662	39.844	.000
Time * Temp	14.129	4	3.532	1.911	.127
Error	73.950	40	1.849		
Total	7853.370	50			
Corrected Total	249.113	49			

a. R Squared = .703 (Adjusted R Squared = .636)

ตารางที่ ค.34 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งข้าวหนึ่ง NaHCO_3 สำหรับปัจจัย อุณหภูมิ

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	-3.8128 [*]	.42997	.000	-4.6819	-2.9438
		70 C	-1.0329	.52660	.057	-2.0973	.0314
	65 C	60 C	3.8128 [*]	.42997	.000	2.9438	4.6819
		70 C	2.7799 [*]	.52660	.000	1.7156	3.8442
	70 C	60 C	1.0329	.52660	.057	-.0314	2.0973
		65 C	-2.7799 [*]	.52660	.000	-3.8442	-1.7156

Based on observed means.
The error term is Mean Square(Error) = 1.849.

*. The mean difference is significant at the .05 level.

ตารางที่ ค.35 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง NaHCO_3

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: stickiness

F	df1	df2	Sig.
2.735	9	40	.014

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept + Time + Temp + Time * Temp

ตารางที่ ค.36 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง NaHCO_3

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: stickiness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	16.387 ^a	9	1.821	1.355	.241
Intercept	964.163	1	964.163	717.418	.000
Time	4.495	3	1.498	1.115	.354
Temp	8.330	2	4.165	3.099	.056
Time * Temp	3.049	4	.762	.567	.688
Error	53.757	40	1.344		
Total	1117.143	50			
Corrected Total	70.145	49			

a. R Squared = .234 (Adjusted R Squared = .061)

ตารางที่ ค.37 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลร้อยละแตกหักของชิ้น Ultrasonic

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: fracture

F	df1	df2	Sig.
1.394	11	24	.238

ตารางที่ ค.38 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลร้อยละแตกหักของชิ้น Ultrasonic

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: fracture

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	21343.047 ^a	11	1940.277	229.211	.000
Intercept	89516.352	1	89516.352	1.057E4	.000
Time	19046.974	3	6348.991	750.025	.000
Temp	1165.444	2	582.722	68.839	.000
Time * Temp	1130.628	6	188.438	22.261	.000
Error	203.161	24	8.465		
Total	111062.559	36			
Corrected Total	21546.208	35			

a. R Squared = .991 (Adjusted R Squared = .986)

ตารางที่ ค.39 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวนี้
Ultrasonic สำหรับปัจจัยอุณหภูมิ

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: fracture

Time	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
3 hours	60 C	65 C	7.715 [*]	2.376	.003	2.812	12.618
		70 C	9.283 [*]	2.376	.001	4.380	14.186
	65 C	60 C	-7.715 [*]	2.376	.003	-12.618	-2.812
		70 C	1.568	2.376	.516	-3.335	6.471
	70 C	60 C	-9.283 [*]	2.376	.001	-14.186	-4.380
		65 C	-1.568	2.376	.516	-6.471	3.335
4 hours	60 C	65 C	21.995 [*]	2.376	.000	17.092	26.898
		70 C	29.983 [*]	2.376	.000	25.080	34.886
	65 C	60 C	-21.995 [*]	2.376	.000	-26.898	-17.092
		70 C	7.989 [*]	2.376	.003	3.086	12.892
	70 C	60 C	-29.983 [*]	2.376	.000	-34.886	-25.080
		65 C	-7.989 [*]	2.376	.003	-12.892	-3.086
5 hours	60 C	65 C	-11.493 [*]	2.376	.000	-16.396	-6.590
		70 C	6.457 [*]	2.376	.012	1.554	11.360
	65 C	60 C	11.493 [*]	2.376	.000	6.590	16.396
		70 C	17.950 [*]	2.376	.000	13.047	22.853
	70 C	60 C	-6.457 [*]	2.376	.012	-11.360	-1.554
		65 C	-17.950 [*]	2.376	.000	-22.853	-13.047
5.5 hours	60 C	65 C	10.241 [*]	2.376	.000	5.338	15.144
		70 C	10.021 [*]	2.376	.000	5.118	14.924
	65 C	60 C	-10.241 [*]	2.376	.000	-15.144	-5.338
		70 C	-.220	2.376	.927	-5.123	4.683
	70 C	60 C	-10.021 [*]	2.376	.000	-14.924	-5.118
		65 C	.220	2.376	.927	-4.683	5.123

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the .05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

ตารางที่ ค.40 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย main effect ของข้อมูลร้อยละแตกหักของข้าวหนึ่ง
Ultrasonic สำหรับปัจจัยเวลา

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: fracture

Tem p	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
						Lower Bound	Upper Bound
60 C	3 hours	4 hours	10.892 [*]	2.376	.000	5.989	15.795
		5 hours	50.133 [*]	2.376	.000	45.230	55.036
		5.5 hours	60.692 [*]	2.376	.000	55.789	65.595
	4 hours	3 hours	-10.892 [*]	2.376	.000	-15.795	-5.989
		5 hours	39.241 [*]	2.376	.000	34.338	44.144
		5.5 hours	49.800 [*]	2.376	.000	44.897	54.703
	5 hours	3 hours	-50.133 [*]	2.376	.000	-55.036	-45.230
		4 hours	-39.241 [*]	2.376	.000	-44.144	-34.338
		5.5 hours	10.559 [*]	2.376	.000	5.656	15.462
	5.5 hours	3 hours	-60.692 [*]	2.376	.000	-65.595	-55.789
		4 hours	-49.800 [*]	2.376	.000	-54.703	-44.897
		5 hours	-10.559 [*]	2.376	.000	-15.462	-5.656
65 C	3 hours	4 hours	25.172 [*]	2.376	.000	20.269	30.075
		5 hours	30.925 [*]	2.376	.000	26.022	35.828
		5.5 hours	63.218 [*]	2.376	.000	58.315	68.121
	4 hours	3 hours	-25.172 [*]	2.376	.000	-30.075	-20.269
		5 hours	5.753 [*]	2.376	.023	.850	10.656
		5.5 hours	38.046 [*]	2.376	.000	33.143	42.949
	5 hours	3 hours	-30.925 [*]	2.376	.000	-35.828	-26.022
		4 hours	-5.753 [*]	2.376	.023	-10.656	-.850
		5.5 hours	32.294 [*]	2.376	.000	27.391	37.197
	5.5 hours	3 hours	-63.218 [*]	2.376	.000	-68.121	-58.315
		4 hours	-38.046 [*]	2.376	.000	-42.949	-33.143
		5 hours	-32.294 [*]	2.376	.000	-37.197	-27.391
70 C	3 hours	4 hours	31.593 [*]	2.376	.000	26.690	36.496
		5 hours	47.307 [*]	2.376	.000	42.404	52.210
		5.5 hours	61.431 [*]	2.376	.000	56.528	66.334
	4 hours	3 hours	-31.593 [*]	2.376	.000	-36.496	-26.690
		5 hours	15.714 [*]	2.376	.000	10.811	20.617
		5.5 hours	29.838 [*]	2.376	.000	24.935	34.741
	5 hours	3 hours	-47.307 [*]	2.376	.000	-52.210	-42.404
		4 hours	-15.714 [*]	2.376	.000	-20.617	-10.811
		5.5 hours	14.124 [*]	2.376	.000	9.221	19.027
	5.5 hours	3 hours	-61.431 [*]	2.376	.000	-66.334	-56.528
		4 hours	-29.838 [*]	2.376	.000	-34.741	-24.935
		5 hours	-14.124 [*]	2.376	.000	-19.027	-9.221

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the .05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Least Significant Difference (equivalent to no adjustments).

ตารางที่ ค.41 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง Ultrasonic

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: hardness

F	df1	df2	Sig.
2.389	11	48	.019

ตารางที่ ค.42 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง Ultrasonic

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	157.502 ^a	11	14.318	5.546	.000
Intercept	8390.334	1	8390.334	3.250E3	.000
Time	12.888	3	4.296	1.664	.187
Temp	36.733	2	18.367	7.114	.002
Time * Temp	107.881	6	17.980	6.964	.000
Error	123.925	48	2.582		
Total	8671.761	60			
Corrected Total	281.427	59			

a. R Squared = .560 (Adjusted R Squared = .459)

ตารางที่ ค.43 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของข้าวหนึ่ง Ultrasonic สำหรับปัจจัยอุณหภูมิที่เวลา 3 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	2.09360	.99657	.057	-.0777	4.2649
		70 C	-1.62080	.99657	.130	-3.7921	.5505
	65 C	60 C	-2.09360	.99657	.057	-4.2649	.0777
	70 C	60 C	1.62080	.99657	.130	-.5505	3.7921
		65 C	3.71440*	.99657	.003	1.5431	5.8857

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.44 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของชิ้นงาน Ultrasonic สำหรับปัจจัยอุณหภูมิที่เวลา 4 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	2.80780	1.41417	.070	-.2734	5.8890
		70 C	-2.07720	1.41417	.168	-5.1584	1.0040
	65 C	60 C	-2.80780	1.41417	.070	-5.8890	.2734
		70 C	-4.88500 [*]	1.41417	.005	-7.9662	-1.8038
	70 C	60 C	2.07720	1.41417	.168	-1.0040	5.1584
		65 C	4.88500 [*]	1.41417	.005	1.8038	7.9662

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.45 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของชิ้นงาน Ultrasonic สำหรับปัจจัยอุณหภูมิที่เวลา 5 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I- J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	1.78840 [*]	.74837	.034	.1578	3.4190
		70 C	2.25980 [*]	.74837	.011	.6292	3.8904
	65 C	60 C	-1.78840 [*]	.74837	.034	-3.4190	-.1578
		70 C	-.47140	.74837	.541	-1.1592	2.1020
	70 C	60 C	-2.25980 [*]	.74837	.011	-3.8904	-.6292
		65 C	-.47140	.74837	.541	-2.1020	1.1592

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.46 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของขั้วนึ่ง Ultrasonic สำหรับปัจจัย อุณหภูมิที่เวลา 5.5 ชั่วโมง

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Tem p	(J) Tem p	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	60 C	65 C	.75620	.76010	.339	-.8999	2.4123
		70 C	3.58080 [*]	.76010	.001	1.9247	5.2369
	65 C	60 C	-.75620	.76010	.339	-2.4123	.8999
		70 C	2.82460 [*]	.76010	.003	1.1685	4.4807
	70 C	60 C	-3.58080 [*]	.76010	.001	-5.2369	-1.9247
		65 C	-2.82460 [*]	.76010	.003	-4.4807	-1.1685

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.47 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของขั้วนึ่ง Ultrasonic สำหรับปัจจัย เวลาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Multiple Comparisons

Dependent Variable: hardness

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	-.62540	1.45211	.672	-3.7037	2.4529
		5 hours	-1.66600	1.45211	.268	-4.7443	1.4123
		5.5 hours	-2.58220	1.45211	.094	-5.6605	.4961
	4 hours	3 hours	.62540	1.45211	.672	-2.4529	3.7037
		5 hours	-1.04060	1.45211	.484	-4.1189	2.0377
		5.5 hours	-1.95680	1.45211	.197	-5.0351	1.1215
	5 hours	3 hours	1.66600	1.45211	.268	-1.4123	4.7443
		4 hours	1.04060	1.45211	.484	-2.0377	4.1189
		5.5 hours	-.91620	1.45211	.537	-3.9945	2.1621
	5.5 hours	3 hours	2.58220	1.45211	.094	-.4961	5.6605
		4 hours	1.95680	1.45211	.197	-1.1215	5.0351
		5 hours	.91620	1.45211	.537	-2.1621	3.9945

ตารางที่ ค.48 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของชิ้นงาน Ultrasonic สำหรับปัจจัย เวลาที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

Multiple Comparisons

Dependent Variable:hardness

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	.08880	.74657	.907	-1.4939	1.6715
		5 hours	-1.97120 [*]	.74657	.018	-3.5539	-.3885
		5.5 hours	-3.91960 [*]	.74657	.000	-5.5023	-2.3369
	4 hours	3 hours	-.08880	.74657	.907	-1.6715	1.4939
		5 hours	-2.06000 [*]	.74657	.014	-3.6427	-.4773
		5.5 hours	-4.00840 [*]	.74657	.000	-5.5911	-2.4257
	5 hours	3 hours	1.97120 [*]	.74657	.018	.3885	3.5539
		4 hours	2.06000 [*]	.74657	.014	.4773	3.6427
		5.5 hours	-1.94840 [*]	.74657	.019	-3.5311	-.3657
	5.5 hours	3 hours	3.91960 [*]	.74657	.000	2.3369	5.5023
		4 hours	4.00840 [*]	.74657	.000	2.4257	5.5911
		5 hours	1.94840 [*]	.74657	.019	.3657	3.5311

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.49 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลความแข็งของชิ้นงาน Ultrasonic สำหรับปัจจัย เวลาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

Multiple Comparisons

Dependent Variable:hardness

	(I) Time	(J) Time	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	3 hours	4 hours	-1.08180	.65736	.119	-2.4753	.3117
		5 hours	2.21460 [*]	.65736	.004	.8211	3.6081
		5.5 hours	2.61940 [*]	.65736	.001	1.2259	4.0129
	4 hours	3 hours	1.08180	.65736	.119	-.3117	2.4753
		5 hours	3.29640 [*]	.65736	.000	1.9029	4.6899
		5.5 hours	3.70120 [*]	.65736	.000	2.3077	5.0947
	5 hours	3 hours	-2.21460 [*]	.65736	.004	-3.6081	-.8211
		4 hours	-3.29640 [*]	.65736	.000	-4.6899	-1.9029
		5.5 hours	.40480	.65736	.547	-.9887	1.7983
	5.5 hours	3 hours	-2.61940 [*]	.65736	.001	-4.0129	-1.2259
		4 hours	-3.70120 [*]	.65736	.000	-5.0947	-2.3077
		5 hours	-.40480	.65736	.547	-1.7983	.9887

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

ตารางที่ ค.50 ผลการทดสอบความแปรปรวนของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง Ultrasonic

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

Dependent Variable: stickiness

F	df1	df2	Sig.
2.354	11	48	.020

ตารางที่ ค.51 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลความเหนียวของข้าวหนึ่ง Ultrasonic

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: stickiness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	19.629 ^a	11	1.784	1.187	.321
Intercept	1065.173	1	1065.173	708.753	.000
Time	4.829	3	1.610	1.071	.370
Temp	7.842	2	3.921	2.609	.084
Time * Temp	6.958	6	1.160	.772	.596
Error	72.138	48	1.503		
Total	1156.940	60			
Corrected Total	91.767	59			

a. R Squared = .214 (Adjusted R Squared = .034)

ตารางที่ ค.52 ผลการทดสอบ ANOVA ของข้อมูลการเปรียบเทียบร้อยละแตกหัก ความแข็ง และความเหนียว

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
fracture	Between Groups	757.923	3	252.641	31.181	.000
	Within Groups	64.820	8	8.102		
	Total	822.742	11			
hardness	Between Groups	15.996	3	5.332	3.861	.030
	Within Groups	22.094	16	1.381		
	Total	38.091	19			
stickiness	Between Groups	5.418	3	1.806	1.387	.283
	Within Groups	20.838	16	1.302		
	Total	26.256	19			

ตารางที่ ค.53 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลร้อยละแตกหัก ความแข็ง และความเหนียวของข้าวหนึ่งวิธีต่างๆและข้าวธรรมดา

Multiple Comparisons

LSD

Dependent Variable	(i) condition	(j) condition	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
fracture	ปกติ	บุนเฝส	-4.76324	2.32414	.075	-10.1227	.5962
		อิลตราซนค	13.79009*	2.32414	.000	8.4306	19.1496
		ซาวสาร	-6.43895*	2.32414	.024	-11.7984	-1.0795
	บุนเฝส	ปกติ	4.76324	2.32414	.075	-.5962	10.1227
		อิลตราซนค	18.55333*	2.32414	.000	13.1939	23.9128
		ซาวสาร	-1.67571	2.32414	.491	-7.0352	3.6838
	อิลตราซนค	ปกติ	-13.79009*	2.32414	.000	-19.1496	-8.4306
		บุนเฝส	-18.55333*	2.32414	.000	-23.9128	-13.1939
		ซาวสาร	-20.22905*	2.32414	.000	-25.5885	-14.8696
	ซาวสาร	ปกติ	6.43895*	2.32414	.024	1.0795	11.7984
		บุนเฝส	1.67571	2.32414	.491	-3.6838	7.0352
		อิลตราซนค	20.22905*	2.32414	.000	14.8696	25.5885
hardness	ปกติ	บุนเฝส	-1.09860	.74321	.159	-2.6741	.4769
		อิลตราซนค	-.07420	.74321	.922	-1.6497	1.5013
		ซาวสาร	-2.19660*	.74321	.009	-3.7721	-.6211
	บุนเฝส	ปกติ	1.09860	.74321	.159	-.4769	2.6741
		อิลตราซนค	1.02440	.74321	.187	-.5511	2.5999
		ซาวสาร	-1.09800	.74321	.159	-2.6735	.4775
	อิลตราซนค	ปกติ	-.07420	.74321	.922	-1.5013	1.6497
		บุนเฝส	-1.02440	.74321	.187	-2.5999	.5511
		ซาวสาร	-2.12240*	.74321	.011	-3.6979	-.5469
	ซาวสาร	ปกติ	2.19660*	.74321	.009	.6211	3.7721
		บุนเฝส	1.09800	.74321	.159	-.4775	2.6735
		อิลตราซนค	2.12240*	.74321	.011	.5469	3.6979
stickiness	ปกติ	บุนเฝส	-1.28320	.72176	.094	-2.8133	.2469
		อิลตราซนค	-.93200	.72176	.215	-2.4621	.5981
		ซาวสาร	-1.26000	.72176	.100	-2.7901	.2701
	บุนเฝส	ปกติ	1.28320	.72176	.094	-.2469	2.8133
		อิลตราซนค	.35120	.72176	.633	-1.1789	1.8813
		ซาวสาร	-.02320	.72176	.975	-1.5069	1.5533
	อิลตราซนค	ปกติ	.93200	.72176	.215	-.5981	2.4621
		บุนเฝส	-.35120	.72176	.633	-1.8813	1.1789
		ซาวสาร	-.32800	.72176	.656	-1.8581	1.2021
	ซาวสาร	ปกติ	1.26000	.72176	.100	-.2701	2.7901
		บุนเฝส	-.02320	.72176	.975	-1.5533	1.5069
		อิลตราซนค	.32800	.72176	.656	-1.2021	1.8581

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่






The 11th TSAE International Conference
 การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 19
26-27 APRIL 2018
 Chulabhorn International Convention Center
 (Wora Wana Hua Hin Hotel & Convention)
 Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand

วิศวกรรมเกษตร
 เปิดแนวคิดวิศวกรรมสู่การเกษตรแนวใหม่
AGRICULTURAL ENGINEERING
 Imagineering Novel Agriculture

Topics of Oral and Poster Presentation

- Power and machinery
- Soil and water engineering
- Post-harvest and food engineering
- Structures and buildings
- Agricultural systems
- Electronics and information technology
- Energy and environment

สารบัญ (Content)		Page
	ของในมีดจอบหมุน	
NM15-49	การออกแบบและสร้างเครื่องคิดแบบเบนคูลีน	309
NM16-50	เครื่องสับย่อยทะเลสาบปาล์ม น้ำมัน โดยใช้ต้นกำลังจากเพลอาอานวยกำลังของรถแทรกเตอร์	313
NM17-51	เทคโนโลยีสมรรถนะเครื่องมือพรวนดินกลับปุ๋ยและกำจัดวัชพืชในแปลงถั่วลิสงหลังแบบใช้แรงคน	318
NM18-52	การออกแบบและสร้างเครื่องปลูก และย่อยทางปาล์มน้ำมัน	324
NM19-53	การพัฒนาเครื่องปลูกมีวาระครุดแบบกึ่งอัตโนมัติ	330
NM20-54	การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเครื่องใส่ปุ๋ยแบบหยอดหลุมอัตโนมัติสำหรับพืชสวน	334
NM21-55	วิจัยและพัฒนาเครื่องตีแอมผลปาล์มน้ำมันจากทะเลสาบ	338
กลุ่มวิศวกรรมชลประทาน ดินและน้ำ		
NI01-15	การจำลองผลกระทบไหลร่วมกับการใช้น้ำเพื่อการเกษตร ในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี	342
NI02-16	การพิจารณาแบบจำลองกำหนดการให้น้ำอ้อย	350
NI03-17	การแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศกับการผลิตอ้อยแบบอาศัยน้ำฝน	357
NI04-18	สถานีเคลื่อนที่สำหรับตรวจข้อมูลดิน และให้น้ำอัตโนมัติพลังงานแสงอาทิตย์	363
NI05-19	การแบ่งเขตปริมาณน้ำที่มีลักษณะเหมือนกันในพื้นที่อีสานใต้	367
กลุ่มเทคโนโลยีและวิศวกรรมอาหาร		
NF02-21	การเพิ่มกรดคลอโรจิกในเมล็ดข้าวโดยกระบวนการทำข้าวนึ่ง	373
NF03-29	เครื่องพาสเจอร์ไรซ์น้ำผลไม้แบบเทอร์โมไซเฟอน	378
NF04-30	ผลของปริมาณน้ำและอายุการเก็บรักษาต่อค่าความแข็งของเมล็ดข้าวหอมมะลิ กข 105 และ ข้าวเหนียว กข 6	384
NF05-31	ผลกระบวนการทำข้าวนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพการขัดสีและสมบัติทางกล	388
NF06-32	การศึกษาวิธีหุงข้าวเหนียวโดยใช้เตาอบไมโครเวฟ	396
NF07-33	ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการผลิตผักผลไม้แช่แข็งจากผักผลไม้คองแยม	402
NF08-34	การศึกษาแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวนึ่ง	410
กลุ่มโกลด์คิลล์และเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว		
NL01-22	การพัฒนาและทดลองคั่วแยกเกรดแดงไม่ด้วยการประมวลผลดิจิทัล	414
NL02-23	การผสมผสานความแม่นยำสำหรับลักษณะสเปกตรัมของวิลเบิ้ล-ฮอร์ทเวทเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีสำหรับการวัดค่าคุณภาพของอ้อยสำ	421
NL03-24	การวัดคุณภาพของเมียงจัดแบบไม่ทำลายด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดแบบพกพา	426
NL04-25	การทำนายค่าโมดูลัสแตกหักไม่ยางพาราแปรรูปอบแห้งด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้	432
NL05-62	ผลกระทบจากการจัดการไหลอากาศร้อนต่อความสม่ำเสมอของความชื้นในการอบแห้งมะคาเดเมีย	438

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561



การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

Available online at www.tsae.asia

การศึกษาแนวทางปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวเหนียว

Feasibility Study of Improving the Physical Properties of Parboiled Rice

พิศุทธิ์ ไม้ซุน¹, ประสันต์ ชูมใจฉาย^{1*}

Pisut Maichoon¹, Prasan Choomjaihan^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 10520

²Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-2-329-8337-8, Fax: +66-23-298-336, E-mail: prasan.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายหลักของการทำข้าวเหนียวคือการปรับปรุงข้าวคุณภาพดีให้มีคุณภาพในการสีที่ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะการลดเปอร์เซ็นต์การแตกหักของเมล็ดข้าว อย่างไรก็ตามการใส่ข้าวเหนียวส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลบางประการเมล็ดข้าวด้วยเช่นกัน การทำข้าวเหนียวทำให้ค่าความแข็งของข้าวเหนียวสูงขึ้น และ ค่าความเหนียวของเมล็ดข้าวลดลง ส่งผลทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสทางการรับประทานได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านการนึ่ง การใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างใช้อุตสาหกรรมอาหารเพื่อมุ่งเน้นให้โครงสร้างไฟเบอร์ของวัตถุดิบในอุตสาหกรรมนั้นๆลดความแข็งลงเพื่อนำไปใช้ตามวัตถุประสงค์ของอุตสาหกรรมนั้นๆ หากมีการประยุกต์ใช้สารละลายด่างในอุตสาหกรรมข้าวเหนียวน่าจะช่วยลดความแข็งของไฟเบอร์ในชั้นรำของเมล็ดข้าวลงได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงความแข็งและค่าการยึดติดของเมล็ดข้าวเหนียวผ่านกระบวนการทำนึ่งโดยใช้สารละลายด่าง ผลการทดลองพบว่า การใช้สารละลาย CaOH_2 ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดโดยพบว่าค่าความแข็งของข้าวเหนียวที่แช่ข้าวเหนียวปกติ และ ไม่แช่แตกต่างกันค่าความแข็งของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำนึ่ง สำหรับค่าความเหนียวและร้อยละการแตกหักมีค่าไม่แตกต่างกันจากข้าวกล้องนึ่งปกติ

คำสำคัญ: ข้าวเหนียว, สารละลายเบส, คุณสมบัติเชิงกล

Abstract

The main purpose of making parboiled rice is to improve rice quality, especially decreasing fracture of the kernel which leading to reduce the percentage of broken kernel. However, the parboiled rice also affects the mechanical properties of rice kernel; particularly, the grain hardness and stickiness. The hardness of kernel is increased, while the stickiness of the kernel is decreased. High acidic degree solution (base solution) is being used in food industry to focus on reducing the hardness of the fiber structure of raw material for the particular purposes. Rice also contains fiber which located mainly on the bran layer. Therefore, the uses a base solution in the rice industry in order to reduce the grain hardness was applied. Thus, the aim of this study is to improve the hardness and stickiness of the grain through a parboiling process using a base solution. The result show that the the base solution prepared from CaOH_2 improved mechanical properties. The hardness of parboiled rice which was soaked in CaOH_2 solution was lower than the hardness of normal parboiled rice prepared from normal process and it was not significantly different with the normal brown rice. For the stickiness property and the percentage of broken kernel were not significantly different from the parboiled rice from the normal process.

Keywords: Parboiled rice, Base solution, Mechanical properties

1 บทนำ

ข้าวเป็นอาหารพื้นฐานที่ผู้คนมากกว่า 100 ประเทศทั่วโลกนิยมรับประทาน (OMN, 1994) เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ได้จากคาร์โบไฮเดรต รวมไปถึงสารอาหารที่จำเป็นเช่น วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ (สุนทร, 2553) ซึ่งก่อนที่ข้าวจะรับประทาน

สามารถนำมารับประทานได้จะต้องผ่านกระบวนการสีข้าวที่ประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆคือ การเพาะปลูก การจัดการ และการคัดขนาด ซึ่งในขั้นตอนการจัดการข้าวนี้เองที่เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณสารอาหารในข้าวเนื่องจากวิตามินและแร่ธาตุต่างๆส่วนใหญ่จะอยู่ที่ชั้นรำ วิธีการหนึ่งที่จะช่วยรักษาและลด

การสูญเสียของสารอาหารต่างๆ เหล่านี้เป็นวิธีหนึ่งคือ การทำนึ่งข้าว (A. Kyritsi, C. Tzia and V.T. Karathanos, 2011)

กระบวนการทำข้าวนึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนหลักคั้งนี้ การแช่ การนึ่ง และการอบแห้ง (Velupillai & Verme, 1982) โดยในแต่ละขั้นตอนจะมีกระบวนการต่างๆ เกิดขึ้น ขั้นตอนการแช่จะเกิดกระบวนการร่อนของเหลว (น้ำ) เข้าไปในเมล็ดจนถึงสภาวะอิ่มตัว ขั้นตอนการนึ่งจะเกิดกระบวนการละลายฟอสเฟตของแป้ง กระบวนการรีโพรเกรตชัน การเสียสภาพของโปรตีน และการเชื่อมต่อกันของพันธะไดซัลไฟด์ โดยการนึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดคุณภาพคุณสมบัติสุดท้ายของข้าวนึ่งยกตัวอย่างเช่น สีของข้าวนึ่ง รวมถึงความแข็งของข้าวนึ่ง ซึ่งการนึ่งจะเกิดขึ้นในกระบวนการแช่ และกระบวนการอบแห้ง ขั้นตอนการอบแห้งเป็นขั้นตอนกระบวนการที่นำข้าวมาอบในเมล็ดข้าวออก โดยเมล็ดข้าวยังคงกักเก็บสารอาหารสำคัญไว้อยู่ในเนื้อข้าว

ในขั้นตอนการแช่น้ำวิตามินและแร่ธาตุต่างๆที่สามารถละลายน้ำได้จะออกมาโดยน้ำให้เคลื่อนที่จากส่วนด้านนอก (ชั้นกลีบ และชั้นข้าว) เข้าไปคุณสมบัติทางสารอาหารต่างๆของเมล็ดข้าวเปลี่ยนไปหลังจากผ่านกระบวนการนึ่ง ปัจจุบันจึงได้มีการทำข้าวเสริมสารสำคัญต่างๆ โดยผ่านกระบวนการทำข้าวนี้ ซึ่งได้แก่ การเสริมธาตุสังกะสี การเสริมสารไฟแลค ข้าวเสริมคาเทชิน (ChanakanProm-u-thai, 2010; KarieKam, 2012; อภนิษฐ์, 2558)

นอกจากคุณสมบัติทางสารอาหารภายในเมล็ดข้าวที่เปลี่ยนไปแล้วนั้น คุณสมบัติทางกลบางประการที่เปลี่ยนคือ ความแข็ง และความเหนียวของเมล็ดข้าว มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยความแข็งของข้าวนี้แบ่งมาจาก 2 ประเด็นใหญ่ๆ คือ การทำข้าวนึ่งเป็นการทำให้ข้าวสุกมีการสุกบางส่วน (partly cooked) ดังนั้นจึงทำให้ข้าวนึ่งเมื่อนำไปหุงจะไม่สามารถดูดซับน้ำและขยายตัวได้ดีเมื่อเทียบกับข้าวปกติ อีกสาเหตุหนึ่งคือชั้นข้าวของเมล็ดข้าวนี้ เนื่องจากชั้นข้าวมีโครงสร้างหลักเป็นไฟเบอร์ และเมื่อเกิดการให้ความร้อนกับโครงสร้างไฟเบอร์แล้วนั้น โครงสร้างไฟเบอร์จะเกิดการหดตัวส่งผลให้เกิดความเครียดสะสมภายในโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความแข็งของเมล็ดข้าว วิธีการที่นำไฟเบอร์โครงสร้างไฟเบอร์คล้ายค้ำมัน ได้มีการนำสารละลายต่างๆมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายหลายประเภท เช่นอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมสิ่งทอ

นอกจากนี้ยังมีวิจัยที่สอดคล้องกันได้ทดสอบกับไฟเบอร์ของพืชที่มีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยกระบวนการแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นระดับความเป็นกรดต่างๆกัน ส่งผลให้คุณภาพทางกายภาพของไฟเบอร์นั้นมีลักษณะเป็นตามความต้องการ (Norlin, 2011)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้สารละลายเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของข้าวนี้

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าว

ข้าวเปลือกพันธุ์ หอมมะลิ105 จากเขตพื้นที่ หุงกลาร่องให้ทำการเก็บเกี่ยว พ.ศ. 2559 ที่ผ่านการทำความสะอาดเพื่อคัดแยกสิ่งเจือปนออก ถูกนำมาใช้ตลอดการทดลอง

2.2 การเตรียมสารละลายต่างๆสำหรับการแช่ข้าว

นำปูนแดง (CaOH₂) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) มาผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:64 g จากนั้นคนให้เข้ากันและทิ้งไว้เป็นเวลา 12 h สำหรับน้ำปูนใสเพื่อให้เกิดการแตกตัวของเนื้อปูนสีแดงจนเหลือแต่ปัสาสีใสด้านบน ในส่วนของโซเดียมไบคาร์บอเนต เมื่อคนเข้ากันแล้วสามารถนำไปใช้ได้ทันที

2.3 การทำข้าวนึ่ง

นำข้าวเปลือกที่สะอาด แชลงในน้ำเปล่าและสารละลายต่างๆที่เตรียมไว้ในข้อ 2.2 ตัวอย่างละ 200 g และควบคลุมหมวกที่เปียก และสารละลายต่างๆให้คงที่ที่ 60 °C เป็นเวลา 5 h 30 min จากนั้นนำข้าวที่ผ่านการแช่น้ำในอุณหภูมิไอน้ำที่ 90 °C เป็นเวลา 10 min หลังจากนั้นข้าวที่ผ่านขั้นตอนการนึ่งจะถูกลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C จนมีความชื้นเมล็ดข้าวประมาณ 14 %wb โดยมีการทดลองจำนวน 3 ครั้ง ในทุกสภาวะ

2.4 การหุงหรือการต้มกึ่ง

นำข้าวที่ผ่านกระบวนการนึ่งทั้ง 3 สภาวะผ่านกระบวนการสีกด้วยเครื่องเพาะเปลือกข้าวแบบลูกยางคู่ SATAKE รุ่น THU จากนั้นนำข้าวที่ได้มาคัดขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงกลมทรงกระบอก เพื่อแยกต้นข้าวและข้าวหักออกจากกัน เพื่อนำจำนวนข้าวร้อยละการแตกหักและวัชพืชที่หลงเหลือต่อไป

2.5 การเตรียมตัวอย่างข้าวสำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล

นำข้าวกล้อง และข้าวที่ผ่านการนึ่งทั้ง 3 สภาวะ อย่างละ 3 กรัม มาหุงต้มในปริมาณที่ให้ได้ส่วนของข้าวต่อน้ำที่ 1:2.5 g ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 min เมื่อหุงข้าวเสร็จแล้วนำตัวอย่างข้าวจำนวน 3 g ในทุกสภาวะ ใส่ในภาชนะควบคุมอุณหภูมิเพื่อรอสำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล

2.6 การทดสอบของคุณสมบัติเชิงกลของเมล็ดข้าว

นำตัวอย่างข้าวที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 2.5 มาทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Texture Analyzer รุ่น T/HD Plus, Stable Micro System, UK โดยใช้หัวกดแบบ Back extrusion กำหนดให้ความเร็วในการกดและความเร็วในขณะถอนหัวกดเท่ากับ 1 mm.s⁻¹ ระยะกดเท่ากับ 99 mm จากนั้นนำข้าวจำนวน 3 กรัม ใส่ในบรรจุลงในกระบอกสแตนเลสที่ใช้กับหัวกดแบบ Back extrusion แล้วดำเนินการทดสอบโดยใช้โปรแกรม Texture Exponent version 5.1.10 หลังจากนั้นดำเนินการทดสอบเช่นเดียวกันกับตัวอย่างข้าวที่เหลือ ทำการ

การประชุมวิชาการกรมการเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

บันทึกข้อมูลการวัดเพื่อคำนวณค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความเหนียว (Stickiness)

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลร้อยละการแตกหักและข้อมูลผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเมล็ดข้าว ถูกนำวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ด้วยโปรแกรม SPSS version 16.0

3 ผลและวิจารณ์

จากวิธีการดำเนินการทดลองในหัวข้อที่ 2 ได้ผลการทดสอบร้อยละการแตกหักและคุณสมบัติเชิงกลของเมล็ดข้าวที่ผ่านกระบวนการทำแห้งซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบร้อยละการแตกหักของข้าว

ร้อยละการแตกหักของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำแห้ง ข้าวหนึ่งแบบปกติ และข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย NaHCO_3 และสารละลาย CaOH_2 มีค่าเท่ากับ 41.04 ± 0.30 , 24.29 ± 4.59 , 71.39 ± 14.21 และ 25.83 ± 3.07 ตามลำดับ พบว่าค่าร้อยละการแตกหักของข้าวหนึ่งแบบปกติมีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย CaOH_2 และข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำแห้ง และข้าวตัวอย่างที่มีค่าร้อยละการแตกหักสูงสุดคือข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย NaHCO_3 เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า วิธีการจัดการกับเมล็ดข้าวแบบต่างๆมีผลทำให้ร้อยละการแตกหักแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยร้อยละการแตกหักด้วยวิธี LSD ที่ระดับ $\alpha=0.05$ จะมีการจัดการกับเมล็ดข้าวแบบต่างๆพบว่า ข้าวหนึ่งแบบปกติและข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย CaOH_2 มีร้อยละการแตกหักไม่ต่างกันดังแสดงใน Figure 1



Figure 1 shown that fracture, hardness and stickiness of rice kernel from standard parboiling process and from CaOH_2 solution soaking and NaHCO_3 solution soaking

^{a,b,c} – Mean in row did not differ significant at $\alpha = 0.05$

^{a,b,c} – Mean in row did not differ significant at $\alpha = 0.05$

3.2 ผลการทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลของข้าวตัวอย่าง

3.2.1 ความแข็ง

ค่าความแข็งของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำแห้ง ข้าวหนึ่งแบบปกติ และข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย NaHCO_3 และสารละลาย CaOH_2 มีค่าเท่ากับ 23.58 ± 1.38 N, 28.74 ± 2.36 N, 24.02 ± 2.76 N และ 25.96 ± 3.07 N ตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งของข้าวหนึ่งแบบปกติมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ข้าวที่ผ่านการแช่ในสารละลาย CaOH_2 และสารละลาย NaHCO_3 และข้าวตัวอย่างที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า วิธีการจัดการกับเมล็ดข้าวแบบต่างๆมีผลทำให้ค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$) เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความแข็งด้วยวิธี LSD ที่ระดับ $\alpha=0.05$ ข้าวกล้องแบบปกติมีค่าความแข็งต่างจากค่าความแข็งของตัวอย่างอื่นๆดังแสดงใน Figure 1

3.2.2 ความเหนียว

ค่าความเหนียวของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำแห้ง ข้าวหนึ่งแบบปกติ และข้าวหนึ่งที่ผ่านการแช่ในสารละลาย NaHCO_3 และสารละลาย CaOH_2 มีค่าเท่ากับ 7.16 ± 0.85 N, 4.80 ± 0.83 N, 6.63 ± 2.50 N และ 7.01 ± 1.98 N พบว่าค่าความเหนียวของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำแห้งมีค่าความเหนียวสูงสุด รองลงมาคือข้าวที่ผ่านการแช่ในสารละลาย CaOH_2 และสารละลาย NaHCO_3 และข้าวตัวอย่างที่มีค่าความเหนียวต่ำที่สุดคือข้าวหนึ่งแบบปกติ เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า วิธีการจัดการกับเมล็ดข้าวแบบต่างๆมีผลทำให้ความเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha=0.05$)

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

4 รูป

ผลการทดลองพบว่า การใช้สารละลาย CaOH_2 มาใช้ในขั้นตอนการแช่ในกระบวนการทำข้าวนี้สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลได้ดีที่สุดโดยพบว่าค่าความแข็งของเมล็ดข้าวต่ำกว่าข้าวนี้ปกติ และมีค่าไม่แตกต่างกับค่าความแข็งของข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการทำนี้ สำหรับค่าความเหนียวและร้อยละการแตกหักยังคงมีค่าไม่แตกต่างจากข้าวกล้องนี้ปกติ

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือวัด

6 เอกสารอ้างอิง

- A. Kyritsi, C. Tzia and V.T. Karathanes (2011). Vitamin fortified rice grain using spraying and soaking methods. *Food Science and Technology*, 44, 312–320.
- ChanakanProm-u-thai, BenjavanRerkasem, Ismail Cakmak and Longbin Huang (2010). Zinc fortification of whole rice grain through parboiling process. *Food Chemistry* 120(2010), 858-863.
- Frei, M., & Becker, K. (17 March 2005). On rice, biodiversity & nutrients. Stuttgart, Germany: Institute of Animal Production in the Tropics and Subtropics (480B), Department of Aquaculture Systems and Animal Nutrition, University of Hohenheim. www.greenpeace.org/raw/content/usa/rice-biodiversity-nutrients.pdf.
- Karrie Kam, Jayashree Arcot and Rachelle Ward (2012). Fortification of rice with folic acid using parboiling technique: Effect of parboiling conditions on nutrient uptake and physical characteristics of milled rice. *Journal of Cereal Science* 56(2012), 587-594.
- Norlin Nosbi, Hazizan Md Aki, Z. A. Mohd Ishak and A. Abu Baker (2011). Behavior of kenaf fibers after immersion in several water conditions. *BioResources* 6 (2), 950-960.
- Opportunities for Micronutrient Interventions (OMNI). (1994). Micronutrient fortification and enrichment of P.L. 4OMNI. Rosslyn, VA, USA: John Snow, Inc.

Velupillai, L., & Verma, L. R. (1982). Parboiled rice quality as affected by the level and distribution of moisture after the soaking process. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 1450–1456.

สุนทร ศรีนันทวัน. 2553. คุณค่าทางโภชนาการของข้าว. แหล่งข้อมูล: <http://www.scimath.org/article-biology/item/517-nutritional>. เข้าถึงเมื่อ 10 กุมภาพันธ์ 2561.

อกนิษฐ์ ชุมวิสูตร. 2558. การเพิ่มคาเทชินในเมล็ดข้าวโดยกระบวนการทำข้าวนี้. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายพิสุทธิ ไม้ซุน

วัน เดือน ปีเกิด 1 พฤศจิกายน 2537

ที่อยู่ปัจจุบัน 65/1 หมู่ที่ 5 ตำบลท่าทราย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร 74000

ประวัติการศึกษา ปริญญาตรี (2556-2560) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

E-mail 60601142@kmitl.ac.th

