

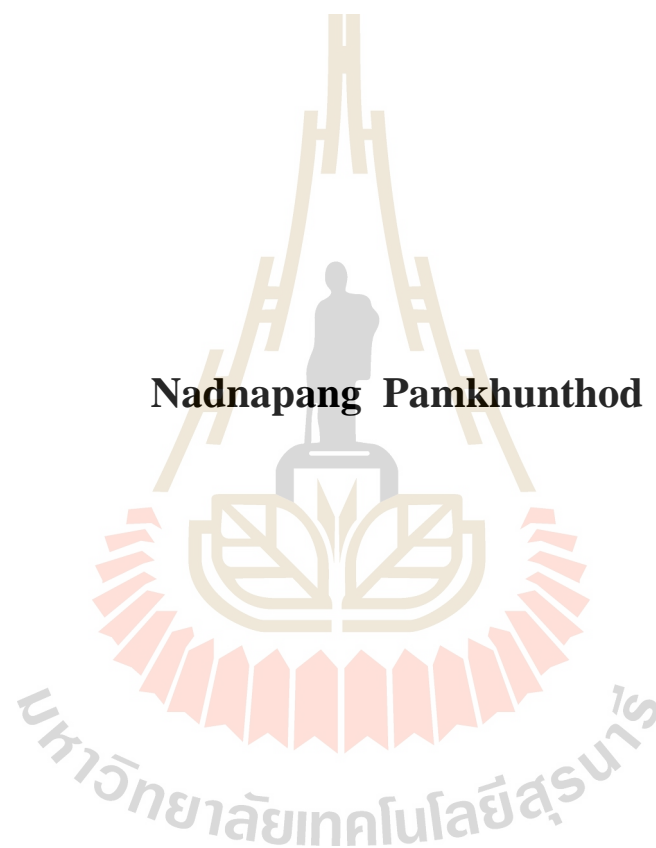
ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณสารที่ทนต่อการย่อย
ด้วยเอนไซม์



นางสาวนาฏนภางค์ พามขุนทด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**Effects of cooking and storage methods of cooked rice on
resistant starch content**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering Program in Mechanical and Process**

System Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วย
เอนไซม์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. พงษ์ศักดิ์ จุลยุเสนา)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร. ธีราพร จุลยุเสนา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร. พรรษา ลิปลับ)

กรรมการ



(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ)

กรรมการ



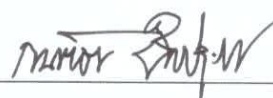
(ผศ. ดร. สุภกิตต์ สายสุนทร)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นาฏนภางค์ พามขุนทด : ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (EFFECTS OF COOKING AND STORAGE METHODS OF COOKED RICE ON RESISTANT STARCH CONTENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. ธิราพร จุลยุเสนา, 81 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (RS) สมบัติทางเคมีกายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวสุก ข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ถูกหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟ แบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0 และ MW-0) และแบบเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 (EC-1 และ MW-1) จากนั้นบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 45 วัน พบว่าปริมาณ RS ที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ทั้งแบบ EC-0 และ EC-1 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟทั้งแบบ MW-0 และ MW-1 มีแนวโน้มการเกิด RS คงที่ หลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 15 วัน การเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 ไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณ RS ระหว่างการเก็บรักษาข้าวสุก การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0) บ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 45 วัน พบว่าปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 วันแรกของการเก็บรักษา โดยปริมาณ RS มีค่าสูงสุดร้อยละ 20.50 หลังจากเก็บรักษานาน 45 วัน ปริมาณการละลายอะมิโลสและปริมาณสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ของข้าวสุกมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ RS ที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา การทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็งพบว่าข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกหลังจากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 15 วัน มีค่าสูงกว่าข้าวหุงสุกใหม่ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ข้าวสุกที่ถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 30 และ 45 วัน มีค่าความแข็งไม่แตกต่างจากข้าวหุงสุกใหม่ การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกพบว่า ความชอบด้านกลิ่นและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกหลังเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 และ 30 วัน มีค่าใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกใหม่ ความชอบด้านสี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของข้าวสุกที่ถูกเก็บรักษานาน 45 วัน มีคะแนนต่ำสุด ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดมีค่าต่ำกว่า 5 CFU/g ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ -20°C จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่าการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว บ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C

เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C มีความเป็นไปได้ในการนำไปพัฒนาข้าวสุก
พร้อมรับประทานเพื่อให้มีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นได้



สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

Handwritten signatures in blue ink. The first signature is the student's, the second is the advisor's, and the third is the co-advisor's. Each signature is written over a horizontal line.

NADNAPANG PAMKHUNTHOD : EFFECTS OF COOKING AND
STORAGE METHODS OF COOKED RICE ON RESISTANT STARCH
CONTENT. THESIS ADVISOR : TIRAPORN JUNYUSEN, Ph.D., 81 PP.

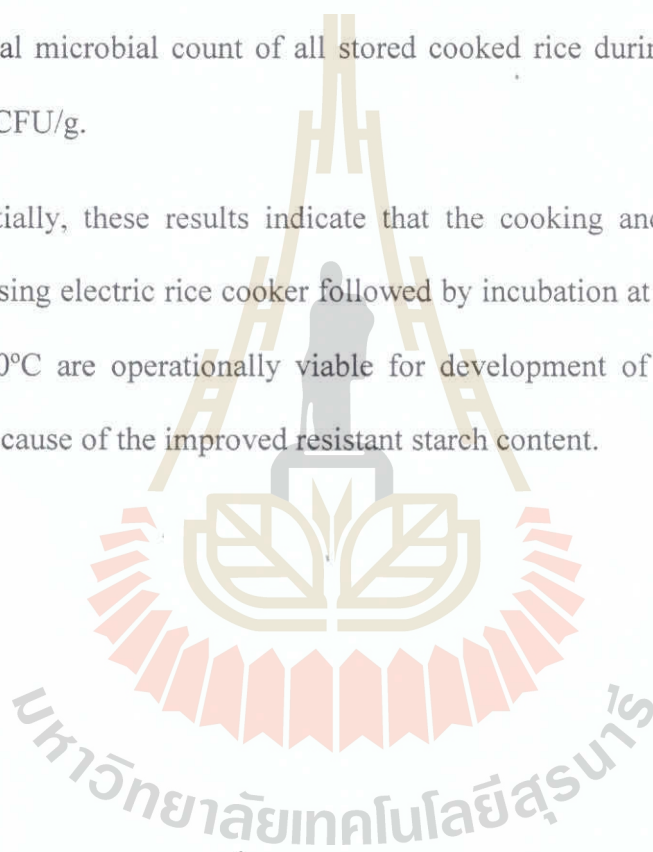
COOKED RICE / RESISTANT STARCH / FROZEN STORAGE

The objectives of this study were to investigate the cooking and storage methods on the changes of resistant starch (RS) content, chemical, physical and sensory attributes of cooked rice. White rice samples (variety of Kao Dok Mali 105) were cooked by electric rice cooker and microwave oven without rice bran oil addition (EC-0 and MW-0) and with 1% rice bran oil addition (EC-1 and MW-1). They were then incubated at 4°C for 24 h before storage at -20°C for 45 days. The results showed that the extend storage times of cooked rice EC-0 and EC-1 significantly increased the RS contents compared with the freshly cooked rice ($p < 0.05$). The RS contents of cooked rice MW-0 and MW-1 were significantly higher than that of freshly cooked rice but they remained unchanged in RS contents during frozen storage. Addition of rice bran oil did not alter the RS content of cooked rice.

Incubation of cooked rice (EC-0) at 4°C for 48 h before storage at -20°C for 45 days significantly increased the RS content compared with the freshly cooked rice ($p < 0.05$). RS formation rapidly increased during the first 15 days of frozen storage. The highest RS content (20.5%) of cooked rice EC-0 was found after 45 days of frozen storage. In addition, amylose leaching and degree of crystallinity of stored cooked rice EC-0 were positively correlated to the RS formation. Texture profile analysis revealed that the hardness values of cooked rice EC-0 after 0 and 15 days of frozen storage were

significantly higher than that of the freshly cooked rice ($p < 0.05$). On the other hand, the hardness values of cooked rice EC-0 after 30 and 45 days of frozen storage closely resembled that of the freshly cooked rice. The acceptance scores of aroma and texture profiles of cooked rice EC-0 after 0, 15 and 30 days of frozen storage were closely similar to those of the freshly cooked rice. However, the extend storage time of cooked rice to 45 days noticeably resulted in decrease the overall acceptance score by the panelists. Total microbial count of all stored cooked rice during frozen storage was lower than 5 CFU/g.

Essentially, these results indicate that the cooking and storage methods of cooked rice using electric rice cooker followed by incubation at 4°C for 48 h and then storage at -20°C are operationally viable for development of the convenience rice production because of the improved resistant starch content.



School of Agricultural Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

อาจารย์ ดร.ธิดาพร จุลยุเสนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่เมตตาให้โอกาสทางการศึกษา ให้การอบรม สั่งสอน ให้ความรู้ ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัยทุกสิ่งทุกอย่างและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งให้คำแนะนำในการเขียนและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรษา ลิบลับ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุศักดิ์ จุลยุเสนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย คุณกรรณิการ์ ประเสริฐสังข์ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในด้านเอกสารตลอดการวิจัยนี้ รวมถึงพี่น้องบัณฑิตทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือคำปรึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

เจ้าหน้าที่บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆตลอดการทำวิจัย

ท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ครอบครัวและคณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

นาฏนภางค์ พามขุนทด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ข้าว.....	4
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของข้าว.....	4
2.2.1 โครงสร้างของข้าว.....	4
2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว.....	5
2.3 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าว.....	7
2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว.....	7
2.3.2 ขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าว.....	9
2.3.3 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าว.....	9
2.4 ประเภทของสตาร์ช.....	10
2.5 การผลิตสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	การเกิด resistant starch type III (RS3)	11
2.5.2	การเกิด resistant starch type V (RS5)	13
2.6	ประโยชน์ของสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์	13
2.6.1	สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อสุขภาพ	13
2.6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์กับ ดัชนีน้ำตาล	14
2.7	น้ำมันรำข้าว	14
2.8	คลื่นไมโครเวฟ	15
2.8.1	หลักการทำงานของไมโครเวฟ	16
2.8.2	ประโยชน์ของไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร	17
2.8.3	คุณสมบัติด้านไดอิเล็กทริกของอาหาร	17
2.9	การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	19
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
2.10.1	การให้ความร้อนสตาร์ชด้วยคลื่นไมโครเวฟ	21
2.10.2	ผลของการเติมลิพิด (lipid) ในสตาร์ช	22
2.10.3	ผลของการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิต่างๆ	23
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	25
3.1	วัตถุประสงค์ และการเตรียมวัตถุประสงค์	25
3.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	25
3.3	การศึกษาวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุก	25
3.3.1	การศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อระดับความสุกของข้าว	25
3.3.2	การศึกษาระยะเวลาการบ่มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ช ที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์	26
3.3.3	การศึกษาวีธีการหุงและระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์	27
3.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์	30
3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณการละลายอะมิโลส.....	31
3.4.3 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก.....	32
3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน	32
3.4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค.....	33
3.4.6 การวิเคราะห์ดัชนีความขาว	34
3.4.7 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส.....	34
3.4.8 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุก.....	35
3.4.9 การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์.....	36
3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	36
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล	37
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว	37
4.2 ปริมาณอะมิโลส	37
4.3 ผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกายภาพ	38
4.3.1 การทดสอบหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม	38
4.3.2 ผลของวิธีการหุงข้าวและระยะเวลาที่ใช้ในการต้มข้าวสุกต่อการ เปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์.....	40
4.3.3 ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ สารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์	41
4.3.4 ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติ ทางกายภาพ	46
4.3.5 ผลของการเก็บรักษาข้าวต่อการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส.....	55
4.3.6 การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์.....	56
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	57
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	57

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1 การทดสอบหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม.....	57
5.1.2 ผลของวิธีการหุงข้าวและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์.....	57
5.1.3 ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์.....	57
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	69
ภาคผนวก ค.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	จำแนกลักษณะข้าวสุกตามปริมาณอะมิโลส 8
2.2	ค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารแต่ละประเภท 14
2.3	เปรียบเทียบกรดไขมัน (fatty acid) ในน้ำมันรำข้าวกับน้ำมันพืชชนิดต่างๆ 15
2.4	คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด 18
2.5	คำจำกัดความของเนื้อข้าวสุก 20
3.1	สถานะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส 35
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDM105) 37
4.2	ความสุกของข้าวที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำแต่ละระดับ 38
4.3	ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C 41
4.4	ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวหุงสุกใหม่ (control) และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่ม 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน 42
4.5	ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวหุงสุกใหม่ (control) และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน 45
4.6	สมบัติทางความร้อนของข้าวหุงสุกใหม่ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 30 และ 45 วัน 50
4.7	ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกใหม่ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 30 และ 45 วัน 52
4.8	ดัชนีค่าความขาวของข้าวหุงสุกใหม่ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 30 และ 45 วัน 54
4.9	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของข้าวหุงสุกใหม่ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 30 และ 45 วัน 56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ข้าวเปลือก..... 5
2.2	โครงสร้างของเมล็ดข้าว..... 5
2.3	เมล็ดสตาร์ชของข้าว..... 6
2.4	โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช 7
2.5	โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน 8
2.6	รูปร่างของเม็ดแป้งข้าว 9
2.7	ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช..... 10
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและอุณหภูมิของเม็ดสตาร์ช..... 12
2.9	โครงสร้างของ amylose-lipid complex..... 13
2.10	Electromagnetic spectrum 16
2.11	โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนในอาหาร 16
2.12	Variation in dielectric loss factor of water and ice..... 19
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA 20
3.1	หม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการหุงข้าว..... 26
3.2	การศึกษาผลของระยะเวลาการต้มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ช ที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ 27
3.3	การศึกษาผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกหลังจากต้มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมง 29
3.4	การศึกษาผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกหลังจากต้มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง 30
3.5	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์..... 32
3.6	เครื่องวัดสมบัติเชิงความร้อน..... 33
3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 เครื่องวัดค่าความขวมเมล็ดข้าว.....	34
3.9 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	35
4.1 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ แต่ละระดับ	39
4.2 ผลของวิธีการหุงข้าว (หม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟ) และการเก็บรักษาข้าวสุก ด้วยการแช่แข็งที่ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ การละลายอะมิโลส.....	44
4.3 ผลของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว บ่มข้าวสุกที่ อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาข้าวสุกต่อด้วยการแช่แข็งที่ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการละลายอะมิโลส.....	46
4.4 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 (KDM105)	47
4.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน	48
4.6 ปริมาณสภาพเป็นผลึก (degree of crystallinity) และรูปแบบผลึก (type of crystalline structure) ข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็ง.....	48
4.7 อุณหภูมิสูงสุด (T _p) และช่วงอุณหภูมิ (ΔT) ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันของข้าวสาร (KDM105) ข้าวสุกหุงใหม่ (control) และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน	50
4.8 ภาพถ่าย SEM ของข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็ง	53
4.9 ภาพถ่าย SEM ของข้าวสารขาวดอกมะลิ 105	54
4.10 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่ม ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน	55

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

RS	=	resistant starch
RDS	=	rapidly digestible starch
SDS	=	slowly digestible starch
RS1	=	physically inaccessible starch
RS2	=	resistant granular starch
RS3	=	retrogradation starch
RS4	=	chemically modification starch
RS5	=	amylose-lipid complexes
GI	=	glycemic index
ϵ'	=	relative dielectric constant
ϵ''	=	relative dielectric loss
$\tan\delta$	=	loss tangent
TPA	=	texture profile analysis
SEM	=	scanning electron microscopy
XRD	=	x-ray diffractometer
WI	=	whiteness index
DSC	=	differential scanning calorimeter
CRD	=	completely randomized design
HSD	=	turkey's honestly significant different
KDM105	=	ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105
T_0	=	อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงสถานะ
T_p	=	อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสูงสุด
T_c	=	อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนแปลงสถานะ
ΔT	=	ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชัน
ΔH	=	เอนทัลปี
MW	=	เตาไมโครเวฟ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MW-0	=	หุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟแบบไม่เติมน้ำมัน
MW-1	=	หุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟแบบเติมน้ำมันร้อยละ 1
EC	=	หม้อหุงข้าวไฟฟ้า
EC-0	=	หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมัน
EC-1	=	หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบเติมน้ำมันร้อยละ 1
control	=	ข้าวหุงสุกใหม่
AML	=	ปริมาณการละลายอะมิโลส
X1	=	ระยะเวลาบ่มข้าวสุก
X2	=	วิธีการหุงข้าว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นอาหารหลักประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั่วโลก โดยเฉพาะประเทศในทวีปเอเชีย จากรายงานโครงการประมาณการบริโภคข้าวของคนไทยพบว่า ปัจจุบันคนไทยบริโภคข้าวเฉลี่ย 100-104 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (กองบรรณาธิการ ข้าวเศรษฐกิจ, 2558) ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญมาก ประเทศไทยส่งออกข้าวเป็นอันดับสองรองจากบังกลาเทศ ในปีพ.ศ. 2557 โดยมีการส่งออกข้าวมากถึง 10.97 ล้านตัน (รวบรวมจากรายงานของ THE RICE TRADER : ข้อมูล ณ วันที่ 5 มกราคม 2559) และมีแนวโน้มการส่งออกตั้งแต่ปี 2555 ถึงปี 2558 เพิ่มมากขึ้น (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2557) กลุ่มพันธุ์ข้าวที่เกษตรกรไทยปลูกในปัจจุบัน แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้าวขาว (เช่น พันธุ์พื้นเมือง) กลุ่มข้าวหอม (เช่น พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105) และกลุ่มข้าวเหนียว (เช่น พันธุ์ข้าว กข6) ข้าวแต่ละสายพันธุ์มีส่วนประกอบของปริมาณอะมิโลเพคติน (amylopectin) และอะมิโลส (amylose) ในสตาร์ชข้าว (rice starch) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คุณภาพของข้าวแตกต่างกันไปด้วย ในสตาร์ชข้าวมีปริมาณอะมิโลเพคตินเป็นองค์ประกอบหลักและอะมิโลสเป็นองค์ประกอบรอง อัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคตินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวสุกมีคุณสมบัติแตกต่างกันทั้งในด้านสี ความใส ความหนืด และลักษณะเนื้อสัมผัส โดยทั่วไปการแบ่งประเภทของข้าวที่นิยมใช้ปริมาณอะมิโลสเป็นหลัก ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงในระหว่างการหุงต้มจะดูนุ่มได้มากกว่า และข้าวสุกจะมีความแข็งร่วนมากกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความตระหนักถึงความสัมพันธ์ระหว่างอาหารกับสุขภาพกันมากขึ้น จึงทำให้มีความสนใจในการเลือกบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ จากรายงานการวิจัยได้บ่งชี้ถึงการบริโภคอาหารที่มีปริมาณไขมันอิ่มตัว (saturated fat) โซเดียม (sodium) แป้ง (starch) และน้ำตาล (sugars) ในสัดส่วนที่สูงจะส่งเสริมการเป็นโรคประจำตัว (chronic disease) เช่น โรคเบาหวาน (diabetes) โรคหัวใจ (cardiovascular disease) เป็นต้น การบริโภคอาหารที่มีเส้นใยสูงเป็นประจำสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคที่กล่าวข้างต้นได้ (Dietary Guidelines for Americans, 2010) สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch, RS) หมายถึง สตาร์ชและ

ผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์และถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ สุขภาพดี สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มของเส้นใยอาหาร (dietary fiber) (Englyst and Hudson, 1996; Birt et al., 2013) นักวิจัยหลายท่านได้รวบรวมและรายงานประโยชน์ของสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อสุขภาพของผู้บริโภค เนื่องจากสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ไม่สามารถถูกย่อยได้ในลำไส้เล็ก เมื่อสตาร์ชเหล่านี้ผ่านเข้าไปในลำไส้ใหญ่จะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์กรดไขมันสายสั้นๆ (short-chain fatty acids) ซึ่งมีผลช่วยสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ในลำไส้ใหญ่ และป้องกันการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้ นอกจากนี้ สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ยังมีผลต่อการลดระดับน้ำตาลในเลือด ลดการสะสมของไขมันในร่างกาย และลดการดูดซึมคอเลสเตอรอลได้อีกด้วย (Bird et al., 2009; Fuentes-Zaragoza et al., 2010) การพัฒนากระบวนการผลิตสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และนำสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้รับความสนใจอย่างมาก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดในอาหาร เพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร หรือใช้เป็นส่วนทดแทนไขมัน (fat replacer) เป็นต้น (Fuentes-Zaragoza et al., 2010; Amaya-Llano et al., 2008)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลส หรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) มีอยู่หลายปัจจัยทั้งทางด้านคุณสมบัติของสตาร์ชเริ่มต้น เช่น ความเป็นผลึกของสตาร์ช โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ปริมาณและความยาวของสายอะมิโลส และส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลเพคติน ปัจจัยทางด้านกระบวนการผลิต รวมถึงสถานะในการเก็บรักษา เช่น วิธีการให้ความร้อนแก่สตาร์ชเพื่อให้เกิดเจลาคีโนเซชัน (gelatinization) การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) อุณหภูมิและเวลาในการเก็บรักษา เป็นต้น (Be Miller and Huber, 2015; Dupuis et al., 2014; Bird et al., 2009) ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักคือ วิธีการหุงข้าวและวิธีการเก็บรักษาข้าวสุก เพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพและปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวสุก งานวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ (functional food) ซึ่งเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคข้าวที่ต้องการลดปริมาณสตาร์ชแต่เพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารแทน รวมทั้งเทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถถูกนำไปพัฒนาต่อยอดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรของไทยได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อการเพิ่มปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวสุกต่อการเพิ่มปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวสุกและปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยคือ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (ข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ)
- 1.3.2 หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (รุ่น RC-5MSKA, Toshiba) และ ไมโครเวฟ (รุ่น CE118P, Sumsung)
- 1.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาข้าวสุกคือ -20°C
- 1.3.4 งานวิจัยนี้จะถูกดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory scale) เท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเพิ่มปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในข้าวสุกจากวิธีการหุงข้าวและเก็บรักษาข้าวสุก

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

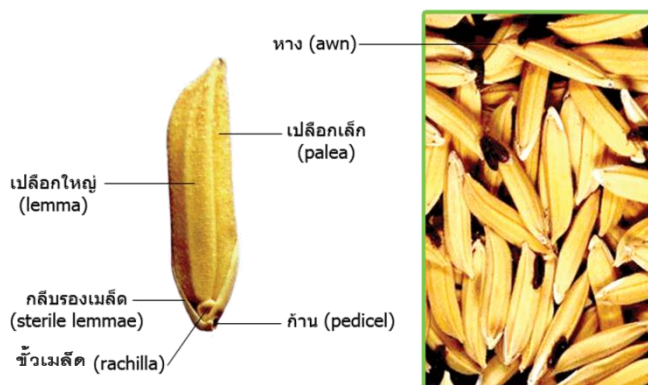
ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวสุกเพื่อเพิ่มปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสารตั้งข้าว การผลิตสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ วิธีการหุงข้าว น้ำมันรำข้าว และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ข้าว (rice)

ข้าวเป็นคำทั่วไปที่เรียกใช้ เมล็ดข้าว (rice fruit, rice grain, หรือ rice seed) ซึ่งทางพฤกษศาสตร์จะหมายถึงผล (fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิดลอยตัว (superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อย ที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้จะติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้งที่ไม่แตก เรียกว่า เมล็ด (caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผล และเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat) เชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่นโดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าว เมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างตามสายพันธุ์ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหางหรือไม่มีหางและขน หรือไม่มีขนบนเปลือกแข็ง (เครือวัลย์, 2536; จำรัส, 2534)

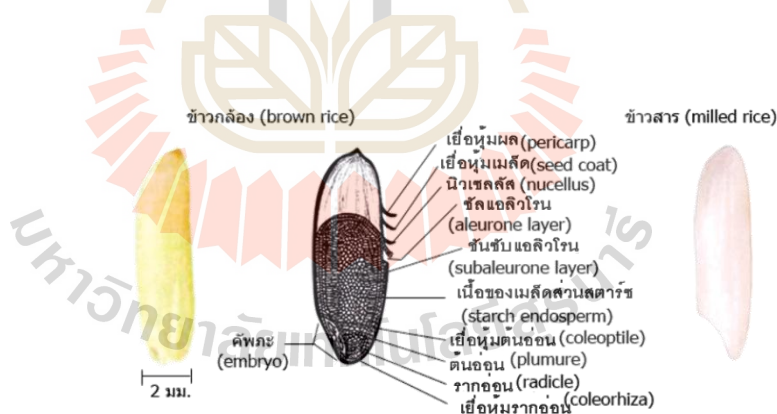
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของข้าว (structure and chemical compositions of rice)

2.2.1 โครงสร้างของข้าว (structure of rice) ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ (hull หรือ husk) เป็นเปลือกแข็งอยู่ด้านนอกสุดของ เมล็ดข้าว มีลักษณะเป็นรูปทรงรี สีเหลืองอมน้ำตาล เหลืองนวล หรือม่วงขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ข้าว ทำหน้าที่ป้องกันส่วนเนื้อผลที่อยู่ภายใน และลดการระเหยของน้ำ เนื่องจากที่ผิวของเมล็ดข้าวมีขนด้านบนเปลือกช่วยลดการระเหยของน้ำ ป้องกันอันตรายต่อเมล็ดจากสภาวะภายนอกและช่วยให้เมล็ดติดไปกับคน สัตว์ หรือสิ่งต่างๆ เพื่อการขยายพันธุ์ นอกจากนี้ในส่วนห่อหุ้มเมล็ดข้าวยังรวมถึงส่วนหาง (awn) ขั้วเมล็ด (rachilla) และกลีบรองเมล็ด (sterile lemmae) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ข้าวเปลือก (Organic rice delivery, 2557)

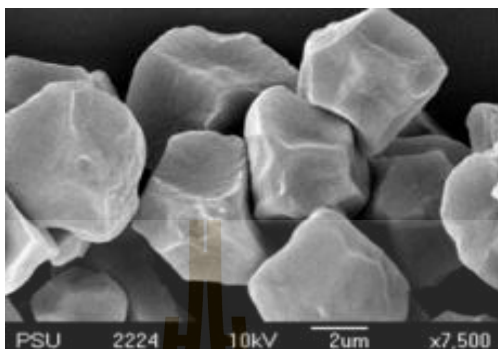
ส่วนเนื้อผล (caryopsis grain) หรือเรียกว่าข้าวกล้อง ประกอบด้วย เยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) นิวเซลลัส (nucellus) และเยื่อชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) พบคัพภะ (germ layer) และเนื้อเมล็ด (endosperm) หรือเนื้อข้าว (รูปที่ 2.2) มากที่สุดในเมล็ดข้าว (ประมาณ 80% ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) (อรอนงค์, 2547) ภายในเนื้อเมล็ดจะมีกลุ่มโปรตีนลักษณะกลมใหญ่แทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช (starch granules) อยู่รวมกันเป็นกลุ่มสตาร์ช (compound granules) ซึ่งเป็นส่วนของเมล็ดข้าวสารที่นำมารับประทาน



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว (อรอนงค์, 2547)

2.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว (chemical compositions of rice) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) เป็นองค์ประกอบหลักที่มีปริมาณมากที่สุดในข้าว คาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุดคือ สตาร์ช (starch) รองลงมาคือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และเดกซ์ทริน (dextrin) โดยสตาร์ชจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) โมเลกุลของสตาร์ชจะรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีขนาด 3-5 ไมครอนรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยมรวมตัวกันอยู่ในแอมิโลพลาสต์หรือคลอโรพลาสต์ของเซลล์ (อรอนงค์,

2538) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งข้าวแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนอะมิโลส และอะมิโลเพคตินแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์



รูปที่ 2.3 เม็ดสตาร์ชของข้าว (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2549)

โปรตีน (protein) ในข้าวมีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว โดยทั่วไปข้าวจะมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าธัญชาติชนิดอื่น (มีโปรตีนประมาณ 6.8-8.5%) พบโปรตีนที่ละลายในน้ำ หรือ แอลบูมิน (albumin) ประมาณ 3.8-8.8% ของโปรตีนทั้งหมด โปรตีนที่ละลายในเกลือ หรือ โกลบูลิน (globulin) ประมาณ 9.6-10% ของโปรตีนทั้งหมด และโปรตีนที่ละลายในแอลกอฮอล์ หรือ โพรลามิน (prolamin) หรือออริซานิน (oryzanin) ประมาณ 66.1-78.0% ของโปรตีนทั้งหมด (อรอนงค์, 2538)

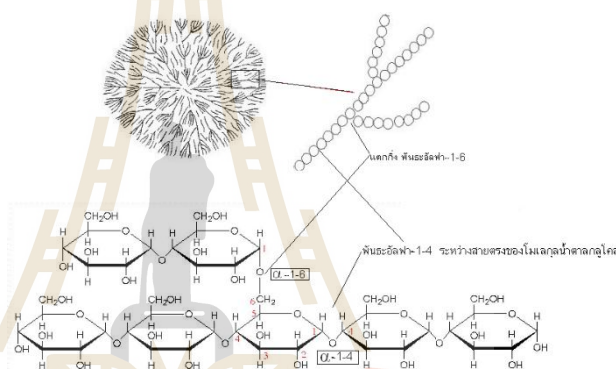
ไขมัน (lipid) ข้าวมีปริมาณไขมันประมาณ 3% พบไขมันในส่วนด้านนอกเมล็ดมากกว่าใจกลางเมล็ด ดังนั้นการขัดสีข้าวขาวทำให้ข้าวสารมีไขมันเหลืออยู่เพียง 0.3-0.5 % โดยไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะ คือ ไขมันอยู่ติดกับโปรตีนซึ่งอยู่ที่ผิวของเม็ดสตาร์ช ภายนอกหรืออาจอยู่ร่วมกับโครงสร้างของอะมิโลเพคตินสายนอก ไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช โดยเกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ช และไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชแต่ไม่เกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ช (อรอนงค์, 2538)

ปริมาณความชื้น (moisture content) ปริมาณความชื้นของข้าว ทั้งในข้าวเปลือกและข้าวสารใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำคัญเพื่อการซื้อขายข้าว ความชื้นสามารถบ่งชี้ถึงอายุการเก็บรักษาข้าวหรือบ่งบอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาให้ข้าวมีคุณภาพดี โดยระดับความชื้นทั่วไปของข้าวที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา คือ 13% ซึ่งจะเก็บรักษาได้ดีภายในเวลา 6 เดือน และถ้าข้าวมีความชื้น 12% จะทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น (อรอนงค์, 2547) นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อคุณภาพการสีข้าวเปลือก ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเหมาะสมจะทำให้ข้าวเต็มเมล็ดสูงเกิดข้าวหักน้อย

2.3 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าว (physicochemical properties of rice starch)

2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว (chemical compositions of rice starch)

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุด ในเมล็ดข้าว ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด ได้แก่ อะมิโลส และอะมิโลเพคติน โดยพอลิเมอร์ทั้งสองจะจับตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ช และมีการจัดเรียงโครงสร้างตามแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลาง (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



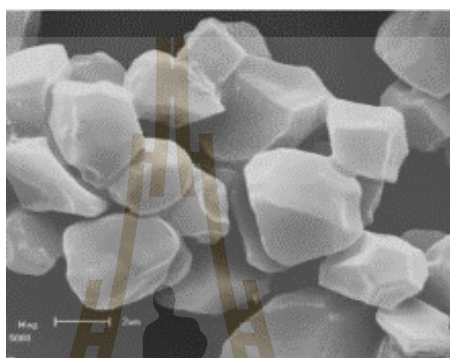
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช (Amagliani et al., 2016)

อะมิโลส (amylose) ประกอบด้วยกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear chains) ด้วยพันธะ α -1,4 และอาจพบกิ่งก้านในอะมิโลสได้บ้างเพียงเล็กน้อยโดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6 (อรอนงค์, 2547) โดยโครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายมีหลายรูปแบบ ได้แก่ สายตรง สายพันแบบเกลียวเดี่ยวหรือคู่ แบบเกลียวม้วน (helix) เกลียวคลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนแบบไม่เจาะจง (random coil) นอกจากนี้อะมิโลสยังสามารถรวมตัวกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์หากอะมิโลส รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546)

อะมิโลเพคติน (amylopectin) ประกอบด้วยกลูโคสจัดเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์แบบโซ่กิ่ง (branched chain) โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6 มีอยู่ประมาณ 4% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะมิโลเพคตินทั้งหมดโดยเป็นพอลิเมอร์สายสั้น (อรอนงค์, 2547) สำหรับโครงสร้างโมเลกุลของอะมิโลเพคตินจะมีลักษณะ

2.3.2 ขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าว (size and morphology of rice starch)

สตาร์ชพบมากที่สุดในเนื้อเมล็ดข้าว (ประมาณ 90%) โมเลกุลสตาร์ชรวมตัวกันเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีขนาด 3-5 ไมครอน รูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.6 รวมตัวกันอยู่ภายในคลอโรพลาสต์ของเซลล์จำนวน 20-60 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ชในคลอโรพลาสต์ประมาณ 7-39 ไมครอน (อรอนงค์, 2547) โดยพบว่าสตาร์ชข้าวมีขนาดเล็กที่สุดในกลุ่มธัญชาติ



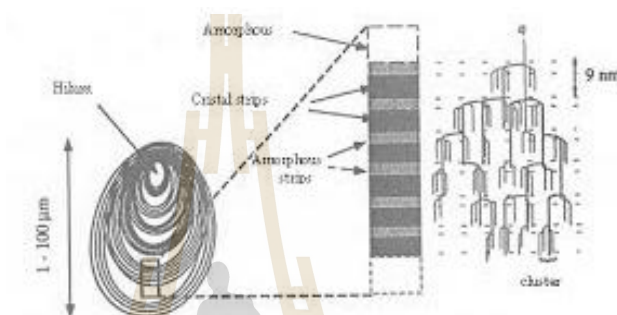
รูปที่ 2.6 รูปร่างของเม็ดแป้งข้าว (Colussi et al., 2015)

2.3.3 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าว (crystal of rice starch)

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดย โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินมีการจัดเรียงตัวกันภายในเม็ดสตาร์ชทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous) ส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินแบบเชิงเส้น มีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ในขณะที่ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพคตินสายโซ่กึ่งมีจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (double helix) อย่างเป็นระเบียบในแนวรัศมีเป็นชั้นๆ ในรูปของคลัสเตอร์ (series of stacked amylopectin clusters) ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าสายอะมิโลเพคตินจะอยู่ทั้งในส่วนผลึกและส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช โดยร้อยละ 80-90 ของจำนวนอะมิโลเพคตินจะอยู่ในส่วนของชั้นผลึก ที่เหลือร้อยละ 10-20 จะอยู่ในส่วนของอสัณฐาน ส่วนที่เป็นชั้นผลึกจะเป็นส่วนที่ทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถคงรูปร่างไว้ได้ ส่วนอสัณฐานจะเป็นส่วนที่ยึดเกาะชั้นผลึกไว้ด้วยกันและช่วยสร้างความยืดหยุ่นให้กับเม็ดสตาร์ช (อริญา, 2555)

เม็ดสตาร์ชมีลักษณะ โครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นกับลักษณะการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพคตินแบบเกลียวคู่ หากมีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำจะจัดให้มีการเรียงผลึกแบบ A เช่น แป้งจากธัญชาติ ข้าว เป็นต้น ถ้ามีการจัดเรียงตัวกันแบบหลวมๆ จะจัดเป็น

ผลึกแบบ B เช่น แป้งจากพืชหัว และถ้าหากมีการจัดเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นการเรียงตัวแบบ C เช่น แป้งจากพืชตระกูลถั่ว นอกจากรูปแบบผลึกดังกล่าวแล้ว บางครั้งยังปรากฏลักษณะผลึกแบบ V เกิดจากการจับกันของสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้ว พบในสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 40 (Jacob and Delcour, 1998) โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันจะให้การกระจายแสงที่ต่างกัน สามารถตรวจสอบชนิดของโครงสร้างผลึกได้โดยใช้เทคนิคคริสตัลโลกราฟี (x-ray diffraction)



รูปที่ 2.7 ลักษณะ โครงสร้างแบบกิ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช (Jacob and Delcour, 1998)

2.4 ประเภทของสตาร์ช (type of starch)

กระบวนการย่อยอาหารประเภทสตาร์ชเริ่มตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก โดยฟันจะทำหน้าที่บดอาหารให้มีขนาดเล็กลง น้ำลายภายในปากจะมีเอนไซม์ที่ชื่อว่า แอลฟา-อะมิเลส (α -amylase) ที่สามารถย่อยสตาร์ชให้มีขนาดเล็กลงได้แต่การย่อยในปากจะเกิดเพียงช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้น จากนั้นอาหารจะถูกกลืนลงไปยังหลอดอาหารส่งไปยังลำไส้เล็ก ภายในลำไส้เล็กเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสจะไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากมีความเป็นกรดสูง แต่จะเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสทำให้โมเลกุลสตาร์ชเกิดการแตกตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กลง กระบวนการย่อยที่สมบูรณ์จะเกิดที่ลำไส้เล็กซึ่งมีสภาพเป็นด่างเหมาะแก่การย่อย โดยน้ำดีในลำไส้เล็กช่วยให้เอนไซม์ย่อยโมเลกุลสตาร์ชจนได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ร่างกายสามารถนำไปใช้งานได้ สามารถแบ่งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภทตามระยะเวลาในการย่อย (Dupuis, 2014) ได้แก่

1. สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS)
2. สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้า ๆ (slowly digestible starch, SDS)
3. สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch, RS)

สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) enzyme-resistant starch หรือ resistant starch, RS ตามคำนิยามของ European FLAIR-Concerted Action on Resistant Starch

หมายถึง แป้งและผลิตภัณฑ์ของแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์และจุลชีพภายในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ปกติ (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) โดยทั่วไป RS สามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (Dupuis, 2014) ได้แก่

1. physically inaccessible starch (RS1) คือ สตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์เนื่องจากเม็ดสตาร์ชถูกห่อหุ้มอยู่ในร่างแหของโปรตีน โดย RS ประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแต่เป็นส่วนน้อย
2. resistant granular starch (RS2) คือ สตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์เนื่องจากลักษณะโครงสร้างธรรมชาติของเม็ดสตาร์ชที่ไม่มีช่องเปิดให้เอนไซม์เข้าไปยังเม็ดสตาร์ช
3. retrogradation starch (RS3) คือ สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสระหว่างการทำารลดอุณหภูมิของสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการทำให้เกิดเจลลาติไนเซชันเกิดเป็นโครงตาข่ายสามมิติที่มีความแข็งแรงทนต่อการย่อยของเอนไซม์
4. chemically modification starch (RS4) คือ สตาร์ชที่ทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เกิดจากการดัดแปรทางเคมีที่ทำให้เกิดพันธะต่างไปจากเดิม α -(1,4) หรือ α -(1,6)
5. amylose-lipid complexes (RS5) คือ สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโมเลกุลของอะมิโลสและไขมัน

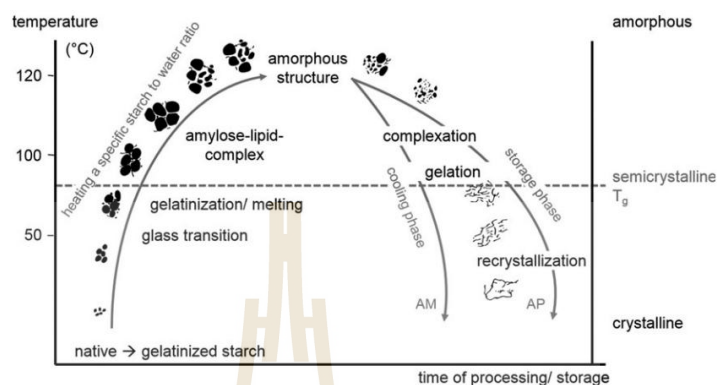
2.5 การผลิตสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Processing of resistant starch)

สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ที่พบในธรรมชาติมีน้อย ส่วนใหญ่สตาร์ชที่ทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์จะ ได้จากการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่างๆ เช่น กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชัน การใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้งเพื่อช่วยเพิ่มอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Chiu et al., 1994) การใช้กระบวนการความร้อนชื้น (heat-moisture treatment) (Chung and Hoover, 2009) และการใช้สารเคมี (Seib et al., 1999)

2.5.1 การเกิด resistant starch type III (RS3)

เกิดขึ้นจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชเมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลาติไนเซชัน (gelatinization) ทำให้โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในสตาร์ชเกิดการคลายตัว และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลอะมิโลสแบบเกลียวคลายตัวแบบไม่เจาะจง (random coil) จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเกลียวคู่ (double helices) เมื่อระยะเวลาผ่านไป กระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกลียวคู่ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่มี

ความหนาแน่น และแข็งแรงขึ้นเกิดเป็นผลึกที่สามารถทนต่อการถูกย่อยของเอนไซม์ ดังรูปที่ 2.8 ทำให้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีกรดน้ำกลับเข้ามาอีกส่งผลให้ความหนืดคงตัวมากขึ้น (อริญา, 2555)



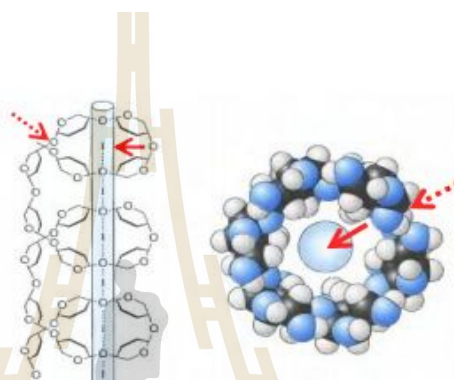
รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและอุณหภูมิของเม็ดสตาร์ช

(Schirmer et al., 2015)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด RS3 มีหลายปัจจัยด้วยกันทั้งด้านคุณสมบัติของสตาร์ช และปัจจัยทางด้านสภาวะกระบวนการผลิต รวมไปถึงระยะเวลา และกระบวนการเก็บรักษา โดยปัจจัยทางด้านคุณสมบัติ เช่น ความเป็นผลึกของสตาร์ช โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช อัตราส่วนระหว่างอะมิโลสและอะมิโลเพคติน อัตราการเกิดรีโทรเกรเดชัน ความยาวสายโซ่ของโมเลกุลอะมิโลส และส่วนที่เป็นเส้นตรงของโมเลกุลอะมิโลเพคติน ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการเกิด RS3 ในสตาร์ช (อริญา, 2555) สตาร์ชแต่ละชนิดมีปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคตินแตกต่างกัน ปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชมีความสำคัญเชิงบวกกับการเกิด RS (Bird et al., 2009) สตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะสามารถเกิด RS3 ได้มากกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลเพคตินสูง เนื่องจากปริมาณอะมิโลสมีบทบาทสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช (retrogradation) โดยสตาร์ชที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีความสามารถในการคืนตัวได้มากกว่าสตาร์ชที่มีอะมิโลสต่ำ นอกจากนี้ อุณหภูมิการบ่มสตาร์ชก็มีผลต่อการเกิด RS3 และการจัดเรียงโครงสร้างสตาร์ชให้มีความเป็นผลึกมากขึ้นเช่นกัน การบ่มหรือการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้มีอัตราการเกิด RS3 เร็วขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ แต่การขยายขนาดของ RS3 เป็นไปอย่างช้า ๆ เมื่อระยะเวลาผ่านไป ในทางตรงกันข้ามที่อุณหภูมิการบ่มหรือการเก็บรักษาที่สูงขึ้นกลับทำให้อัตราการเกิด RS3 ในช่วงแรกเป็นไปอย่างช้า ๆ แต่จะมีการขยายขนาดของ RS3 ได้อย่างรวดเร็วเมื่อระยะเวลาผ่านไป (Eerlingen et al., 1993)

2.5.2 การเกิด resistant starch type V (RS5)

เกิดจากโมเลกุลของไขมันหรือ ลิพิด (lipid) รวมตัวกับอะมิโลสในเม็ดสตาร์ช เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับไขมัน (amylose-lipid complex) (อรอนงค์, 2547) ซึ่ง amylose-lipid complex นี้เกิดการจับตัวกัน ดังรูปที่ 2.9 สารประกอบนี้ไม่ละลายน้ำ แต่การจับกันนี้จะคลายตัวหรือถูกทำลายเมื่อถูกให้ความร้อนสูง พันธะที่ยึดเหนี่ยวกันนี้ขัดขวางกำลังการพองตัว (swelling) ของเม็ดสตาร์ช อีกทั้งยังขัดขวางความสามารถในการย่อยได้ของเอนไซม์อีกด้วย



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ amylose-lipid complex (Ratithammatorn, 2016)

2.6 ประโยชน์ของสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (advantage of resistant starch)

2.6.1 สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ต่อสุขภาพ

คุณสมบัติที่สำคัญของ resistant starch คือ ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยเอนไซม์ในลำไส้เล็กเหมือนกับสตาร์ชทั่วไป ดังนั้น resistant starch จึงมีคุณสมบัติเทียบได้กับเส้นใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย ช่วยให้ระบบขับถ่ายทำงานดีขึ้น ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคท้องผูก โรคผนังลำไส้ใหญ่อักเสบ และโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ โดย resistant starch จะถูกส่งผ่านมายังลำไส้ใหญ่และถูกหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ได้เป็นกรดไขมันสายสั้นๆ กรดไขมันที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (pathogenic microorganisms) ช่วยเพิ่มปริมาณของของเหลวและปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ภายในลำไส้ใหญ่ butyrate ที่สร้างขึ้นจะช่วยปรับสภาวะตอนปลายของลำไส้ใหญ่ให้สมบูรณ์ ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์ที่ผิดปกติในร่างกาย (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546) นอกจากนี้การบริโภค resistant starch ยังช่วยป้องกันภาวะโรคอ้วน ลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเส้นเลือด เป็นผลดีต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน โรคหัวใจ และโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือดอีกด้วย

2.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์กับค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index)

ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index: GI) คือ ดัชนีที่ใช้วัดคุณภาพอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต ซึ่งหลังจากเข้าสู่ระบบการย่อยและการดูดซึมอาหารของร่างกายสามารถเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดได้มากหรือน้อยโดยเทียบกับสารมาตรฐาน คือ น้ำตาลกลูโคส โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 ขึ้นอยู่กับอาหารนั้นๆ การบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลสูงจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็ว ทำให้อินซูลินทำงานผิดปกติ ในขณะที่การบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือด ส่งผลให้อินซูลินทำงานได้อยู่ในระดับปกติลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจและโรคเบาหวาน (Moretti et al., 2017) จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และค่าดัชนีน้ำตาลพบที่มีความผกผันกัน กล่าวคืออาหารที่มีปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์สูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ (Sonia et al., 2015; จิรนาถ, 2554) สามารถแบ่งค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารได้ 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าดัชนีน้ำตาลของอาหารแต่ละประเภท

ระดับของดัชนีน้ำตาลในอาหาร	ประเภทอาหาร	ค่าดัชนีน้ำตาล
อาหารดัชนีน้ำตาลสูง	ขนมปังขาว คอร์นเฟลก ข้าวขาว มันฝรั่งอบ มันฝรั่งทอด ไอศกรีม ผลไม้ที่มีรสหวาน	≥ 70
อาหารดัชนีน้ำตาลปานกลาง	อาหารประเภทเส้น มันเทศ ข้าวโพด หวาน ข้าวกล้อง โฮลวีท	56-69
อาหารดัชนีน้ำตาลต่ำ	ถั่วชนิดต่างๆ ผัก ธัญพืชที่มีน้ำตาลต่ำ ผลไม้ที่มีน้ำตาลต่ำ	≤ 55

แหล่งที่มา : จิรนาถ (2554)

2.7 น้ำมันรำข้าว (rice bran oil)

ในงานวิจัยครั้งนี้สนใจที่จะเพิ่มปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ประเภทที่ 5 ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของไขมันและอะมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน amylose-lipid complexes ที่มีความเสถียร และทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยเลือกเติมน้ำมันรำข้าว (rice bran oil) ในการหุงข้าวสำหรับงานวิจัยครั้งนี้

น้ำมันรำข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากรำข้าวคืบซึ่งหมายถึง ส่วนผสมของรำละเอียด และคัพพะ และจากกรรมวิธีการทำน้ำมันรำข้าวได้รำที่สกัดน้ำมันออกมา โดยพบกรดไขมัน (fatty acid) ในรำข้าวประมาณ 15-20% ซึ่งประกอบไปด้วยกรดไขมันที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย พบกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย ดังตารางที่ 2.3 น้ำมันรำข้าวมีกรดไขมันอิ่มตัว ทั้ง oleic acid และ linoleic acid ในปริมาณมาก และยังมีสารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) หลายชนิด ได้แก่ วิตามินอี (tocotrienol และ tocopherol) และออริซานอล (oryzanol) มีคุณสมบัติเป็นสารยับยั้งการเกิด oxidize LDL ลดการเกิดการแข็งตัวของหลอดเลือด และการเกิดคอเลสเตอรอลออกไซด์ มีผลต่อการลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด (อรอนงค์, 2547)

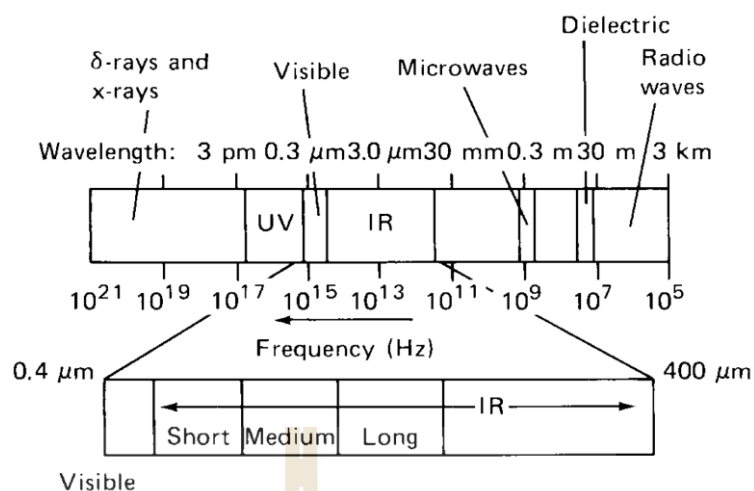
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบกรดไขมัน (fatty acid) ในน้ำมันรำข้าวกับน้ำมันพืชชนิดต่างๆ

Component	Fatty acid (%)			
	Rice Bran	Peanut	Soybean	Cottonseed
Myristic (14:0)	0.2	-	0.2	0.80
Palmitic (16:0)	15	8.1	11	27
Stearic (18:0)	1.9	1.5	3.9	2.0
Oleic (18:1)	42	50	23	18
Linoleic (18:2)	39	35	51	50
Linolenic (18:3)	1.1	-	6.8	-
Arachidic (20:0)	0.5	1.1	0.20	0.30
Behenic (22:0)	0.20	2.1	0.10	-

แหล่งที่มา : McCaskill and Zhang (1999)

2.8 คลื่นไมโครเวฟ (microwave)

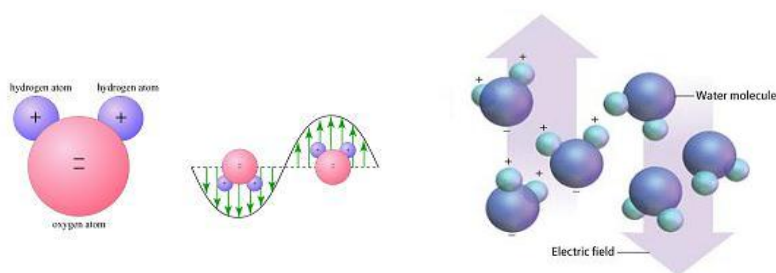
คลื่นไมโครเวฟ (microwave เป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวของคลื่นอยู่ระหว่างความยาวคลื่นวิทยุ (radio wave) กับความยาวคลื่นอินฟราเรด (infrared) และมีความถี่อยู่ระหว่าง 300 MHz – 300 GHz ดังแสดงในรูป 2.10 ไมโครเวฟไม่ใช่ความร้อนแต่อยู่ในรูปของพลังงาน พลังงานไมโครเวฟสามารถถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนได้โดยการสั่นสะเทือนของอนุภาคที่มีประจุ และหรือการหมุนตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecule) ทำให้เกิดการชนกับอนุภาคหรือโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงซึ่งทำให้เกิดความร้อนขึ้น (Fellow, 2000)



รูปที่ 2.10 แสดง Electromagnetic spectrum (Fellows, 2000)

2.8.1 หลักการทำงานของไมโครเวฟ (principle of microwave)

คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่อยู่ในช่วง 915 – 2450 MHz ในสนามไฟฟ้าจะพุ่งเข้าหาอาหารทุกทิศทาง ทำให้โมเลกุลของน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) ที่อยู่ภายในอาหารเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งในอาหารส่วนใหญ่จะมีน้ำเป็นองค์ประกอบ และยังมีเกลือแร่ต่างๆ เช่น โซเดียมคลอไรด์ โพแทสเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น จะพบว่าเกลือที่ละลายน้ำนี้จะแตกตัวไปอยู่ในรูปของประจุ เกิดการเปลี่ยนแปลงขั้วไฟฟ้าอย่างรวดเร็วในตัวอย่างอาหาร ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนและเกิดการเสียดสีกันของโมเลกุลอาหาร เนื่องจากขั้วของน้ำโดยเริ่มต้นจะมีทิศทางที่กระจัดกระจาย จะเปลี่ยนทิศทางตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า ขั้วลบของน้ำจะวิ่งเข้าหาขั้วบวกของสนามไฟฟ้า และในทางตรงกันข้ามขั้วบวกของน้ำก็จะวิ่งเข้าหาขั้วลบของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.11 จึงส่งผลทำให้เกิดความร้อนขึ้นและทำให้อาหารสุกอย่างรวดเร็ว (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2555)



รูปที่ 2.11 โมเลกุลของน้ำที่เปลี่ยนทิศสลับไปมาอย่างรวดเร็วตามทิศทางของสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนในอาหาร (พิมพ์เพ็ญ และนิธิยา, 2555)

เตาไมโครเวฟจะมีแม่กนิตรอน (magnetron) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่คอยทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ในอุตสาหกรรมอาหารจะใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีความถี่อยู่ที่ 915 MHz และ 2450 MHz ในกระบวนการแปรรูปอาหารซึ่งได้แก่ การละลายน้ำแข็ง (thawing) การทำให้สุก (cooking) การทำให้แห้ง (drying) การพาสเจอร์ไรซ์ (pasteurization) การสเตอริไรซ์ (sterilization) การอบ (roasting) และการลวก (blanching) เป็นต้น

2.8.2 ประโยชน์ของไมโครเวฟในการแปรรูปอาหาร (advantage of microwave in food processing)

การใช้ไมโครเวฟในการแปรรูปอาหารร่วมกับการใช้ความร้อนแบบวิธีดั้งเดิมมีข้อดีสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดความร้อนที่รวดเร็วกว่าวิธีการทำความร้อนแบบดั้งเดิม สามารถทำความร้อนให้แก่อาหารที่บรรจุภาชนะได้ การทำความร้อนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากอาหารที่อยู่รอบๆ และภายในเตาไมโครเวฟไม่ถูกทำให้ร้อน เตาไมโครเวฟมีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบวิธีดั้งเดิม ดังนั้นจึงช่วยประหยัดพื้นที่ ไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนจากภายในอาหาร การกระจายของความร้อนจึงมีความสม่ำเสมอและไม่ทำให้เกิดความร้อนที่ผิวหน้าอาหารจนเกินไป อย่างไรก็ตามการใช้ไมโครเวฟยังมีข้อด้อยที่สามารถสรุปได้ดังนี้คือ เนื่องจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของอาหารนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติแม่เหล็กไฟฟ้า โดยภายในอาหารที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันมากจะมีรูปแบบของอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก อาหารอาจจะเกิดความร้อนไม่สม่ำเสมอทุกจุด รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้สร้างคลื่นไมโครเวฟ (แมกนิตรอน) มีราคาสูงกว่าอุปกรณ์ที่ทำความร้อนแบบวิธีดั้งเดิม และต้องมีวิธีการรักษาความปลอดภัยที่แตกต่างจากการทำความร้อนโดยวิธีดั้งเดิม เป็นต้น (วิไล, 2552)

2.8.3 คุณสมบัติด้านไดอิเล็กทริกของอาหาร (dielectric properties of food)

โมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecule) จะจัดวางตัวเองตามทิศทางของสนามไฟฟ้าโดยโมเลกุลขั้วบวกจะเข้าหาขั้วลบของสนามไฟฟ้าและโมเลกุลขั้วลบจะเข้าหาขั้วบวกของสนามไฟฟ้าทำให้ความแข็งแรงของประจุจะเรียกว่า ไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ที่สามารถบอกได้ถึงขนาดของปฏิกิริยาระหว่างประจุกับสนามไฟฟ้า ค่าไดโพลโมเมนต์สามารถบอกถึง ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ซึ่งเป็นค่าที่บอกความมีขั้วของวัสดุที่อุณหภูมิใดๆ Heldman (2009) ได้ให้ความสัมพันธ์ของค่า dielectric loss และ dielectric constant ดังนี้

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$$

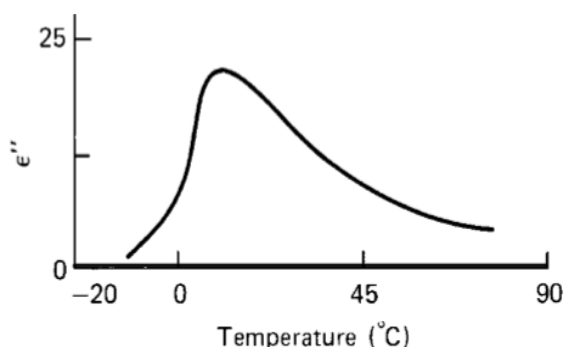
จากสมการ relative dielectric constant (ϵ') เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า ส่วน relative dielectric loss (ϵ'') เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของ

วัสดุที่กระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน และค่า loss tangent ($\tan\delta$) จะแสดงถึงอำนาจทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้า และระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเพื่อเป็นพลังงานความร้อน โดยตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของอาหารบางชนิด

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติไดอิเล็กทริกของสารและอาหารบางชนิด

อาหาร (ที่อุณหภูมิ 25°C)	dielectric constant (ϵ')	dielectric loss (ϵ'')	loss tangent ($\tan \delta$)
น้ำ	76.7	12	0.157
น้ำ (1.5°C)	80.5	25	0.310
น้ำแข็ง (-12°C)	3.2	0.0029	0.0009
0.1M โซเดียมคลอไรด์	75.5	18	0.24
เนื้อเตี๊ยะ	40.0	12	0.3
เนื้อดิบ	49.0	15	0.33
เนื้อสุก	45.0	12	0.56
เนื้อทำแห้ง	-	-	0.00096
เนื้อโค	55.0	22	0.4
เนื้อสุกร	54.0	23	0.426
มันฝรั่งบด	65	22	0.34

โดย Fellows (2000) ได้กล่าวไว้ว่าอุณหภูมินั้นจะมีผลต่อสมบัติไดอิเล็กทริกเป็นอย่างมาก ดังแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่า relative dielectric loss (ϵ'') ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุที่กระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนในรูปที่ 2.12



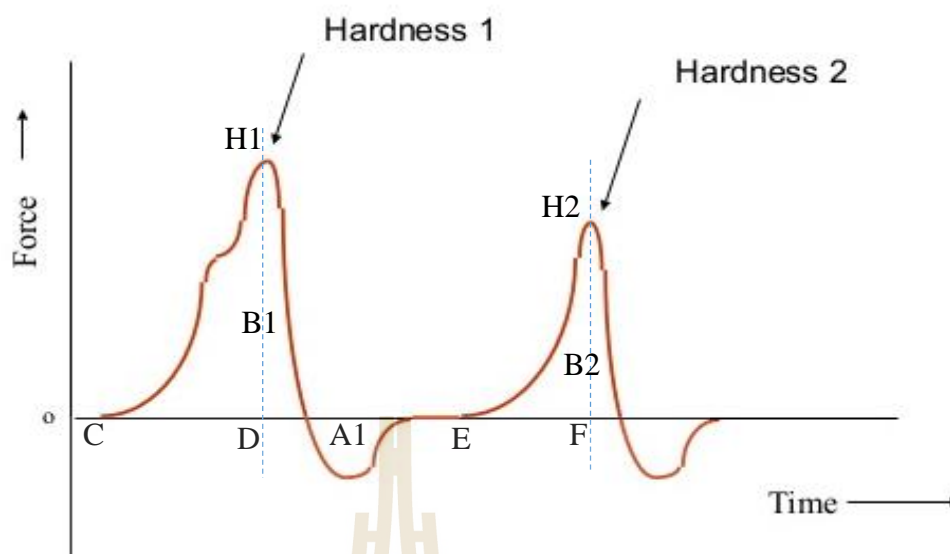
รูปที่ 2.12 Variation in dielectric loss factor of water and ice. (Fellows, 2000)

2.9 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analysis)

การทดสอบเนื้อสัมผัสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบเนื้อสัมผัสเชิงวัตถุ (objective test) การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (sensory test)

1. การทดสอบเนื้อสัมผัสเชิงวัตถุ (objective test) ใช้เครื่องมือ (texture analyzer) ในการวัดค่าเนื้อสัมผัสอาหาร โดยผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแรง เช่น แรงกด แรงเฉือน แรงเจาะ แรงผลึก เป็นต้น การทดสอบที่ได้จึงไม่ขึ้นอยู่กับความรู้สึก ค่าที่ได้จึงมีความแม่นยำและสามารถควบคุมสถานะการวัดได้ดี

texture profile analysis (TPA) เป็นการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารแบบจำลองการเคี้ยวด้วยฟันกราม 2 ครั้ง โดยให้หัวกดตกลงบนอาหารในระยะที่กำหนด เช่น กำหนดเป็นระยะที่หัวกดตกลงตัวอย่างอาหาร หรือเปอร์เซ็นต์ความเครียด จากรูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA ที่จุด H1 มีแรงกระทำสูงสุดในการกดครั้งแรก เรียกว่าค่าความแข็งช่วงที่ 1 พื้นที่ใต้กราฟ A1 จะมีค่าแรงติดลบเนื่องจากเป็นช่วงการถอนขึ้นของหัวโพรบค่านี้อาจเปรียบเสมือนพลังงานในการดึงตัวอย่างอาหารออกจากหัวกด เรียกว่า ค่าการยึดติด (adhesiveness) ช่วง E-H2 เป็นช่วงการกดช่วงที่ 2 เปอร์เซ็นต์ค่าความเครียดที่อัตราส่วน E-H2 ต่อ C-D เรียกว่าค่าความตึง (springiness) หรือ ค่าความยืดหยุ่นของตัวอย่างอาหาร (elasticity) หากมีค่าอัตราส่วนเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวอย่างอาหารมีความตึง หรือความยืดหยุ่นสูง อัตราส่วนพื้นที่ B2 ต่อ B1 เรียกว่า ค่าความยึดตัวกันเอง (cohesiveness) แสดงถึงความสามารถในการรักษาสภาพเดิมของตัวอย่างอาหารหลังถูกแรงกระทำไว้ได้ (ปานมนัส, 2555)



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัส

แบบ TPA

ตารางที่ 2.5 คำจำกัดความของเนื้อข้าวสุก

คำจำกัด	ความหมาย
ความแข็งหรือความกระด้าง (Hardness)	ปริมาณแรงที่ใช้ในการเคี้ยวข้าวสุกในช่วงครั้งแรก หรือบอกเป็นความนุ่ม
ความเหนียวติดกัน (Adhesiveness)	ปริมาณแรงที่ใช้ในการดึง แยก หรือการติดกันเองของข้าวสุก หรือขณะเคี้ยว หากข้าวสุกนุ่ม (ความเหนียวติดกันต่ำ)
ความยืดหยุ่น (Springiness)	หากความยืดหยุ่นสูงมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายยาง ความ ยืดหยุ่นต่ำพฤติกรรมคล้ายของไหลหนืด
ความเกาะติดกัน (Cohesiveness)	ความสามารถในการรักษาสภาพเดิมหลังการเคี้ยวไว้ได้ โดย ลักษณะข้าวสุกและแฉะ(ความเกาะติดกันต่ำ) ข้าวสุกนุ่ม(เกาะ ติดกันปานกลาง) และข้าวสุกแข็ง(ความเกาะติดกันน้อย)

2. การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (sensory test) เป็นการทดสอบโดยใช้มนุษย์เป็นผู้ประเมินคุณภาพของอาหาร โดยใช้ประสาทสัมผัสทั้ง 5 คือ ตา(การมองเห็น) หู(การฟัง) จมูก(การดม) ลิ้น(การชิม) และการสัมผัส การทดสอบเนื้อสัมผัสด้วยวิธีนี้มีความแม่นยำน้อยกว่าวิธีใช้เครื่องมือวัด

วิธีทดสอบการยอมรับแบบ Hedonic scale (9-point hedonic scale) เป็นการประเมินการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค โดยมีคะแนนความชอบเป็นตัวเลขตั้งแต่ 1-9 โดยที่ 1 คือ

ไม่ชอบมากที่สุด จนไปถึง 9 คือ ชอบมากที่สุด ที่แสดงถึงความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โดยตรง (ปราณี, 2557)

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature review)

2.10.1 การให้ความร้อนสแตร์ชด้วยคลื่นไมโครเวฟ

Leelayuthsoontorn และ Thipayarat. (2006) ศึกษาผลของอุณหภูมิ (80, 100, 120 และ 140°C) และความดัน (0, 0.1, 0.3 และ 0.5 MPa) ที่ใช้ในการหุงข้าวหอมมะลิต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเนื้อสัมผัสของข้าวสุก พบว่าที่ระดับความดันเดียวกันเมื่ออุณหภูมิการหุงข้าวสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของข้าวลดลง เช่นเดียวกับโครงสร้างภายในที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในมีขนาดรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่พบว่าค่าความเหนียวของข้าวที่ทุกความดันไม่มีความแตกต่างกันเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมิผลอย่างมากต่อดัชนีความขาวของข้าวสุก โดยดัชนีความขาวของข้าวสุกมีค่าลดลงเนื่องจากอุณหภูมิในการหุงที่สูงขึ้น

Zhao et al. (2007) ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติข้าวสุกด้วยวิธีการหุงข้าวโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ พบว่าเมื่อระดับกำลังคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณโปรตีน ไขมันอิสระ และปริมาณน้ำในข้าวสุกมีค่าลดลง เนื่องจากที่กำลังคลื่นไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความร้อนสูงส่งผลให้น้ำเกิดการระเหยออกจากเมล็ดข้าวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Horrungsawat และ Therdthai. (2015) ทำการศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าคลื่นไมโครเวฟ และหม้อความดันต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิหุงสุก พบว่าการหุงข้าวโดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 100±1°C นาน 13 นาที ส่งผลให้ข้าวสุกมีความแข็งและความเหนียวมากกว่าข้าวหุงสุกอีกสองวิธี อีกทั้งยังศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวหุงสุกที่ผ่านการเก็บรักษาในห้องเย็นอุณหภูมิ 8°C นาน 3 วัน และ 6 วัน พบว่าข้าวหุงสุกด้วยวิธีคลื่นไมโครเวฟและวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การหุงด้วยหม้อความดันไม่มีความแตกต่างจากข้าวหุงสุกใหม่ ซึ่งค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากข้าวที่ผ่านการหุงสุกแล้วนั้นเกิดเจลาตินในเซชันอย่างสมบูรณ์ เมื่อถูกลดอุณหภูมิลง ซึ่งเป็นปัจจัยทำให้เกิดสแตร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดที่มีการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลส โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันเชื่อมต่อกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นผลึกใหม่ เรียกกระบวนการนี้ว่า รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ส่งผลให้ข้าวหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และหุงด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ผ่านการเก็บรักษา มีค่าความแข็งของข้าวเพิ่มขึ้น

Szpees et al. (2005) ให้ความร้อนแก่สแตร์ชข้าวโพดและสแตร์ชมันฝรั่งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟขนาดกำลัง 450 วัตต์ ให้ความร้อนนาน 15 นาที เปรียบเทียบกับการให้ความร้อนด้วย

วิธีดั้งเดิม (drying heating) อุณหภูมิ 130°C นาน 2 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างผลึกของสตาร์ชด้วยเครื่อง x-ray diffractometer (XRD) พบว่าส่วนที่เป็นผลึก (crystallinity) ของสตาร์ชมันฝรั่งเพิ่มขึ้นหลังจากให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ในขณะที่หลังจากการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมทำให้ส่วนที่เป็นผลึกในสตาร์ชมันฝรั่งลดลง ส่วนสตาร์ชข้าวโพดหลังจากให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟและวิธีดั้งเดิม พบว่าส่วนที่เป็นผลึกมีค่าลดลงจาก 84.6% เป็น 30% และ 33% ตามลำดับ

Pinkrova et al., (2003) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแป้งข้าวระหว่างการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ ขนาดกำลัง 90, 350 และ 500 วัตต์ ถูกให้ความร้อนนานจนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 60, 80 และ 100°C ข้าวมีความชื้น 11, 23 และ 30% พบว่าการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณแป้งในข้าวที่ผ่านการให้ความร้อน และพบว่าเม็ดแป้งถูกทำลายโดยการดูดซับพลังงานและอุณหภูมิจากไมโครเวฟ โดยเฉพาะที่ความชื้น 30% อุณหภูมิสุดท้าย 100°C ที่ทุกกำลังคลื่นไมโครเวฟ

Zhang et al., (2009) ศึกษาผลของการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟตั้งแต่ 400 ถึง 1000 วัตต์ ร่วมกับความชื้นตั้งแต่ 20 ถึง 45%(w/w) ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช พุทธรักษา ให้ความร้อนนาน 5 ถึง 30 นาที พบว่าที่กำลังคลื่นไมโครเวฟ 400 และ 1000 วัตต์ (ความชื้น 40% ให้ความร้อนนาน 10 นาที) เอนไซม์สามารถย่อยสตาร์ชได้ลดลง สนับสนุนการเกิดสตาร์ชที่ไม่สามารถย่อยด้วยเอนไซม์ (RS) เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง (x-ray diffraction, XRD) พบว่าความชื้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสตาร์ช โดยสตาร์ชที่มีความชื้น 35, 40 และ 45% กำลังคลื่นไมโครเวฟ 800 วัตต์ ให้ความร้อนนาน 10 นาที โครงสร้างผลึกค่อยๆ เปลี่ยนจากแบบ B-type เป็นแบบ A-type ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของพันธะคู่ helices

Roman et al., (2015) ศึกษาผลของวิธีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพด ที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา 0.5, 1, 2 และ 4 นาที วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเม็ดสตาร์ชด้วย SEM พบว่าโครงสร้างเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย เสียรูป และแยกออกจากกันเมื่อเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น และศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD พบว่าการใช้ความร้อนด้วยไมโครเวฟทำให้สตาร์ชข้าวโพดมีแนวโน้มโครงสร้างนำไปสู่แบบ V-type

2.10.2 ผลของการเติมลิพิด (lipids) ในสตาร์ช

Zhou et al., (2007) ศึกษาผลของการเติมกรดไขมันสองชนิด (stearic acid และ linoleic acid) ลงในสตาร์ชข้าวปริมาณ 1% ของปริมาณสตาร์ชข้าวทั้งหมด ศึกษาคุณสมบัติความหนืดของสตาร์ชเทียบกับสตาร์ชธรรมชาติ (native starch) พบว่า สตาร์ชที่เติมกรดไขมัน stearic มีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) ลดลง

อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ศึกษาผลของการเติมกรดทั้งสองชนิดต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับกรดไขมัน วัตถุประสงค์ทางความร้อนของสตาร์ชด้วยเครื่อง DSC แสดงพีคที่มีลักษณะดูดความร้อน (endotherm) พบว่าพลังงานในการเกิดเจลหลังการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชธรรมชาติ สตาร์ชเติมกรดไขมัน stearic และ linoleic มีค่าเป็น 2.18 ± 0.13 J/g, 1.64 ± 0.09 J/g และ 2.05 ± 0.12 J/g ตามลำดับ การเติมกรดไขมัน stearic ซึ่งเป็นไขมันอิ่มตัวมีผลไปขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของอะมิโลสในระหว่างอุณหภูมิลดลง หรือในระหว่างการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช อีกทั้งยังศึกษาผลของการเติมกรดไขมันทั้งสองชนิดต่อการชะล้าง (leaching) อะมิโลสในเม็ดแป้ง พบว่าปริมาณอะมิโลสละลายออกมาจากเม็ดแป้งน้อยลงหลังจากเติมกรดไขมันทั้งสองชนิด

Ai et al., (2013) ศึกษาผลของการเติมลิพิด (lipids) ต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าวโพด (NCS) มันสำปะหลัง (TPS) ข้าวโพดเหนียว (WCS) และข้าวโพดอะมิโลสสูง (HA7) โดยให้ความร้อนกับสตาร์ชด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (water bath) 95°C นาน 8 นาที ทำการหาเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของสตาร์ชที่ไม่เติมลิพิดพบว่า สตาร์ชข้าวโพดอะมิโลสสูง (HA7) มีอัตราการย่อยได้ต่ำเพียง 35% ส่วนสตาร์ชข้าวโพด (NCS) ข้าวโพดเหนียว (WCS) และมันสำปะหลัง (TPS) มีอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์เป็น 72%, 76.3% และ 77.5% ตามลำดับ หลังจากเติมลิพิด corn oil (CO), soy lecithin (SL), palmitic acid (PA), stearic acid (SA), oleic acid (OA) และ linoleic acid (LA) ปริมาณ 10% ลงในสตาร์ช พบว่าเปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชมันสำปะหลัง (TPS) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 77.5% ลดลงเป็น 65.5%, 66.1%, 66.4%, 66.8%, 69.5% และ 72% เมื่อเติมลิพิด SA, PA, CO, OA, SL และ LA ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชข้าวโพด (NCS) และสตาร์ชข้าวโพดอะมิโลสสูง (HA7) หลังจากเติมลิพิดแล้วส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชมีค่าลดลงเช่นกัน แต่น้อยกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง (TPS) ซึ่งอัตราการย่อยด้วยเอนไซม์ที่ลดลงของสตาร์ชหลังจากเติมลิพิดอาจเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex)

2.10.3 ผลของการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิต่างๆ

Perdon et al., (1999) ศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ -13, 3, 20 และ 36°C ต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันและเนื้อสัมผัสของข้าวสุกทั้งสองชนิดคือ Bengal และ Cypress ระยะเวลาการเก็บรักษานาน 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่อง texture analyzer พบว่าค่าเฉลี่ยความแน่นเนื้อ (firmness) ของข้าวสุก Cypress มากกว่า Bengal โดยข้าวสุกทั้งสองชนิด มีค่าความแน่นเนื้อลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 3°C ของข้าวสุก Cypress มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเฉลี่ยความเหนียว (stickiness) ของข้าวสุกทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น โดยที่ข้าวสุก Bengal มีค่าความเหนียวมากกว่าข้าวสุก Cypress

เนื่องจากข้าว Cypress มีปริมาณอะมิโลสมากกว่าข้าว Bengal นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการเกิดรีโทรเกรเดชัน มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าความแน่นเนื้อ

Sonia et al., (2015) ศึกษาผลของการลดอุณหภูมิข้าวขาวสุกต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และการตอบสนองต่อระดับน้ำตาลในเลือด วิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในข้าวหุงสุกใหม่ (control rice) มีค่าเท่ากับ 0.64 g/100g ลดอุณหภูมิข้าวขาวสุกโดยปล่อยให้อุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิห้องนาน 10 ชั่วโมง (test rice I) และที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวหุงสุกใหม่เป็น 1.3 g/100g และ 1.65 g/100g ตามลำดับ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือซึ่งประกอบด้วย ชื่อรุ่น และเงื่อนไขของการใช้งาน (conditions of equipment) รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิธีการหุงข้าวและวิธีการเก็บรักษาเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุดิบ และการเตรียมวัสดุดิบ

ข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L.) มีอายุหลังการเก็บเกี่ยว 18 เดือนโดยได้รับจากศูนย์วิจัยข้าวนครราชสีมา อำเภอมาย จังหวัดนครราชสีมา เป็นวัสดุดิบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นำข้าวเปลือกมากะเทาะเปลือก ด้วยเครื่องกะเทาะข้าวกล้อง 2 ลูกยาง รุ่น NW 150 (บริษัท ที.เอส.เอ็ม. ซายด์ จำกัด) ก่อนนำไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาว รุ่น BBS-G100 (บริษัท เบ็ลท แอนด์ เบริงส์ จำกัด) จากนั้นคัดแยกข้าวเมล็ดหักออก บรรจุข้าวสารเมล็ดเต็มในถุงแบบสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อรอการทดสอบต่อไป

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ข้าวสารเมล็ดเต็มถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณ โปรตีน, ไขมัน, เยื่อใย, ความชื้น และเถ้า ตามวิธีของ Saldivar (2012) และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตตามวิธีของ Watchararpaiboon et al. (2010) วิเคราะห์หาปริมาณอะมิโลสตามวิธีของ Juliano (1971) โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) อะมิโลสจากแป้งมันฝรั่ง (amylose from potato) ถูกใช้ในการสร้างกราฟมาตรฐาน (standard curve) โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

3.3 การศึกษาวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุก

3.3.1 การศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อระดับความสุกของข้าว

ศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อระดับความสุกของข้าวที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และหุงด้วยเตาไมโครเวฟ (รูปที่ 3.1) ออกแบบแผนการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) ชนิดอิทธิพลกำหนด (fixed effect model) โดยมี 1 ปัจจัย คือ อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 4 ระดับ ได้แก่ 1:1.5 1:1.6 1:1.7 และ 1:1.8 ของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ระดับ 1:1.8 1:2 1:2.2 และ 1:2.4 ของวิธีการหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ ข้าวสุกได้ถูกนำมาทดสอบหาระดับความสุกของข้าว คัดแปลงวิธีจาก กาญจนนา และคณะ (2556) เพื่อหาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม โดยนำเมล็ดข้าวสุก 6 เมล็ดที่อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในแต่ละระดับข้างต้นวางบนแผ่นกระดาษและกดทับเมล็ดข้าวสุกด้วยกระดาษอีกแผ่น นับจำนวนข้าวสุกที่มีจุดไต้ขุนขาวที่เหลืออยู่และคำนวณหาระดับความสุกของข้าวดังสมการ (1)

$$\text{ระดับความสุกของข้าว (\%)} = \frac{\text{จำนวนเมล็ดข้าวทั้งหมด} - \text{จำนวนเมล็ดข้าวที่มีจุดไต้ขุนขาวเหลืออยู่}}{\text{จำนวนเมล็ดข้าวทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

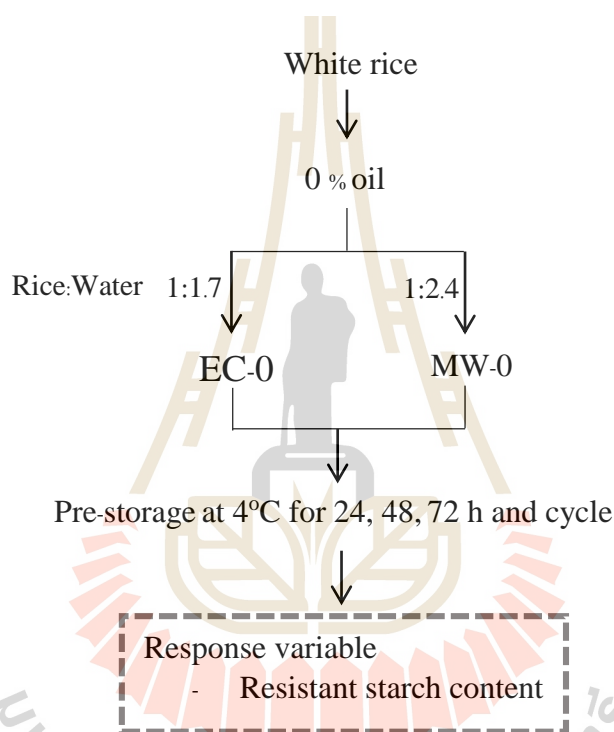


รูปที่ 3.1 หม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟที่ใช้ในการหุงข้าว

3.3.2 การศึกษาระยะเวลาการบ่มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (EC-0) และเตาไมโครเวฟ (MW-0) แบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว โดยนำข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการกะเทาะเปลือก ขัดขาว และคัดข้าวเมล็ดเต็ม นำมาหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า รุ่น RC-5MSKA (toshiba, Thailand) ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.7 เวลาที่ใช้ในการหุง 42 นาที และหุงด้วยเตาไมโครเวฟ รุ่น CE118P (samsung, Thailand) อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2.4

เวลาที่ใช้ในการหุง 12 นาที โดยนำข้าวออกมาคนทุกๆ 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิของข้าวสุกลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 30°C บรรจุข้าวสุกในถุงพลาสติกถุงละ 100 กรัม ปิดผนึกแบบสุญญากาศ และบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 48 และ 72 ชั่วโมง นอกจากนี้ตัวอย่างข้าวสุกที่ผ่านการบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมงถูกแบ่งมาให้ความร้อนอีกครั้งด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C ต่อเป็นเวลาอีก 24 ชั่วโมง (รูปที่ 3.2) วิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch, RS) โดยทำการหุงข้าวจำนวน 2 ครั้ง และวิเคราะห์ปริมาณ RS จำนวน 4 ซ้ำ โดยตัวอย่างข้าวหุงสุกใหม่ด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และเตาไมโครเวฟเป็นตัวอย่างควบคุม (control)



รูปที่ 3.2 การศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

3.3.3 การศึกษาวิธีการหุงและระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

3.3.3.1 การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า 2 แบบ คือแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0) และแบบเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 ของน้ำหนักข้าวสาร (EC-1) โดยนำข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการกะเทาะเปลือก

ขัดขาว และคัดข้าวเมล็ดเต็ม นำมาหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า รุ่น RC-5MSKA (Toshiba, Thailand) ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.7 เวลาที่ใช้ในการหุง 42 นาที

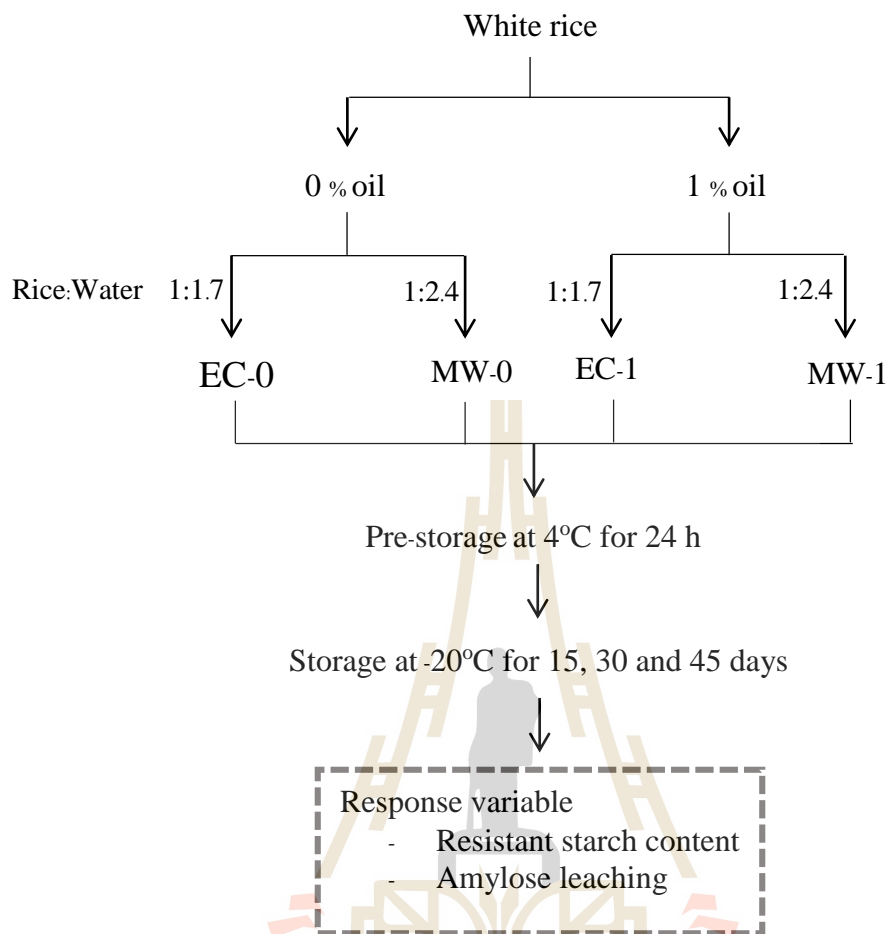
3.3.3.2 การหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ

หุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ 2 แบบ คือแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (MW-0) และแบบเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 ของน้ำหนักข้าวสาร (MW-1) โดยนำข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการกะเทาะเปลือก ขัดขาว และคัดข้าวเมล็ดเต็ม นำมาหุงด้วยเตาไมโครเวฟ รุ่น CE118P (Samsung, Thailand) อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2.4 เวลาที่ใช้ในการหุง 12 นาที โดยนำข้าวออกมากคนทุกๆ 5 นาที

3.3.3.3 การเก็บรักษาข้าวสุก

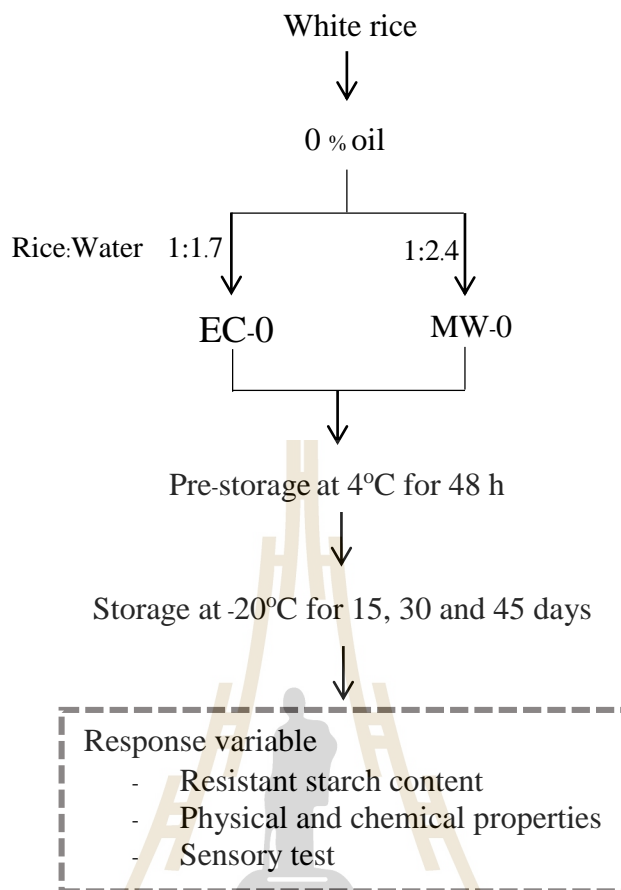
ข้าวที่ผ่านการหุงจาก 4 วิธีข้างต้น คือ หม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมัน (EC-0) หม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบเติมน้ำมัน (EC-1) เตาไมโครเวฟแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (MW-0) และเตาไมโครเวฟแบบเติมน้ำมันรำข้าว (MW-1) ถูกนำมาลดอุณหภูมิของข้าวสุกลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 30°C บรรจุข้าวสุกในถุงพลาสติกถุงละ 100 กรัม ปิดผนึกแบบสุญญากาศ จากนั้นบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน วิเคราะห์ปริมาณ RS และปริมาณการละลายอะมิโลส (amylose leaching, AML) ทุกๆ 15 วันของการเก็บรักษา ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.3 โดยทำการหุงข้าวจำนวน 2 ครั้ง และวิเคราะห์ปริมาณ RS และ AML จำนวน 4 ซ้ำ โดยตัวอย่างข้าวหุงสุกใหม่ด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเป็นตัวอย่างควบคุม (control)

ข้าวที่ผ่านการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมัน (EC-0) และเตาไมโครเวฟแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (MW-0) ถูกนำมาลดอุณหภูมิของข้าวสุกลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 30°C บรรจุข้าวสุกในถุงพลาสติกถุงละ 100 กรัม ปิดผนึกแบบสุญญากาศ จากนั้นบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพ และทดสอบทางประสาทสัมผัส ทุกๆ 15 วันของการเก็บรักษา โดยตัวอย่างข้าวหุงสุกใหม่ด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเป็นตัวอย่างควบคุม (control) ดังแสดงขั้นตอนในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การศึกษาผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกหลังจากป่นที่อุณหภูมิ 4°C

นาน 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.4 การศึกษาผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกหลังจากต้มที่อุณหภูมิ 4 °C

นาน 48 ชั่วโมง

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

3.4.1 การวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS)

วิเคราะห์ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ตามวิธีการของ AOAC method 2002.02 โดยใช้ชุดทดสอบ resistant starch assay kit ของ megazyme (megazyme inc., wicklow, Ireland) มีขั้นตอนดังนี้ ชั่งตัวอย่างข้าวหุงสุกบด 100 ± 5 มิลลิกรัม ใส่ในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิตร เติมเอนไซม์ผสมระหว่าง pancreatic α -amylase และ amyloglucosidase (3 U/ml) ที่เตรียมในสารละลายโซเดียมมาลิเอทบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.0 ปริมาตร 4 มิลลิลิตรผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixer และนำไปบ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เขย่า 200 strokes/min ที่

อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยวางหลอดในแนวขนานกับการเคลื่อนที่และทำการเขย่าตลอดเวลา จากนั้นเติมเอทานอล 99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยาและนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500g (ประมาณ 3000 rpm)(centrifuge, hien 18, herolab, Germany) เป็นเวลา 10 นาที ถ้ายของเหลวส่วนใสจากหลอดเดิมใส่อีกหลอด เดิมเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในส่วนของตะกอน ผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixer แล้วเติมเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรอีก 6 มิลลิลิตร ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500 g เป็นเวลา 10 นาที ทำซ้ำอีกครั้ง จากนั้นใส่ magnetic bar ลงในหลอดที่มีตะกอน และเติมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในแต่ละหลอด ผสมให้เข้ากัน กวน 20 นาที เติมโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 1.2 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด – ด่าง 3.8 ปริมาตร 8 มิลลิลิตรลงในแต่ละหลอด เติมเอนไซม์ amyloglucosidase (3300 U/ml) ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันดี บ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ

(สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ RS มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) นำสารละลายที่ออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ ถ้ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ล้างหลอดและ magnetic bar ด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายให้ครบ 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500 g เป็นเวลา 10 นาที

(สำหรับตัวอย่างที่มีปริมาณ RS น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) นำสารละลายที่ออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ แล้วปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 1500 g เป็นเวลา 10 นาที (ไม่ต้องทำการเจือจางสารละลาย) โดยปริมาตรสุดท้ายจะเป็น 10.3 มิลลิลิตร

ดูดสารละลายที่ได้มา 0.1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง เติม GOPOD reagent ปริมาตร 3 มิลลิลิตร บ่มในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายในแต่ละหลอดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Hitachi U-2900 UV-VIS, Biochrom, Japan) ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และคำนวณปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จากสูตร

$$\text{ปริมาณ RS (กรัม/100 กรัมตัวอย่าง) (สำหรับ RS > 10 เปอร์เซ็นต์)} = \Delta E \times F/W \times 90$$

$$\text{ปริมาณ RS (กรัม/100 กรัมตัวอย่าง) (สำหรับ RS < 10 เปอร์เซ็นต์)} = \Delta E \times F/W \times 9.27$$

เมื่อ ΔE = ค่าการดูดกลืนแสง

F = ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

90 = เฟกเตอร์สำหรับเปลี่ยน free D-glucose เป็น anhydro-D-glucose

3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณการละลายอะมิโลส (amylose leaching, AML)

วิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสที่ถูกชะล้าง โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างข้าวหุงสุก 20 มิลลิกรัม ใส่หลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นลงในหลอดปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เขย่าทุกๆ 5 นาที หลังจากนั้นทำการเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge, hettich, universal 16 R, Germany) ความเร็ว 1,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณการละลายอะมิโลสตามวิธีการของ Juliano (1971) โดยทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ

3.4.3 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึก

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง x-ray diffractometer (XRD) เพื่อหารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยคัดแปลงวิธีจาก สุนันทา (2552) บรรจุตัวอย่างข้าวสุกบดละเอียดที่ผ่านการระเหิดแห้งลงในภาชนะใส่ตัวอย่าง อัดให้แน่นแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง powder x-ray diffractometer รุ่น D5005 (Bruker GmbH, Germany) ดังรูปที่ 3.5 กำหนดค่าความต่างศักย์ที่ 30 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ ใช้ divergen slit 1 องศา anti slit 1 องศา และสแกนในช่วงมุม 2 θ เท่ากับ 4-35 องศา ด้วยอัตราการหมุน 0.02 รอบต่อชั่วโมง คำนวณหาปริมาณสภาพเป็นผลึก (degree of crystallinity) จากอัตราส่วนของพื้นที่พีค (diffraction peak area) ต่อพื้นที่ทั้งหมด (total diffraction area) ของกราฟ diffraction pattern โดยทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

3.4.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (NETZSCH DSC 204 F1) ดังรูปที่ 3.6 คัดแปลงวิธีจาก สุนันทา (2552) โดยเติมน้ำกลั่นลงในตัวอย่างข้าวสุกที่ผ่านการระเหิดแห้ง 70% บ่มทิ้งไว้อย่างน้อย 12 ชั่วโมง ใส่ตัวอย่างลงในถาดอะลูมิเนียม (sample pan) น้ำหนักไม่เกิน 10 มิลลิกรัม (บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง) ปิดฝาให้สนิทด้วยเครื่องปิดผนึก นำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตินในเซชันด้วยเครื่อง DSC โดยใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5°C ต่อนาที จาก 30 ถึง 150°C โดยใช้ถาดอะลูมิเนียมเปล่า (reference pan) เป็นถาดอ้างอิง ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนสถานะ (onset temperature, T_o), อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสูงสุด (peak temperature, T_p) คืออุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนสถานะ (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน ($T_c - T_o$) โดยใช้โปรแกรม NETZSCH Proteus® software ในการวิเคราะห์ผลโดยทำการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดสมบัติเชิงความร้อน

3.4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) รุ่น JSM 6010LV (JEOL, Tokyo, Japan) ดังรูปที่ 3.7 ใช้ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการบดลดขนาดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 300 ไมโครเมตร ตัวอย่างถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนนำเข้าเครื่อง SEM ใช้โหมดแสง SEI ระดับพลังงาน 5 kV และระดับกำลังขยายของภาพเท่ากับ 100-1000 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาการเก็บรักษาข้าวสุก



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.4.6 การวิเคราะห์ดัชนีความขาว (whiteness index; WI)

วิเคราะห์ดัชนีความขาว โดยใช้เครื่องวัดค่าความขาวข้าว รุ่น tester C-600 (kett electric laboratory, Tokyo, Japan) ดังรูปที่ 3.8 นำข้าวหุงสุกบรรจุใส่ในภาชนะบรรจุตัวอย่างก่อนใส่ลงไปเครื่อง โดยเครื่องจะคำนวณค่าความขาวตัวอย่างเทียบกับแผ่นค่ามาตรฐานความขาว (WI=85.1)



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดค่าความขาวเมล็ดข้าว

3.4.7 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer)

วิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวสุกหลังจากการเก็บรักษา โดยชั่งตัวอย่างข้าวสุก 30 กรัม ใส่กระป๋องโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร และสูง 4 เซนติเมตร กดทับข้าวสุกด้วยน้ำหนัก 100 กรัม นาน 3 นาที ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ texture profile analysis (TPA) ด้วยเครื่อง texture Analyzer (TA.XTPlus, texture technologies corp. and stable micro systems,

ltd., MA, USA) ดังรูปที่ 3.9 เพื่อจำลองการใช้ฟันบดข้าว โดยที่ข้าวสุกมีอุณหภูมิขณะวัด 30 °C โดยใช้หัววัด cylinder probe P/25 ค่าสถานะในการวัดลักษณะเนื้อสัมผัส ดังตารางที่ 3.1 วิเคราะห์ค่าความแข็ง (hardness) ค่าการยึดติดกับวัสดุที่สัมผัส (adhesiveness) ค่าการยึดเกาะกันภายในข้าว (cohesiveness) และค่าความสามารถในการคืนตัวหลังจากการกดครั้งแรก (springiness) วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Texture Exponent Software (version 6.1.7.0, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA) โดยทำการทดลองทั้งหมด 4 ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 สถานะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส

Parameter	Value
Pre test speed	1 mm/sec
Test speed	1 mm/sec
Post test speed	10 mm/sec
Target mode	Strain
Strain	50%
Time	5 sec
Trigger type	Auto(force)
Trigger force	5 g



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

3.4.8 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุก

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9-point hedonic scale ให้คะแนนตั้งแต่ 1-9 (1 หมายถึงชอบน้อยที่สุด ไปถึง 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) ในด้านสี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมต่อตัวอย่างข้าวสุก (ภาคผนวก ค) ทดสอบตัวอย่างข้าวหุงสุกจำนวน 5 ตัวอย่าง ต่อครั้ง ตัวอย่างละ 10 กรัม บรรจุในถ้วยพร้อมฝาปิด ควบคุมอุณหภูมิข้าวสุกในการทดสอบที่ 30 °C สำหรับผู้ทดสอบประเภทบุคคลทั่วไปที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 50 คน

3.4.9 การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์

ตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (total plate count) ที่อาจก่อให้เกิดการเน่าเสียภายหลังจากการเก็บรักษาข้าวสุกด้วยเทคนิค pour plate โดยเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดสามารถเกิดได้ทั้งบนผิวน้ำและในเนื้ออาหารเลี้ยงเชื้อ โดยชั่งตัวอย่างข้าวสุกจำนวน 25 กรัม (น้ำหนักของตัวอย่างไม่ควรน้อยกว่า 10 กรัม) ใส่ลงใน sterile stomacher bag ที่มี 0.1% sterile peptone ปริมาตร 225 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง stomacher blender ประมาณ 2 นาที (จะได้ความเจือจาง 1:10 or 10⁻¹) จากนั้นเจือจางตัวอย่าง 10-fold serial dilution ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ โดยเปิดอาหารเหลวปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน 0.1% sterile peptone ปริมาตร 9 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง (จะได้ความเจือจาง 10⁻²) เปิดสารละลายเจือจางที่ 10⁻¹ และ 10⁻² ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงใน sterile Petri dishes จำนวน 3 ซ้ำ เเทอาหารเลี้ยงเชื้อ plate count agar (PCA) 20 มิลลิลิตร ที่มีอุณหภูมิ 45°C แล้วผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัว นำจานเลี้ยงเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C นาน 24 ชั่วโมงโดยคว่ำจานเลี้ยงเชื้อลง นับจำนวนโคโลนีและคำนวณหาจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดเป็น colony forming unit/gram (CFU/g)

3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบแฟคตอเรียลแบบสุ่มสมบูรณ์ (complete randomized factorial design) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบ 2 ทาง (two-way ANOVA) สำหรับผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ completely randomized design (CRD) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 °C เป็นเวลา 0 15 30 และ 45 วัน โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี turkey's honestly significant different (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05) โดยใช้โปรแกรม minitab® 17

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว (chemical composition of white rice)

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ได้แก่ โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร คาร์โบไฮเดรต เถ้า และความชื้น ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 ซึ่งผลการทดลองในการศึกษานี้ ปริมาณโปรตีน ไขมัน ใยอาหาร คาร์โบไฮเดรต และเถ้า ของตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 สอดคล้องกับผลการทดลองของ ผาณิต และคณะ (2555); Watchararparpaiboon et al. (2010); Daomukda et al. (2011) และนราพร (2553) ซึ่งพบว่าตัวอย่างข้าวมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์โบไฮเดรต และมีปริมาณโปรตีนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8-9% อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เนื่องมาจากวิธีการเก็บรักษาข้าวก่อนทำทดลอง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 (KDM105)

Chemical composition (% , dry basis)*					
Protein	Fat	Fiber	Carbohydrate	Ash	Moisture content
8.61±0.07	0.68±0.05	0.92±0.03	75.55±0.36	0.42±0.01	13.83±0.13

*ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2 ปริมาณอะมิโลส (amylose content)

สายโมเลกุลอะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารละลายไอโอดีนซึ่งให้สารละลายสีน้ำเงินที่เป็นลักษณะเฉพาะของสตาร์ชที่บ่งบอกว่ามีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบ จากการวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีนตามวิธีการของ Juliano (1971) พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีปริมาณอะมิโลสเริ่มต้นเฉลี่ย 17.32 (% โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่มีอะมิโลสต่ำ (กรมวิชาการเกษตรและกรมส่งเสริมสหกรณ์, 2541) สอดคล้องกับการทดลองของ นราพร ดาลัย (2553) พบว่ามีปริมาณอะมิโลสเริ่มต้นในข้าวขาวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 17.85 (% โดยน้ำหนักแห้ง)

4.3 ผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ (effects of cooking and storage methods of cooked rice on the changes of chemical and physical properties)

4.3.1 การทดสอบหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม

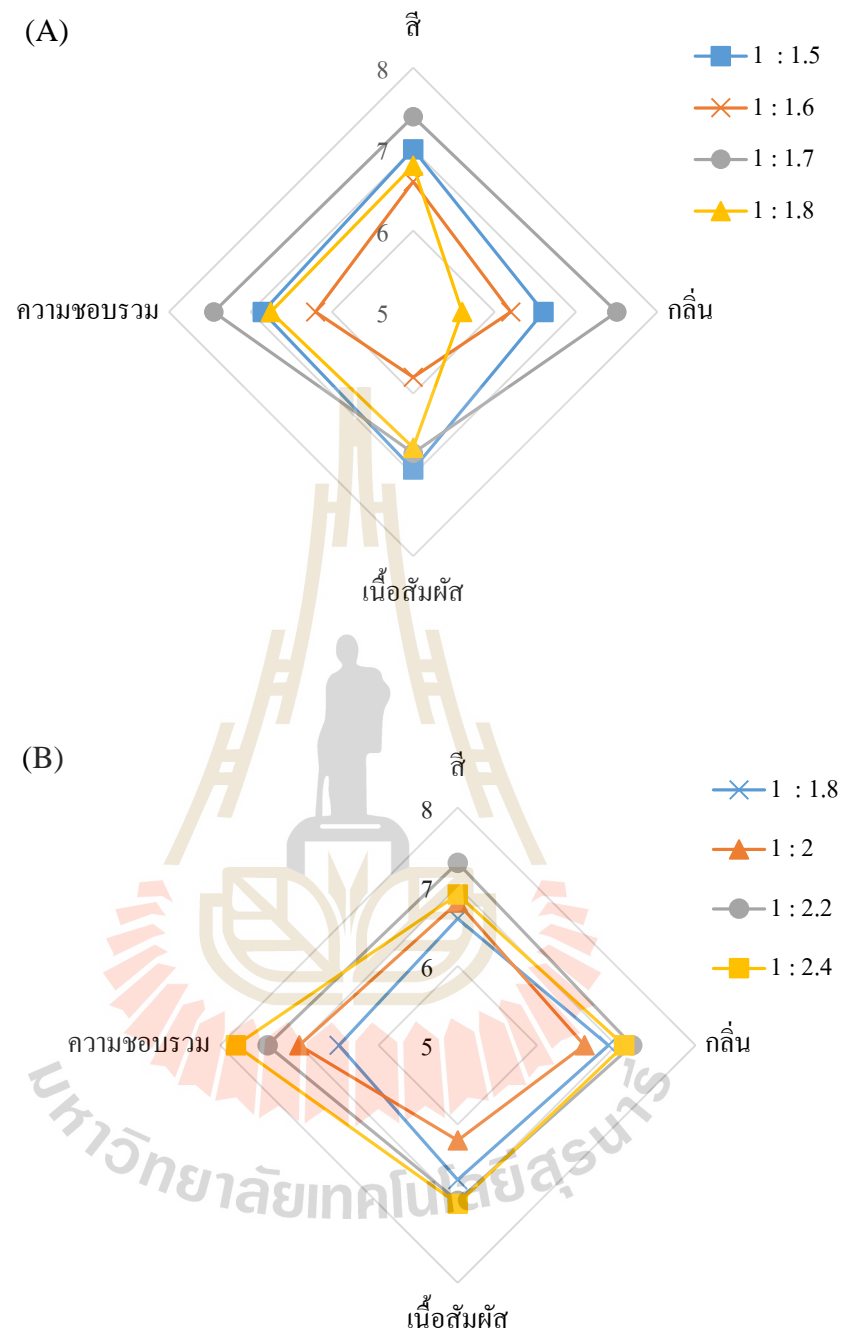
การหุงข้าวให้สุกพอดีไม่แข็งหรือไม่แฉะจนเกินไปจำเป็นต้องคำนึงถึงอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงต้มเป็นสิ่งสำคัญ จากการศึกษาหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และเตาไมโครเวฟ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2 พบว่า การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่ทุกอัตราส่วน 1:1.5 1:1.6 1:1.7 และ 1:1.8 ให้ระดับความสุก 100% ส่วนข้าวที่หุงด้วยเตาไมโครเวฟพบว่า มีระดับความสุก 100% ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2.4 ดังภาพแสดงในภาคผนวก ก

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสกับบุคคลทั่วไปเบื้องต้นจำนวน 10 คน โดยวิธีการทดสอบการยอมรับด้วยวิธี 9 point hedonic scale พบว่าคะแนนความชอบโดยรวมของข้าวที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด โดยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:1.7 โดยมีระดับความชอบเฉลี่ยอยู่ที่ 7.45 คือชอบปานกลางถึงชอบมาก รองลงมาคือที่อัตราส่วน 1:1.5 1:1.8 และ 1:1.6 ตามลำดับ ส่วนข้าวที่หุงด้วยเตาไมโครเวฟพบว่าคะแนนความชอบโดยรวมมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2.4 โดยมีระดับความชอบเฉลี่ยอยู่ที่ 7.8 คือชอบปานกลางถึงชอบมาก รองลงมาคือที่อัตราส่วน 1:2.2 1:2 และ 1:1.8 ตามลำดับ (รูปที่ 4.1) ดังนั้นในการศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพจะเลือกใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.7 สำหรับการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2.4 สำหรับการหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.2 ความสุกของข้าวที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำแต่ละระดับ

Cooking method ¹	Degree of cooked rice (%)						
	1:1.5	1:1.6	1:1.7	1:1.8	1:2	1:2.2	1:2.4
EC	100	100	100	100	-	-	-
MW	-	-	-	66.67	83.33	83.33	100

¹EC และ MW คือ วิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ แต่ละระดับ (A) ข้าวที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (B) ข้าวที่หุงด้วยเตาไมโครเวฟ

4.3.2 ผลของวิธีการหุงข้าวและระยะเวลาที่ใช้ในการต้มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (effects of cooking methods and incubation times of cooked rice on the change of resistant starch content)

ทำการศึกษาผลของวิธีการหุงข้าว 2 วิธี คือ หุงข้าวแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (EC-0) และเตาไมโครเวฟ (MW-0) จากนั้นต้มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลาต่างกัน คือ 24 48 72 ชั่วโมง และ cycle คือการนำข้าวสุกที่ผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำกลับไปให้ความร้อนอีกครั้งด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าก่อนจะนำไปต้มที่อุณหภูมิ 4°C ต่ออีก 24 ชั่วโมง จากนั้นตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS)

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลของวิธีการหุงข้าวและระยะเวลาที่ใช้ในการต้มข้าวสุกต่อปริมาณ RS พบว่าส่วนใหญ่วิธีการหุงข้าวและระยะเวลาการต้มข้าวสุกไม่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS ยกเว้นที่ระยะเวลาการต้ม 48 ชั่วโมง ปริมาณ RS ของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.37 (% โดยน้ำหนักแห้ง) รองลงมาคือการหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟมีปริมาณ RS เท่ากับ 8.49 (% โดยน้ำหนักแห้ง) โดยจะเห็นว่าปริมาณ RS ในข้าวหุงสุกใหม่ (control) มีแนวโน้มปริมาณน้อยที่สุด ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวสุกระหว่างการต้มที่อุณหภูมิต่ำ เช่น ที่ 3-4°C ส่งผลให้ปริมาณ RS เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Sonia et al., 2015 และ Sullivan et al., 2017) ความแปรปรวนของปริมาณ RS ของข้าวสุกที่ผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 4°C พบว่าระยะเวลาต้มข้าวสุก (X_1) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS แต่วิธีการหุงข้าว (X_2) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS นอกจากนี้ยังไม่พบการมีอิทธิพลร่วมกันระหว่างระยะเวลาต้มและวิธีการหุงข้าวสุก ($X_1 * X_2$) ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS (p -value = 0.18) ดังตารางที่ ค.1 ในภาคผนวก ค

ดังนั้นในการศึกษาการเก็บรักษาข้าวสุกแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS จึงเลือกการต้มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C ต่อไป

ตารางที่ 4.3 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C

Incubated cooked rice ¹	RS content (g/100g dry sample) ²	
	EC	MW
control	5.45±0.56 ^c	6.13±0.03 ^{bc}
24h	6.15±0.01 ^{bc}	6.38±0.01 ^{bc}
48h	10.37±1.02 ^a	8.49±0.40 ^{ab}
72h	6.49±1.51 ^{bc}	6.73±0.16 ^{bc}
cycle	6.51±1.18 ^{bc}	6.78±0.92 ^{bc}
p-value of interaction	0.180	

¹control คือข้าวหุงสุกใหม่ (ตัวอย่างควบคุม)

²EC และ MW คือ วิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟ ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ ตัวอักษรที่มีความต่างกันในตาราง แสดงถึงความแตกต่างของปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3.3 ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (effects of cooking and storage methods of cooked rice on the change of resistant starch content)

4.3.3.1 ผลของการบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็ง

ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าว 4 วิธี คือ หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและไมโครเวฟ แบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0 และ MW-0) และแบบเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 (EC-1 และ MW-1) จากนั้นลดอุณหภูมิของข้าวสุกก่อนบรรจุใส่ถุงพลาสติกและปิดผนึกแบบสุญญากาศเพื่อเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง และนำไปเก็บแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน โดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณ RS และปริมาณการละลายอะมิโลส (amylose leaching, AML) ทุกๆ 15 วัน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 แสดงผลปริมาณ RS ของข้าวหุงใหม่ (control) และข้าวที่ผ่านการบ่ม 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน ด้วยวิธีการหุงข้าวต่างกัน พบว่าการหุงข้าวแบบ EC-0 และ EC-1 ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 45 วัน มีปริมาณ RS มากที่สุดเท่ากับ 13.09 และ 11.59 49 (% โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การหุงข้าวแบบ EC-0 และ EC-1 ที่ถูกเก็บรักษานาน 15 และ 30 วัน และ MW-0 และ MW-1 ถูกเก็บ

รักษานาน 15 30 และ 45 วัน มีปริมาณ RS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ทั้งนี้พบว่าการหุงข้าวแบบ EC-0 EC-1 และ MW-0 แบบหุงใหม่ (control) มีค่าปริมาณ RS ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) อยู่ระหว่าง 5.45-6.47 (%โดยน้ำหนักแห้ง)

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณ RS ของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทั้งแบบ EC-0 และ EC-1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการหุงข้าวแบบ EC-0 ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการเติมน้ำมันรำข้าวมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชข้าว โดยเฉพาะการเกิด RS จากงานวิจัยของ Ai et al. (2013) พบว่าการเติมน้ำมันรำข้าวโพด และกรดไขมันอิสระลงในตัวอย่างสตาร์ชข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลังมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงการย่อยสลายสตาร์ชด้วยเอนไซม์และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ ในขณะที่การหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟทั้งแบบ MW-0 และ MW-1 มีแนวโน้มการเกิด RS คงที่หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 15 วัน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวหุงสุกใหม่ (control) และข้าวหุงสุกที่ผ่านการต้ม 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน

RS content (g/100g dry sample) ²				
Cooking method ¹	Frozen storage (days)			
	0	15	30	45
EC-0	6.47±0.55 ^c	7.99±0.27 ^{bc}	8.08±0.73 ^{bc}	13.09±1.07 ^a
EC-1	8.37±0.41 ^{bc}	7.64±0.64 ^{bc}	7.22±0.86 ^{bc}	11.59±1.64 ^a
MW-0	6.36±0.04 ^c	8.67±0.23 ^b	7.84±0.43 ^{bc}	8.72±1.10 ^b
MW-1	8.48±0.37 ^{bc}	8.44±0.18 ^{bc}	7.42±0.15 ^{bc}	8.09±0.62 ^{bc}
p-value of interaction			0.000	

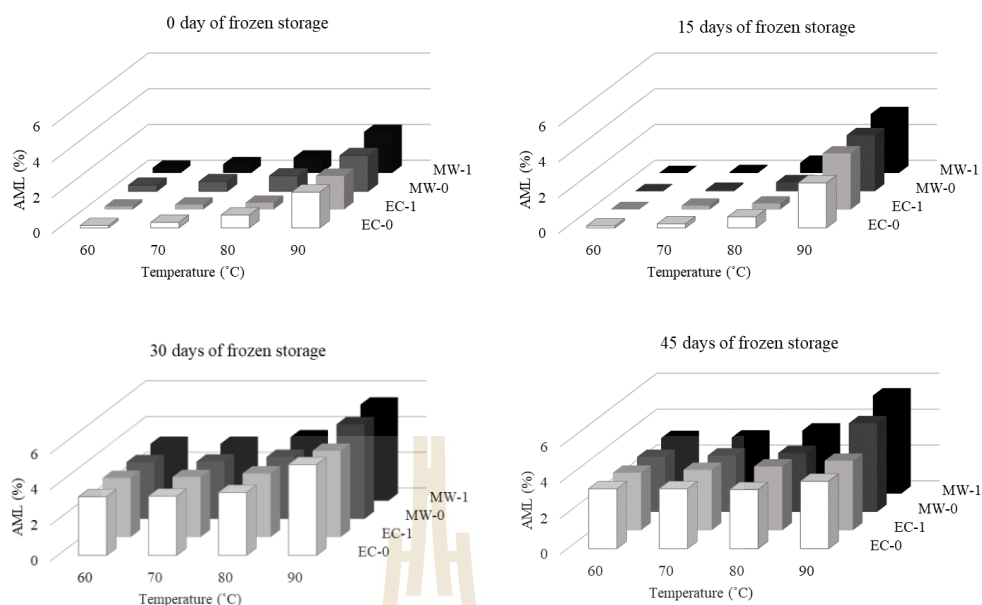
¹ EC-0 และ EC-1 คือ หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมและเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 ตามลำดับ MW-0 และ MW-1 คือหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟแบบไม่เติมและเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 ตามลำดับ

²ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ ตัวอักษรที่มีความต่างกันในตารางแสดงถึงความแตกต่างของปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ดังนั้นในการศึกษาการเก็บรักษาข้าวสุกแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS จึงเลือกวิธีการหุงข้าวแบบหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมัน (EC-0) เนื่องจากวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทั้งแบบ EC-0 และ EC-1 มีปริมาณ RS ไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 การเติมน้ำมันรำข้าวจึงไม่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS

ศึกษาความแปรปรวนปริมาณ RS ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน พบว่าระยะเวลาเก็บรักษาข้าวสุก (X_1) และวิธีการหุงข้าว (X_2) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS นอกจากนี้ยังพบ การมีอิทธิพลร่วมกันระหว่างระยะเวลาเก็บรักษาและวิธีการหุงข้าวสุก ($X_1 * X_2$) ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS (p-value = 0.00) ดังตารางที่ ค.2 ในภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ปริมาณการละลายอะมิโลส (AML) ของการบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็ง จากรูปที่ 4.2 พบว่าปริมาณ AML มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่ข้าว เช่นเดียวกันกับระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุกพบว่าปริมาณ AML เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาแบบแช่แข็ง โดยที่ข้าวที่หุงด้วยเตาไมโครเวฟแบบเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 เก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 45 วัน มีปริมาณ AML มากที่สุด เท่ากับร้อยละ 5.48 เนื่องจากการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำในอาหารเกิดการสั่นสะเทือนเกิดพลังงานความร้อนสูงกว่าหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เม็ดสตาร์ชที่ได้รับพลังงานความร้อนและปริมาณน้ำมากเพียงพอทำให้มีอะมิโลสบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ชได้ง่าย โดย Zhang et al. (2009) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่สตาร์ช โดยความร้อนทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้ปริมาณ AML เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมน้ำมันรำข้าวในการศึกษาครั้งนี้ไม่มีผลต่อการลดปริมาณ AML ซึ่งตรงกันข้ามกับผลการทดลองของ Varatharajan et al. (2011) พบว่า เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) มีผลทำให้ปริมาณ AML ลดลง



รูปที่ 4.2 ผลของวิธีการหุงข้าว (หม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟ) และการเก็บรักษาข้าวสุกด้วยการแช่แข็งที่ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการละลายอะมิโลส (AML) โดย EC-0 และ EC-1 คือ หุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า แบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว ร้อยละ 1 ตามลำดับ MW-0 และ MW-1 คือ หุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 ทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ

4.3.3.2 ผลของการบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็ง

การศึกษาผลของการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0) จากนั้นลดอุณหภูมิของข้าวสุกก่อนบรรจุใส่ถุงพลาสติกและปิดผนึกแบบสุญญากาศเพื่อเก็บรักษาข้าวที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง และนำไปเก็บแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน โดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณ RS และสมบัติทางเคมีและกายภาพทุกๆ 15 วัน

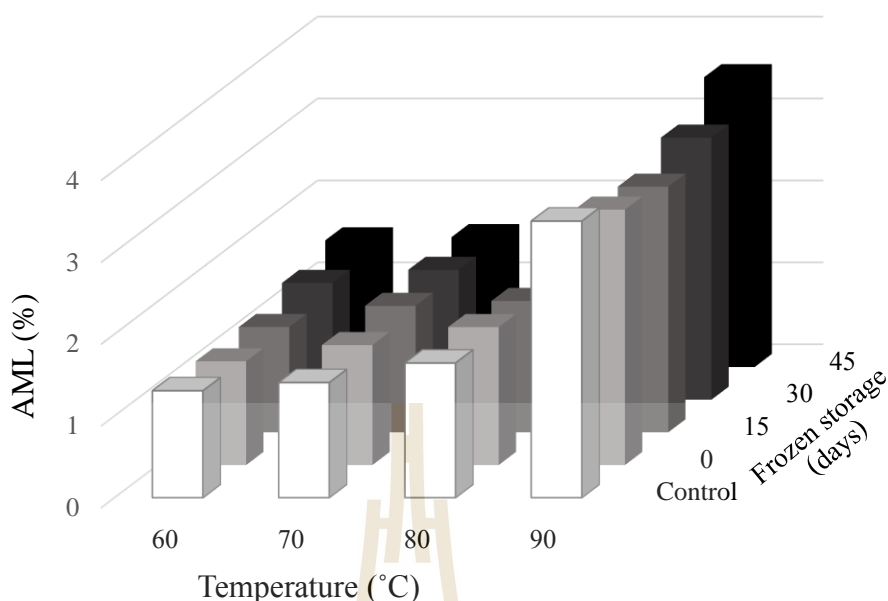
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.5 แสดงผลของปริมาณ RS ของข้าวหุงสุกใหม่ (control) และข้าวที่ผ่านการบ่ม 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน ด้วยวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (EC) แบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว พบว่าปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 วันแรกของการเก็บรักษา และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หลังจากเก็บรักษาแบบแช่แข็งเป็นเวลา 30 วันต่อมา ปริมาณ RS มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บรักษา 45 วัน มีค่า 20.50 (% โดยน้ำหนักแห้ง) รองลงมาคือที่ระยะเวลาเก็บรักษา 30 15 0 วัน และข้าวหุงใหม่ โดยมีค่าเท่ากับ 19.73 17.61 10.37 และ 5.45 (% โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน

Frozen storage (days)	0	15	30	45
RS content (g/100 g dry sample) ¹	10.37±1.02 ^c	17.61±0.35 ^b	19.73±2.10 ^{ab}	20.50±0.20 ^a

¹ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ ตัวอักษรที่มีความต่างกันในตาราง แสดงถึงความแตกต่างของปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ปริมาณ AML จากรูปที่ 4.3 พบว่าปริมาณ AML มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ทำให้ความร้อนแก่ข้าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2009) พบว่าปริมาณ AML เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่สตาร์ช โดยความร้อนทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชส่งผลให้ปริมาณ AML เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวปริมาณ AML เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ RS ในตารางที่ 4.5 เนื่องจากปริมาณ AML แสดงถึงปริมาณอะมิโลสที่เป็นอิสระอยู่รอบนอกเม็ดสตาร์ชง่ายต่อการเกิดกระบวนการรีโทรเกรดชันทำให้มีปริมาณ RS ในปริมาณสูงขึ้น Varatharajan et al. (2011) รายงานว่าปริมาณ AML ขึ้นอยู่กับ การเกิดปฏิสัมพันธ์กันระหว่างสายอะมิโลสและสายอะมิโลส หรือระหว่างสายอะมิโลสและสายอะมิโลเพคติน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับการพองตัวของเม็ดสตาร์ช และการเกิด amylose-lipid complexes โดยการพองตัวของเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ AML เพิ่มขึ้น Zhang et al. (2008) ยังพบว่าปริมาณ AML จะลดลงหากปริมาณความชื้นเริ่มต้นของสตาร์ชเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นเกี่ยวข้องกับแรงดึงดูดระหว่างสายอะมิโลสและสายอะมิโลส หรือระหว่างสายอะมิโลสและสายอะมิโลเพคติน



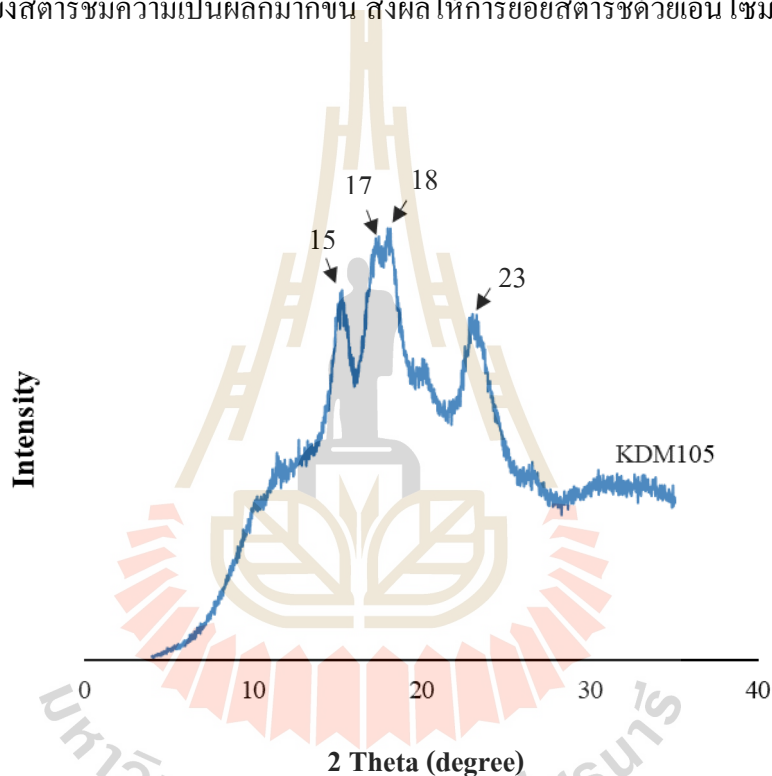
รูปที่ 4.3 ผลของการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว บ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และการเก็บรักษาข้าวสุกต่อด้วยการแช่แข็งที่ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการละลายอะมิโลส (AML) ทำการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ

4.3.4 ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ (effects of cooking and storage methods of cooked rice on the change of physical properties)

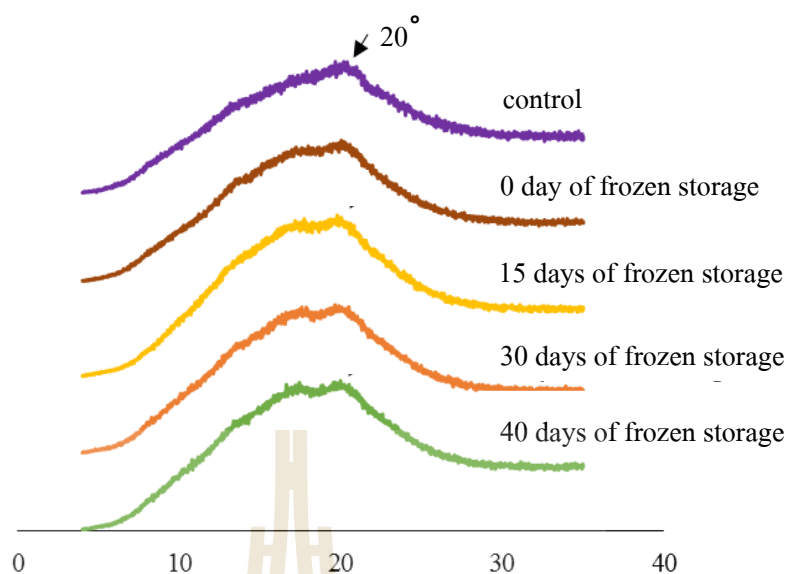
4.3.4.1 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง x-ray diffractometer (XRD)

การศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวสาร และสตาร์ชข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน ด้วยเครื่อง x-ray diffract meter (XRD) พบว่า x-ray diffraction pattern ของข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ปรากฏพีกคู่ (double peak) ที่ 2θ ที่ 17° และ 18° และพีกเดี่ยว (single peak) ที่ 15° และ 23° ซึ่งจัดเป็น โครงสร้างผลึกแบบ A-type โดยพบได้ทั่วไปในสตาร์ชจากธัญพืช (Manful et al., 2008; Yang et al., 2017; Roman et al., 2015) โดย x-ray diffraction pattern ได้แสดงในรูปที่ 4.4 ในขณะที่ข้าวหุงสุกใหม่ (control) ข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาแบบแช่แข็งไม่ปรากฏพีกที่แสดงถึงความเป็น A-type แต่ปรากฏพีกเดี่ยว 2θ ที่ 20° ซึ่งแสดงโครงสร้างผลึกแบบ V-type (รูปที่ 4.5) จากผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Manful et al. (2008) พบว่าสตาร์ชข้าวสารมีผลึกแบบ A-type และข้าวสุกมีผลึกแบบ V-type ซึ่งเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (amylose-lipid complex) (Bulcon et al., 1998)

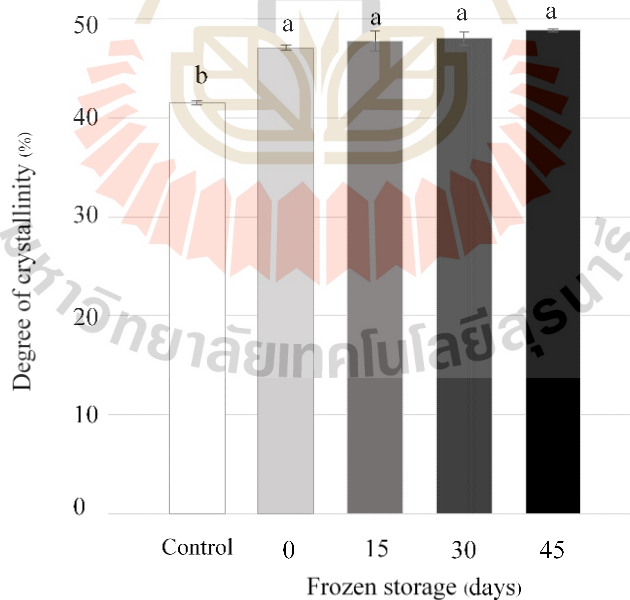
นอกจากนี้ Dupuis et al. (2014) รายงานว่าสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน ส่งผลให้สตาร์ชเกิดการพองตัวน้อยลง เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันไม่ละลายในน้ำ ส่งเสริมการเกิด RS ทั้งนี้ยังพบว่าข้าวที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งมีค่าร้อยละปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นจากข้าวหุงใหม่ (control) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณ RS กล่าวคือปริมาณสภาพเป็นผลึกมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณ RS เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ RS สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างการเก็บรักษา (Sullivan et al., 2017) จากรายงานการวิจัยของ Buleon et al. (1998) รายงานว่ายิ่งสตาร์ชมีความเป็นผลึกมากขึ้น ส่งผลให้การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์ยากมากขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 (KDM105)



รูปที่ 4.5 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD pattern) ของข้าวสุกที่ผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน



รูปที่ 4.6 ปริมาณสภาพเป็นผลึก (degree of crystallinity) และรูปแบบผลึก (type of crystalline structure) ข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็ง ตัวอักษรที่มีความต่างกันแสดงถึงความแตกต่างปริมาณสภาพเป็นผลึก ($p < 0.05$)

4.3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของข้าวสุกด้วยเครื่อง differential scanning calorimetry (DSC)

การศึกษาลักษณะคุณสมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าวสาร และสตาร์ชข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) วิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_p) ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน (T_c-T_0) และพลังงานที่ใช้ในการเจลลิตินในเซชัน (ΔH) โดยอุณหภูมิและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชัน แสดงถึงโครงสร้างและความแข็งแรงของโมเลกุลเม็ดแป้ง

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานที่ทำให้เกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวสาร ข้าวหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน พบว่าพลังงานที่ทำให้เกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวสาร ข้าวหุงใหม่ ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ $p>0.05$ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.50-1.81 กิโลจูลต่อกรัม จากผลการศึกษารั้งนี้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Mir et al. (2013) พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพลังงานความร้อนในการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชข้าวไม่มีผลต่อปริมาณ RS

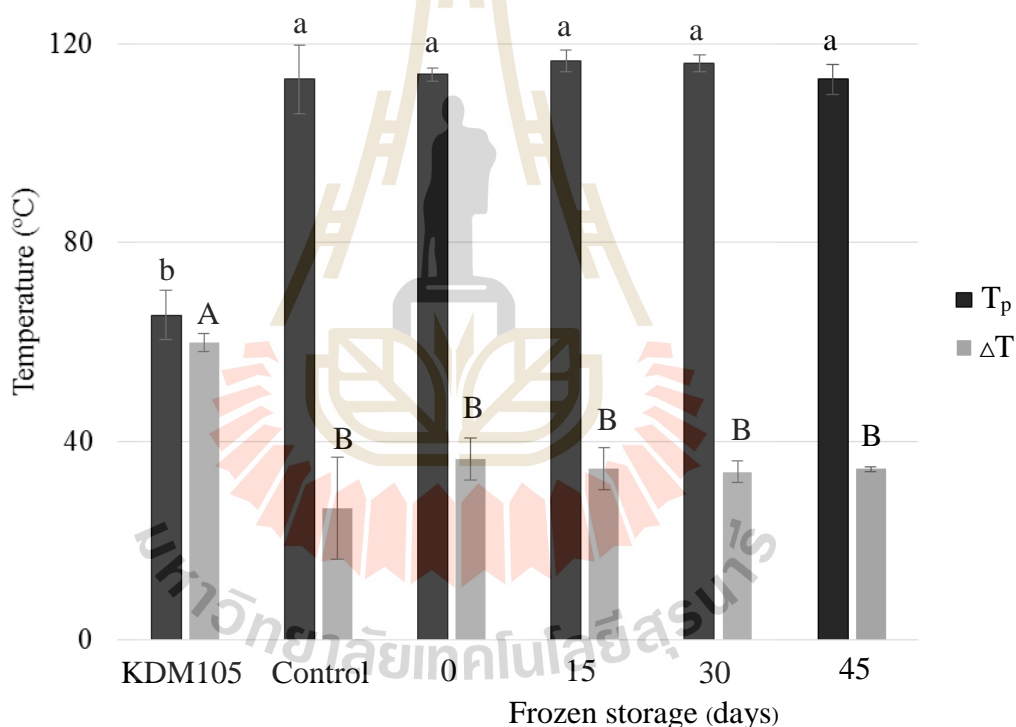
การพิจารณาผลของอุณหภูมิสูงสุด (T_p) และช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔT) พบว่า T_p ในการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวหุงใหม่ ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งมีค่าสูงกว่าข้าวสารอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในทางกลับกันพบว่า ΔT ของข้าวสารมีค่าสูงกว่าข้าวหุงใหม่ ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ในขณะที่ T_p และ ΔT ข้าวหุงใหม่ ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 Sonia et al. (2015) พบว่าการเกิดรีโทรเกรดชันและปริมาณ RS ของสตาร์ชเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพคติน และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิระหว่าง 1-25°C สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Perdon et al. (1999) พบว่าการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ 3 และ -13°C ทำให้เกิด รีโทรเกรดชันมากขึ้น หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 96 ชั่วโมง โดยได้ศึกษาการเกิดรีโทรเกรดชันจากอุณหภูมิสูงสุด (T_p) และพลังงาน (ΔH) ที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันของข้าวสุก

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน

Parameter	Treatments ²					
	KDM105	control	Frozen storage (days)			
			0	15	30	45
ΔH (kJ/g) ¹	1.50±0.01	1.77±0.01	1.78±0.08	1.81±0.15	1.74±0.13	1.75±0.09

¹ ΔH คือ เอนทาลปี (พลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดเจลลิตไนเซชัน)

² KDM105 คือ ข้าวสารพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ control คือข้าวสุกหุงใหม่ (ตัวอย่างควบคุม) ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 2 ซ้ำ



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิสูงสุด (T_p) และช่วงอุณหภูมิ (ΔT) ของการเกิดเจลลิตไนเซชันของข้าวสาร (KDM105) ข้าวสุกหุงใหม่ (control) และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน ตัวอักษรที่มีความต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของ T_p และตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างของ ΔT อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัส

การศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) ของข้าวหุงใหม่ และข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C

นาน 45 วัน ด้วยเครื่อง texture analyzer โดยได้วิเคราะห์ค่าความแข็ง (hardness) ค่าการยึดติด (adhesiveness) ค่ายึดตัวกันเอง (cohesiveness) และความเค็ง หรือความยืดหยุ่น (springiness) (Ma and Sun, 2009 และ ปานมนัส, 2555)

จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่า hardness ของข้าวสุกหุงใหม่ (control) อยู่ที่ 7.04 N ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิจัยของ Watchararparpaiboon (2010) รายงานว่า ค่าความแข็งของข้าวขาวดอกมะลิหุงสุกใหม่ 650 g force หรือ 6.4 N จากการศึกษาครั้งนี้ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 15 วัน ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และมีค่า hardness สูงกว่าข้าวหุงใหม่และข้าวเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 30 และ 45 วัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma and Sun (2009) พบว่า การแช่เย็นที่ 4°C มีผลทำให้ค่าความแข็งของข้าวสุกเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ Perdon et al. (1999) พบว่า การเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ 3 และ -13°C มีผลทำให้ค่าความแน่นเนื้อหรือค่าความแข็งของข้าวเพิ่มมากขึ้น และการเกิดรีโทรเกรเดชันมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความแข็งของข้าวสุก ในขณะที่การเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 30 และ 45 วัน มีค่า hardness ไม่แตกต่างจากข้าวหุงสุกใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์กับรูพรุนของข้าวสุก ดังแสดงในภาพถ่ายด้วย SEM (หัวข้อ 4.3.4.4) โดย Leelayuthsoontorn and Thipayarat (2006) รายงานว่า ผลของภาพถ่ายที่ได้จาก SEM แสดงให้เห็นถึงลักษณะรูพรุนของข้าวสุก และปริมาณรูพรุนมีความสัมพันธ์กับความนุ่มของข้าวสุก กล่าวคือ ยังมีปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นมากยิ่งทำให้ข้าวสุกมีความนุ่มมากขึ้น

ค่า adhesiveness คือ ค่าการยึดติด เป็นเสมือนพลังงานในการดึงแผ่นกดอกออกจากชิ้นวัสดุ โดยค่า adhesiveness ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มีค่ามากกว่าข้าวหุงใหม่ และเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 15 30 และ 45 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยที่ค่า adhesiveness ของข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 15 30 และ 45 วัน ไม่แตกต่างจากข้าวหุงใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ค่า cohesiveness คือ ค่าความยึดตัวกันเอง แสดงถึงความสามารถที่วัสดุรักษาโครงสร้างเดิมไว้ได้ โดยค่า cohesiveness ของข้าวหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 15 30 และ 45 วัน ($p>0.05$) แต่ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงมีค่า cohesiveness มากกว่าข้าวหุงสุกใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ค่า springiness คือ ค่าการเค็ง เดิมเรียกค่าความยืดหยุ่น (elasticity) แสดงถึงความสามารถในการคืนรูปได้ของวัสดุ โดยค่า springiness ของข้าวหุงใหม่ไม่แตกต่างจากข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาข้าว 15 30 และ 45 วัน อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

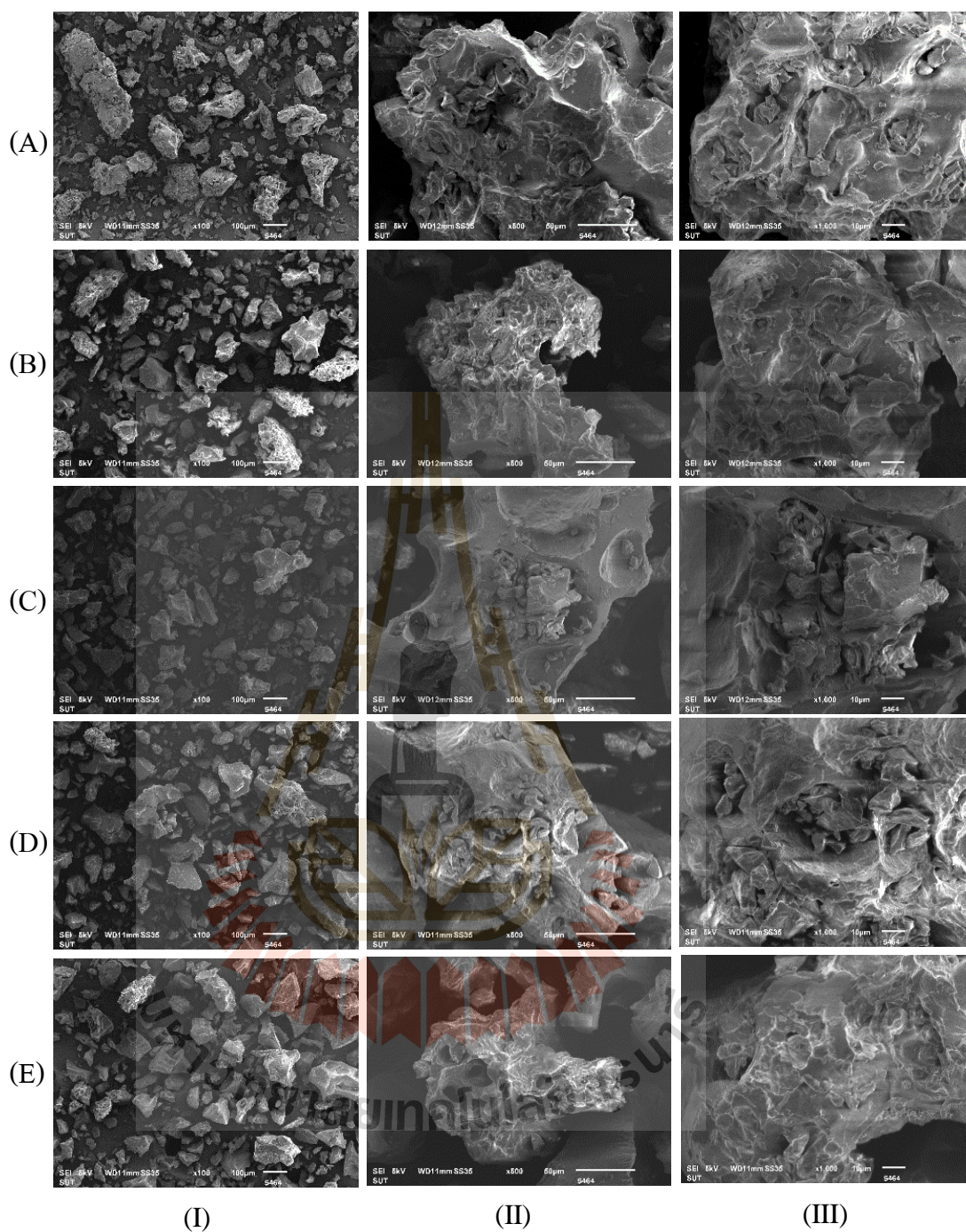
ตารางที่ 4.7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน

Frozen storage (days)	Parameter ¹			
	Hardness (N)	Adhesiveness (N*sec)	Cohesiveness (N*sec/N*sec)	Springiness (sec/sec)
Control	7.04±0.42 ^{bc}	1.19±0.21 ^b	0.34±0.01 ^b	1.25±0.03 ^a
0	9.94±0.34 ^a	3.46±0.24 ^a	0.39±0.02 ^a	1.27±0.08 ^a
15	8.84±0.34 ^a	1.65±0.23 ^b	0.36±0.02 ^{ab}	1.24±0.03 ^a
30	6.68±0.21 ^c	1.15±0.32 ^b	0.37±0.01 ^{ab}	1.24±0.04 ^a
45	7.42±0.24 ^b	1.27±0.26 ^b	0.36±0.02 ^{ab}	1.25±0.04 ^a

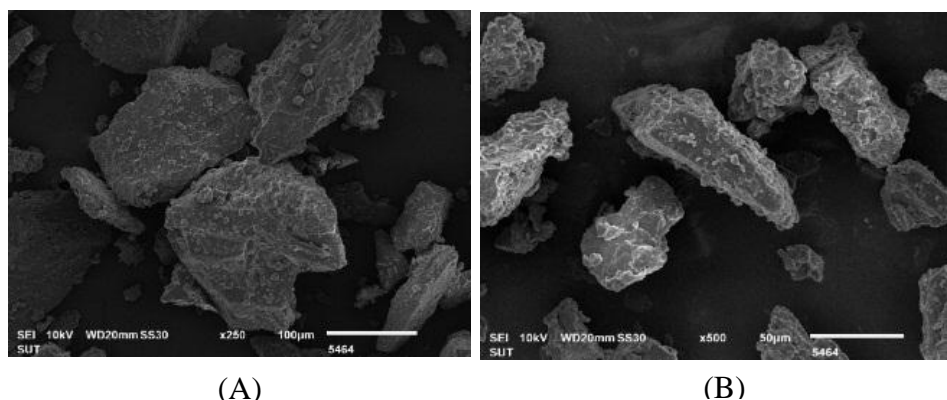
¹ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ ตัวอักษรต่างกันในคอลัมน์แสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

4.3.4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวสุกด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของสตาร์ชข้าวสาร และสตาร์ชข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (SEM) ที่ขนาดกำลังขยายภาพ 100 500 และ 1000 เท่า จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างเม็ดสตาร์ชข้าวสารที่ไม่พบรูพรุนที่พื้นผิว ต่างจากข้าวสุกดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าภาพที่ถ่ายด้วย SEM ของข้าวหุงใหม่ ข้าวสุกบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน พื้นผิวของเมล็ดข้าวสุกมีรูพรุน มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองของ Leelayuthsoontorn และ Thipayarat (2006) ที่แสดงภาพถ่าย SEM ของข้าวสุกที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่ามีรูพรุนที่ค่อนข้างละเอียดมีผลทำให้ข้าวนุ่มขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ อายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงลักษณะของเมล็ดข้าวสุก



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM: (A) control; (B) 0 day of frozen storage; (C) 15 days of frozen storage; (D) 30 days of frozen storage; (E) 45 days of frozen storage และ I, II, III คือระดับกำลังขยายของภาพที่ 100x 500x และ 1000x ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของข้าวสารขาวดอกมะลิ 105 ระดับกำลังขยายภาพที่ (A) 250x; (B) 500x

4.3.4.5 การวิเคราะห์ดัชนีค่าความขาวของข้าวสุก

การศึกษาดัชนีความขาวของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน ด้วยเครื่องวัดค่าความขาวของข้าว จากตารางที่ 4.8 พบว่าการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาข้าวสุกแบบแช่แข็งเป็นเวลา 45 วัน มีผลทำให้ดัชนีความขาวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหุงใหม่ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามผลของการศึกษาครั้งนี้ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ สวินัย และนันทวัน (2557) ซึ่งพบว่าการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าดัชนีความขาวของข้าวที่ 81 แต่หลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 และ 6 วัน พบว่าดัชนีความขาวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากการเกิด retrogradation มีผลทำให้เมล็ดข้าวมีความทึบแสงมากขึ้น ค่าดัชนีความขาว จึงมีแนวโน้มลดลง

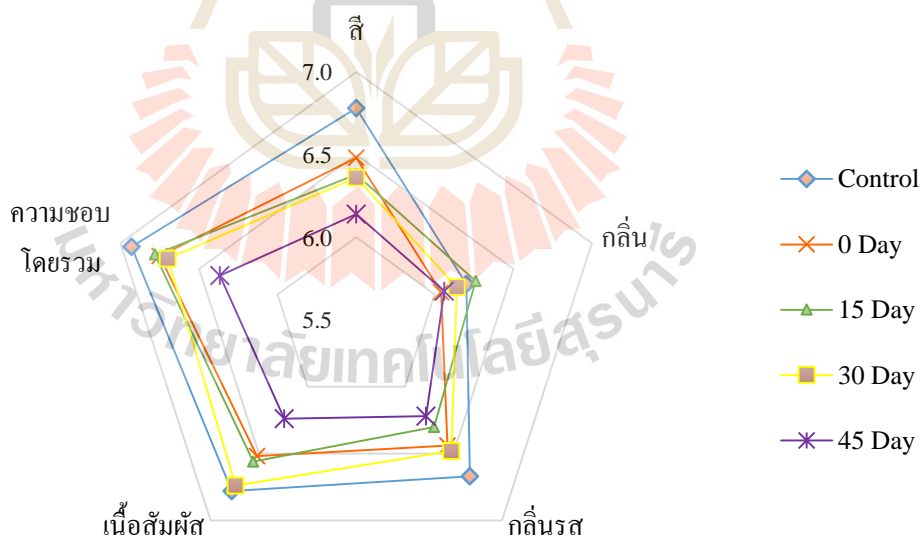
ตารางที่ 4.8 ดัชนีค่าความขาวของข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน

Parameter	Treatments ¹				
	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
Whiteness index	54.37±0.27 ^b	55.32±0.44 ^a	55.73±0.94 ^a	55.32±0.51 ^a	55.97±0.59 ^a

¹ ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ ตัวอักษรต่างกันในตารางแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

4.3.5 ผลของการเก็บรักษาข้าวต่อการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (effects of storage methods of cooked rice on the sensory evaluation)

การศึกษผลของการเก็บรักษาข้าวต่อการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธี 9-point hedonic scale คะแนนตั้งแต่ 1-9 (1 หมายถึงชอบน้อยที่สุด ไปถึง 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) จากผู้ทดสอบชิมจำนวน 50 คน ซึ่งไม่ผ่านการฝึกฝน จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่าคะแนนความชอบด้านสี กลิ่นรส และความชอบโดยรวม ของข้าวสุกหลังการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 และ 30 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับข้าวหุงสุกใหม่ โดยที่ความชอบด้านกลิ่น และเนื้อสัมผัสของข้าวสุกหลังการเก็บรักษามีค่าใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกใหม่ อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาอุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมต่ำกว่าตัวอย่างข้าวอื่น ๆ สวานิช และนันทวัน (2557) ได้ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบไม่ผ่านการฝึกฝนพบว่าคะแนนความชอบข้าวสุกในด้านความนุ่มและกลิ่นรส หลังจากการเก็บรักษา 3 และ 6 วัน มีคะแนนความชอบมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับข้าวสุกหุงใหม่ (ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.10 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน

4.3.6 การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ (microbial population count)

การศึกษาผลของการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของข้าวหุงสุกใหม่ ข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ก่อนนำข้าวสุกไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน ด้วยวิธีการ pour plate พบว่ามีปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุกทุก 45 วัน ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า 5 CFU/g ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของข้าวสุกหุงใหม่ และข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และและเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C นาน 0 15 30 และ 45 วัน

Parameter	Treatments ¹				
	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
Total microbe (CFU/g)	<5	<3	<5	<3	<3

¹ ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลองจำนวน 4 ซ้ำ ตัวอักษรต่างกันในตารางแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

5.1.1 การทดสอบหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม

จากผลการทดลองหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และเตาไมโครเวฟ พบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.7 และอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2.4 เหมาะสำหรับการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และการหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟตามลำดับ

5.1.2 ผลของวิธีการหุงข้าวและระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มข้าวสุกต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

การหุงข้าวแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (EC-0) และเตาไมโครเวฟ (MW-0) จากนั้นบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลาต่างกัน คือ 24 48 72 ชั่วโมง และ cycle พบว่าส่วนใหญ่วิธีการหุงข้าวและระยะเวลาการบ่มข้าวสุกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS ยกเว้นที่ระยะเวลาการบ่ม 48 ชั่วโมง ปริมาณ RS ของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 10.37 (% โดยน้ำหนักแห้ง) รองลงมาคือการหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟมีปริมาณ RS เท่ากับ 8.49 (% โดยน้ำหนักแห้ง) ดังนั้นการบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C จึงถูกนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

5.1.3 ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

5.1.3.1 ผลของการบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C

การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟ แบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0 และ MW-0) และแบบเติมน้ำมันรำข้าวร้อยละ 1 (EC-1 และ MW-1) บ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C

นาน 24 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็ง 45 วัน พบว่าปริมาณ RS ของวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทั้งแบบ EC-0 และ EC-1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ในขณะที่การหุงข้าวด้วยเตาไมโครเวฟทั้งแบบ MW-0 และ MW-1 มีแนวโน้มการเกิด RS คงที่หลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 15 วัน สำหรับปริมาณ AML มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิความร้อนที่ให้แก่ข้าว เช่นเดียวกันกับระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุก แต่การเติมน้ำมันรำข้าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ RS ระหว่างเก็บรักษา

5.1.3.2 ผลของการบ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C

การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่เติมน้ำมันรำข้าว (EC-0) บ่มข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 ชั่วโมง ก่อนการเก็บรักษาแบบแช่แข็ง 45 วัน พบว่าปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยปริมาณ RS มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 วันแรกของการเก็บรักษาและเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โดยปริมาณ RS มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บรักษา 45 วัน มีค่า 20.50 (% โดยน้ำหนักแห้ง)

ปริมาณ AML มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ให้ความร้อนแก่ข้าวเช่นเดียวกันกับระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุกปริมาณ AML เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุกซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณ RS

โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวสารมีโครงสร้างผลึกแบบ A-type และข้าวสุกมีผลึกแบบ V-type ข้าวที่ผ่านการบ่มอุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวสุกเก็บรักษาแบบแช่แข็งมีปริมาณสภาพเป็นผลึกเพิ่มขึ้นจากข้าวหุงใหม่ (control) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณ RS

สมบัติเชิงความร้อนของสตาร์ชข้าวสารและสตาร์ชข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิ T_p , ΔT และ ΔH ที่ทำให้เกิดเจลาคีโนเซชันของสตาร์ชข้าวไม่มีความสัมพันธ์ต่อปริมาณ RS

ลักษณะเนื้อสัมผัสด้วยวิธี texture profile analysis (TPA) พบว่าการเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 30 และ 45 วัน มีค่า hardness ใกล้เคียงกับข้าวหุงใหม่ ในขณะที่ข้าวที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และข้าวเก็บรักษาแบบแช่แข็งนาน 15 วัน มีค่า hardness เพิ่มขึ้นจากข้าวหุงใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบว่าค่าความแข็งมีความสัมพันธ์เชิงลบกับรูพรุนของข้าวสุก ค่า adhesiveness ค่า cohesiveness และค่า springiness ของข้าวสุกที่ผ่านการเก็บรักษาแบบแช่แข็งไม่มีความแตกต่างกับข้าวหุงสุกใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของสตาร์ชข้าวสารไม่พบรูพรุนที่พื้นผิว ต่างจากข้าวสุกพบว่าพื้นผิวของเมล็ดข้าวสุกมีรูพรุน ในการศึกษาครั้งนี้อายุการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะ โครงสร้างระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวสุก

การศึกษาคัดชั้นความขาวของข้าวสุกพบว่าการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และเก็บรักษาข้าวสุกแบบแช่แข็งเป็นเวลา 45 วัน มีผลทำให้ดัชนีความขาวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหุงใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธี 9-point hedonic scale พบว่าคะแนนความชอบด้านสี กลิ่นรส และความชอบโดยรวม ของข้าวสุกหลังการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 และ 30 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับข้าวหุงใหม่ แต่ความชอบด้านกลิ่นและเนื้อสัมผัสของข้าวสุกหลังการเก็บรักษามีค่าใกล้เคียงกับข้าวหุงสุกใหม่ อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาอุณหภูมิ -20°C นาน 45 วัน มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมต่ำกว่าตัวอย่างข้าวอื่นๆ

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในปริมาณที่ยอมรับได้ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาข้าวสุกที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 0 15 30 และ 45 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 การศึกษาเพิ่มเติมถึงค่าดัชนีไกลซีมิกหลังการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณ RS
- 5.2.2 การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสายพันธุ์ข้าวอื่นๆต่อปริมาณ RS
- 5.2.3 การนำไปพัฒนาในด้านอุตสาหกรรมอาหาร เช่น พัฒนาให้เป็นข้าวพร้อมรับประทานที่เพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคที่ต้องการเพิ่มเส้นใยอาหารและลดปริมาณแป้งลง

รายการอ้างอิง

- เครือวัลย์ อัตตะวิริยะสุข. (2536). คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพและการแปรสภาพเมล็ด. กรุงเทพมหานคร: เอกสารประกอบการบรรยายการฝึกอบรมหลักสูตรวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยว ณ ศูนย์วิจัยข้าวพัทลุง, ฝ่ายฝึกอบรมสถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรมการข้าว. (2558). รายงานสถานการณ์การเพาะปลูกข้าว แผนการผลิตและการตลาดข้าวครบวงจร หน้า 4-9.
- กรมวิชาการเกษตรและกรมส่งเสริมสหกรณ์. (2541). เทคโนโลยีการผลิตข้าวหอมมะลิคุณภาพดี. เอกสารการบรรยายหลักสูตร หน้า 172.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กอง บก. ข้าวเศรษฐกิจ. (2559). คาดแนวโน้มคนไทยบริโภคข้าวลดลง. สืบค้นจาก <http://www.tnamcot.com/content/360900>.
- การญจนา มหัทธนนที, คุณิภา จันทศรี และดวงตา สว่างภพ. (2556). ข้าวกล้องผสมหุงสุกไว. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม, 8 (1), 35-46.
- จรัส โปร่งศิริวัฒนา. 2534. ความรู้เรื่องข้าว. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- จิรนาถ บุญคง. (2554). Resistant starch แป้งที่มีบทบาทต่อสุขภาพ. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม, 6 (1): 1-8.
- นราพร ดาลัย. (2553). การเก็บรักษาและการใช้ความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวและแป้งข้าว (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ไม่ได้ตีพิมพ์). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ปราณี อ่านเปรื่อง. (2557). หลักการวิเคราะห์อาหารด้วยประสาทสัมผัส. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานมนัส ศิริสมบูรณ์. (2555). เทคโนโลยีเนื้อสัมผัสของผลผลิตเกษตรและอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มิน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- ผาณิต รุจิรพิสิฐ, วิชชุดา สังข์แก้ว และเสาวนีย์ เอี้ยวสกุลรัตน์. (2555). คุณค่าทางโภชนาการของข้าว 9 สายพันธุ์. Agricultural Sci. J., 43 (2), 173-176.

- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานพนนท์. (2555). ไมโครเวฟ [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0401/microwave>.
- วิไล รังสาดทอง. (2552). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- สวนีย์ หอรั้งสีวัฒน์ และนันทวันเทอดไทย. (2557). ผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพข้าวหอมมะลิ. **วารสารวิชาการระดับนานาชาติ**.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2557). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2558. 1-18.
- สุนันทา ทองทา. (2552). คุณสมบัติแป้งข้าวที่ทนต่อการย่อยด้วยสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วย **เอนไซม์** (รายงานผลการวิจัย). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2538). **เคมีัญญาอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). **ข้าว**. พิมพ์ครั้งที่ 1. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Ai, Y., Hasjim, J., and Jane, J-I. (2013). Effects of lipid on enzymatic hydrolysis and physical properties of starch. **Carbohydrate polymers** 92: 120-127.
- Amagliani, L., O'Regan, J., Kelly, A. L., and O'Mahony, J. A. (2016). Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch. **Journal of Cereal Science**, 70: 291-300.
- Amaya-Llano, S.L., Martinez-Alegria, A.L., Zazueta-Morales, J.J., and Martinez-Bustos, F. (2008). Acid thinned jicama and maize starches as fat substitute in stirred yogurt. **Food Science and Technology** 41: 1274-1281.
- BeMiller, J.N., and Huber, K.C. (2015). Physical modification of food starch functionalities. **Annual Review of Food Science and Technology** 6: 19-69.
- Bird, A.R., Lopez-Rubio, A., Shrestha, A.K., and Gidley, M.J. (2009). Resistant starch in vitro and in vivo factors determining yield, structure, and physiological relevance. In *Modern Biopolymer Science: Bridging the Divide between Fundamental Treatise and Industrial Application*. **Academic Press** :449-510.
- Birt, D.F., Boylston, T., Hendrich, S., Jane, J.L., Hollis, J., Li, L., McClelland, J., Moore, S., Phillip, G.J. Rowling, M., Schalinske, K., Scott, M.P., and Whitley, E.M. (2013). Resistant Starch: promise for improving human health. **Advances in Nutrition** 4: 587-601.

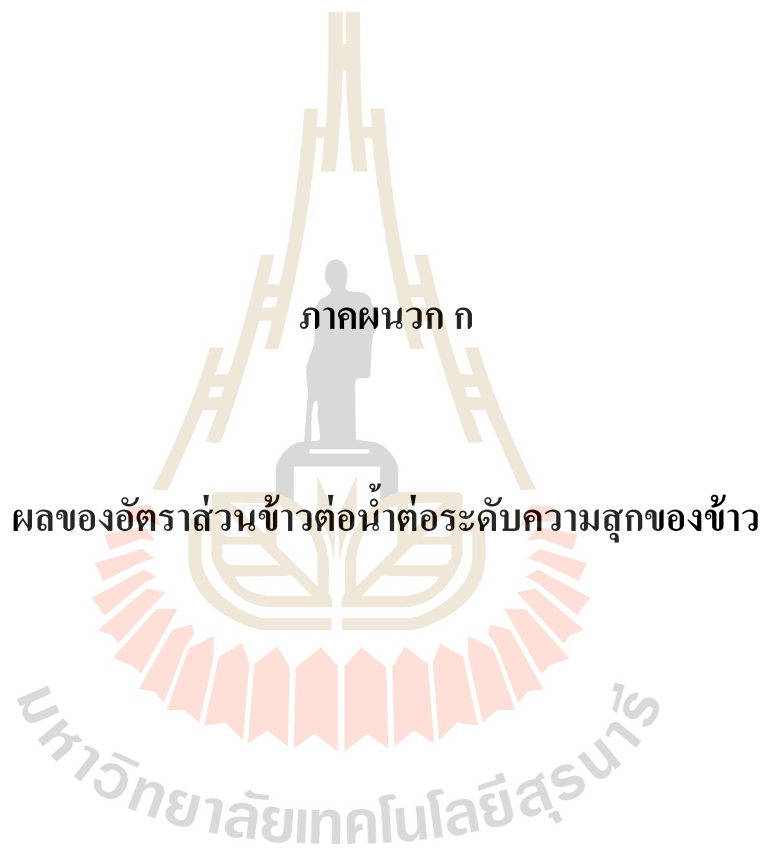
- Buleon, A., Colonna, P., and Ball, S. (1998). Starch granules: Structure and biosynthesis. **Biological Macromolecules** 23 (2), 85-112.
- Chui, C.W., Henley M., and Altieri P. (1994). Process for making amylase resistant starch from high amylose starch. **U.S. Patent** 5: 857-530.
- Chung, H.J., Liu, O., and Hoover, R. (2009). Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. **Carbohydrate Polymers** 75 (3): 436-447.
- Daomukda, N., Moongngarm, A., Payakapol, L., and Noisuwn, A. (2011). Effect of cooking methods on physicochemical properties of brown rice. **International conference on environmental science and technology**. IACSIT Press Singapore.
- Dupuis, J.H., Liu, Q., and Yada, R.Y. (2014). Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety** 13 (6): 1219-1234.
- Eerlingen, R.C., Crombez, M., and Delcour, J.A. (1993). Enzyme-resistant starch. I. Qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. **Cereal Chemistry** 70: 339-344.
- Englyst, H.N., and Hudson, G.J. (1996). The classification and measurement of dietary carbohydrates. **Food Chemistry** 57 (1): 15-21.
- Fellows, P. (2000). **Food processing technology: Principles and Practise**. CRC Press, DC. 575p.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M.J., Sanchez-Zapata, E., and Perez-Alvarez, J.A. (2010). Resistant starch as functional ingredient: A review. **Food Research International**. 43 (4): 931-942.
- Heldman, D.R. (2009). **Food Preservation Process Design**. Food science and technology. International series. California : USA.
- Herrero-Martinez, J. M., and Schoenmakers, P. J. (2004). Determination of the amylose– amylopectin ratio of starches by iodine-affinity capillary electrophoresis. **Journal of Chromatography A**, 1053 (2): 227-234.
- Horrungsiwat, S., and Therdthai, N. (2015). **Effect of cooking method on quality of Jasmine rice** (pp 1019-1026). Proc. Of 53rd Kasetsart University Annual Conference: Science, Genetic Engineering, Architecture and Engineering, Agro-Industry, Natural Resources and Environment.

- Jacobs, H., and Delcour, J. A. (1998). Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: A review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 46 (8): 2895-2905.
- Juliano, B.O. (1971). A simplified assay for milled rice amylose. **Cereal Science Today** 16 (11): 334-338.
- Leelayuthsoontorn, P., and Thipayarat, A. (2006). Texture and morphological of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. **Food Chemistry** 96 (4): 606-613.
- Leelayuthsoontorn, P., and Thipayarat, A. (2006). Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. **Food Chemistry** 96 (4): 606-613.
- Ma, Y. and Sun, D-W. (2009). Hardness of cooked rice as affected by varieties, cooling methods and chill storage. **Journal of Food Process Engineering** 32: 161-176.
- Manful, J.T., Grimm, C.C. Gayin, J., and Coker, R.D. (2008). Effect of variable parboiling on crystallinity of rice samples. **Cereal Chem.** 85 (1): 92-95.
- McCaskill, D.R., and Zhang, F. (1999). Use of rice bran oil in foods: Developing nutraceuticals for the new millennium. **Food Technology** 53: 50-53.
- Mir, J.A., Srikaeo, K. and Garcia, J. (2013). Effects of amylose and resistant starch on starch digestibility of rice flours and starches. **International Food Research Journal** 20 (3): 1329-1335.
- Moretti, F., Pellegrini, N., Salvatici, E., Rovelli, V., Banderali, G., Radaelli, G., Scazzina, F., Giovannini, M., and Verduci, E. (2017). Dietary glycemic index, glycemic load and metabolic profile in children with phenylketonuria. **Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases** 27: 176-182.
- Nord, M., Coleman-Jensen A., Andrews M., and Carlson S. (2010). **Dietary Guidelines for Americans**. (7). Washington, DC: U.S.
- Organic rice delivery. (2557). **ศิริวิทยาชองข้าว ส่วนประกอบของต้นข้าว เมล็ดข้าว**. สืบค้นจาก <http://goo.gl/CMVr0z>.
- Perdon, A.A., Siebenmorgen, T.J., Buescher, R.W., and Gbur, E.E. (1999). Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. **Journal of food science**. 64 (5): 828-832.
- Pinkrova, J., Hubackova, B., Kadlec, P., Prihoda, J., and Bubnik, Z. (2003). Changes of starch during microwave treatment of rice. **Czech J. Food Sci.** 21 (5): 176-184.

- Ratithammatorn, T. (2016). **Effect of heating and cooling structure change and digestion of starch.** วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 21 (2): 248-259.
- Reddy, D. K., and Bhotmange, M. G. (2013). International Journal of Agriculture and Food Science Technology 9(4): 859-866.
- Roman, L., Martinez, M.M., Rosell, C.M., and Gomez, M. (2015). Effect of microwave treatment on physicochemical properties of maize flour. **Food Bioprocess Technology** 8 (6) : 1330-1335.
- Schirmer, M., Jekle, M., and Becker, T. (2015). Starchy gelatinization and its complexity for analysis. **Starch** 67 (1-2): 30-41.
- Seib, P.A., and Woo, K. (1999). Food grade starch resistant to alpha-amylase and method of preparing the same. **U.S. Patent** 5 :855-946.
- Serna-Saldivar, S. O., (2012). **Cereal Grains Laboratory Reference and Procedures Manual.** New York: CRC Press Talor & Francis Group.
- Sonia, S., Witjaksono, F., and Ridwan, R. (2015). Effect of cooling of cooked white rice on resistant starch content and glycemic response. **Asia Pac. J. Clin. Nutr.** 24: 620-625.
- Sullivan, W.R., Hughes, J.G., Cockman, R.W., and Small, D.M. (2017). The effects of temperature on the crystalline properties and resistant starch during storage of white bread. **Food Chemistry.** 228: 57-61.
- Szepes, A., Hasznos-Nezdei, M., Kovacs, J., Funke, Z., Ulrich, J., and Szabo-Revesz, P. (2005). Microwave processing of natural biopolymers-studies on the properties of different starches. **International Journal of Pharmaceutics** 302 (1): 166-171.
- The Rice Trader. (2016). **Rice.** 5 January 2016, สืบค้นจาก <http://www.thericetrader.com>.
- Varatharajan, V., Hoover, R., Li, J., Vasanthan, T., Nantanga, K.K.M., Seetharaman, K., and Liu, Q. (2011). Impact of structure changes due to heat-moisture treatment at different temperatures on the susceptibility of normal and waxy potato starches towards hydrolysis by pancreatic alpha amylase. **Food Research International** 44 (9): 2594-2606.
- Watchararparpaiboon, W., Laohakunjit, N., and Kerdchoechuen, O. (2010). An Improved Proc. for High Quality and Nutrition of Brown Rice. **Food Sci Tech Int.** 16 (2): 147-158.
- Yang, Q., Qi, L., Luo, Z., Kong, X., and Xiao, Z. (2017). Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch. **Food Hydrocolloids** 69: 473-482.

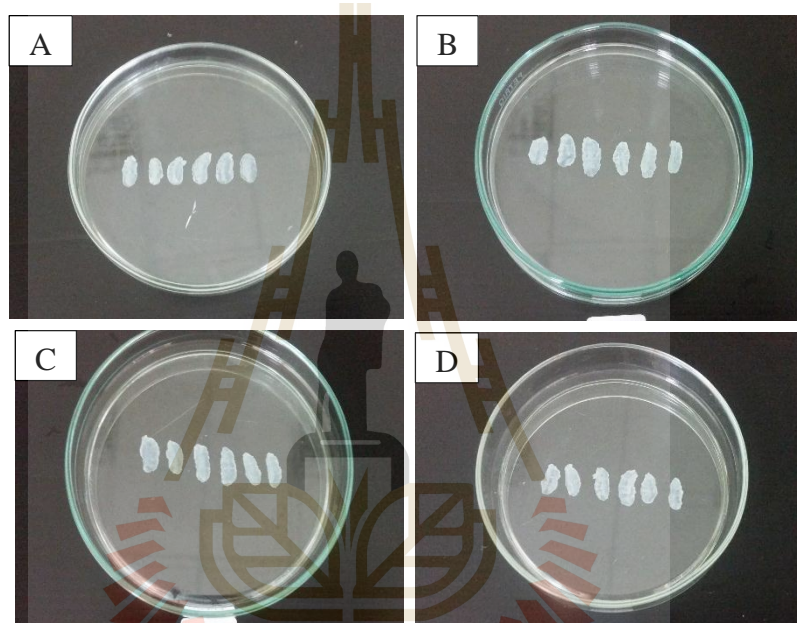
- Zhang, J., Wang, W. W. and Shi, X-M. (2009). Effect of microwave heat/moisture treatment on physicochemical properties of *Canna edulis* Ker starch. **Society of Chemical Industry** 89 (4):653-664.
- Zhao, S., Xiong, S., Qiu, C. and Xu, Y. (2007). Effect of microwaves on rice quality. **Stored Products Research** 43 (4): 496-502.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, A. and Blanchard, C. (2007). Effect of the addition of fatty acids on rice starch properties. **Food Research International** 40 (2): 209-214.





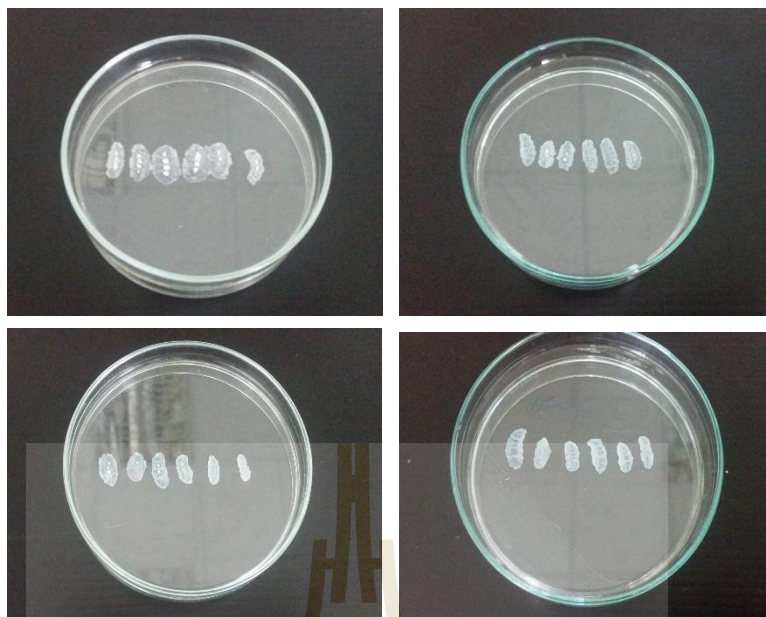
1. การทดสอบหาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่เหมาะสม

ศึกษาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อระดับความสุกของข้าวหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (รูปที่ ก.1) และหุงด้วยเตาไมโครเวฟ (รูปที่ ก.2) โดยนำเมล็ดข้าวสุก 6 เมล็ด วางบนแผ่นกระจกใส และกดทับเมล็ดข้าวสุกด้วยกระจกอีกแผ่น นับจำนวนข้าวสุกที่มีจุดไตชุ่มขาวที่เหลืออยู่ และคำนวณหาระดับความสุกของข้าว



รูปที่ ก.1 ข้าวสุกหุงด้วยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ

(A) 1:1.5; (B) 1:1.6; (C) 1:1.7 และ (D) 1:1.8



รูปที่ ก.2 ขี้วสุกหุงด้วยวิธีเตาไมโครเวฟ ที่อัตราส่วนขี้วต่อน้ำ

(A) 1:1.8; (B) 1:2; (C) 1:2.2 และ (D) 1.2.4

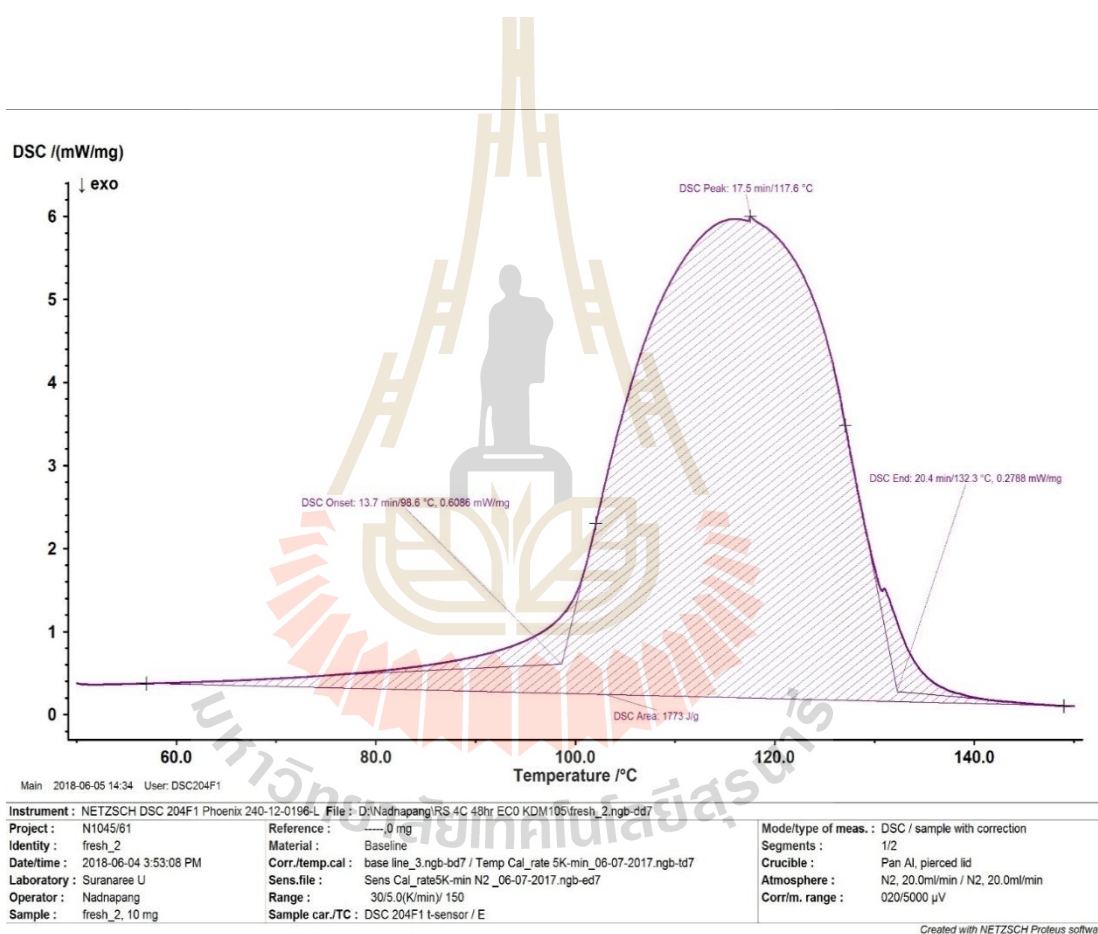


ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

1. การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

วิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตในเซชันด้วยเครื่อง DSC ทำการวิเคราะห์อุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนสถานะ (onset temperature, T_o), อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสูงสุด (peak temperature, T_p) คืออุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนสถานะ (conclusion temperature, T_c) ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชัน ($T_c - T_o$) รูปที่ ข.1 แสดงตัวอย่าง DSC thermogram ของตัวอย่างข้าวหุงสุกด้วยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (control)



รูปที่ ข.1 DSC thermogram ของข้าวหุงด้วยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (control)

2. การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี 9-point hedonic scale ให้คะแนนตั้งแต่ 0-9 (1 หมายถึงชอบน้อยที่สุด ไปถึง 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) ในด้านสี กลิ่น กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมต่อตัวอย่างข้าวสุก โดยใช้แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อข้าวหุงสุกที่ผ่านการเก็บรักษา

แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

Hedonic scale scoring test (Acceptance test)

ตัวอย่างข้าวสุก.....

วันที่..... ชื่อผู้บริโภคร.....

คำชี้แจง โปรดทำการประเมินตัวอย่างข้าวที่ท่านได้รับและให้คะแนนตามความเห็นว่าเป็นที่สมควรกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ท่านกำลังทดสอบชิม

ระดับคะแนนความพอใจ

- | | | |
|-------------------|--------------------|---------------------|
| 1 = ไม่ชอบเลย | 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย | 7 = ชอบปานกลาง |
| 2 = ไม่ชอบมาก | 5 = เฉยๆ | 8 = ชอบมาก |
| 3 = ไม่ชอบปานกลาง | 6 = ชอบเล็กน้อย | 9 = ชอบมากเป็นพิเศษ |

คุณลักษณะต่างๆ ของตัวอย่าง	ระดับคะแนนความพอใจ				

1. ลักษณะปรากฏ (appearance) - สี
2. กลิ่น (aroma)
3. กลิ่นรส (flavor)

4. ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture) - ความแข็ง - ความเหนียว	.....	.....	.....	.....	.....
5. พอใจโดยรวมต่อ ตัวอย่างที่ได้รับ (overall acceptance)	.....	.....	.....	.....	.....
6. ความคิดเห็น เพิ่มเติม					

คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ตารางที่ ข.1 คะแนนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุก

ส

Age range (year)	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
20-29	6.57±0.22	6.43±0.17	6.49±0.42	6.29±0.69	6.07±0.36
30-39	7.50±0.84	6.67±0.03	6.00±0.37	5.67±0.03	5.33±0.03
40-60	7.00±0.07	6.56±0.33	6.44±0.01	7.00±0.17	6.56±0.42

กลืน

Age range (year)	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
20-29	5.80±0.55	5.97±0.45	6.26±0.45	5.83±0.33	5.90±0.42
30-39	6.67±0.50	5.33±0.20	5.85±0.82	6.50±1.33	5.50±0.87
40-60	7.44±0.42	6.78±0.39	6.89±0.53	7.00±0.07	7.00±0.50

กลิ่นรส

Age range (year)	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
20-29	6.33±0.34	6.29±0.45	6.34±0.35	6.34±0.33	6.03±0.46
30-39	7.33±0.20	6.33±0.20	5.93±0.20	6.07±1.33	6.00±0.55
40-60	7.56±0.42	7.00±0.62	6.56±0.53	7.22±0.97	7.00±0.45

เนื้อสัมผัส

Age range (year)	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
20-29	6.57±0.36	6.46±0.30	6.29±0.32	6.66±0.37	6.00±0.59
30-39	6.83±0.47	6.33±0.37	6.06±0.20	6.00±1.26	6.67±0.20
40-60	7.56±0.24	6.89±0.36	7.56±0.03	7.56±0.00	6.89±0.36

คะแนนความชอบโดยรวม

Age range (year)	Control	Frozen storage (days)			
		0	15	30	45
20-29	6.74±0.22	6.70±0.05	6.83±0.08	6.63±0.06	6.34±0.28
30-39	7.25±0.99	6.08±0.00	6.38±0.03	6.07±0.75	6.00±0.40
40-60	7.44±0.03	7.33±0.58	7.33±0.00	7.33±0.00	6.89±0.62



ภาคผนวก ค

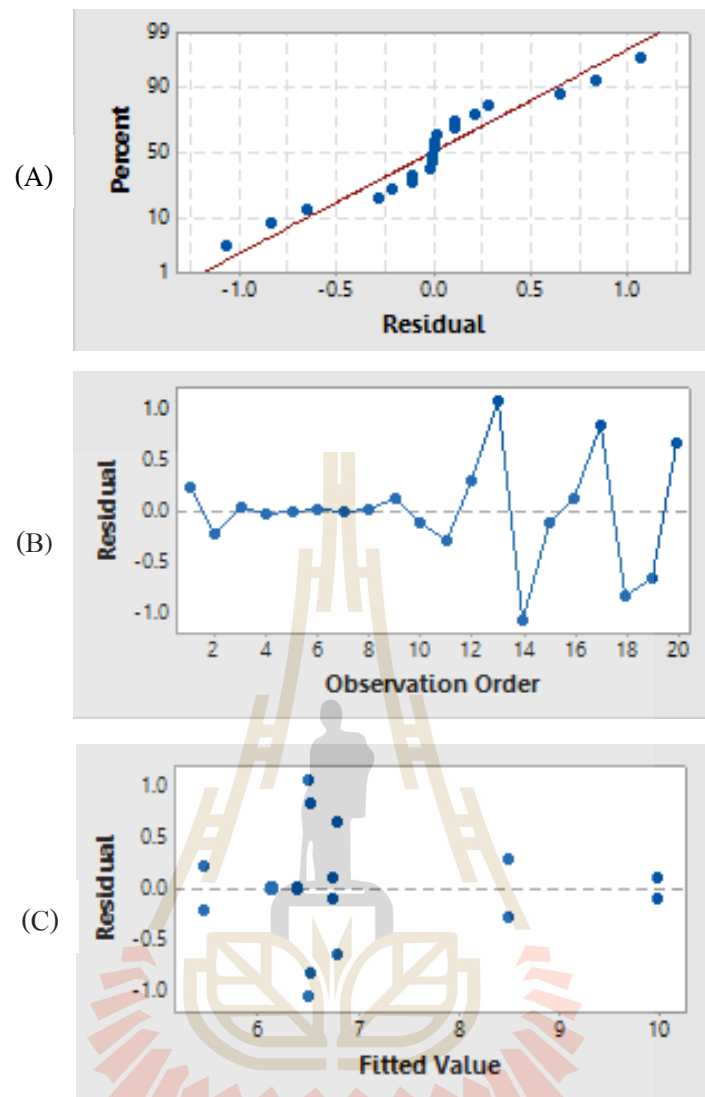
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบภาพ

1. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบภาพ (model adequacy checking)

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่มักจะตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์ว่าตัวแปรตาม (variable) มีการแจกแจงปกติ (normal distribution) โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองต้องเป็นไปตาม 3 สมมติฐาน คือ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนมีความเสถียรภาพ หากข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จะถือว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องเหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนต่อไป (ดาริกา และคณะ, 2556)

- 1.1 การตรวจสอบความถูกต้องแบบภาพของปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 48 72 ชั่วโมง และแบบ cycle ด้วยวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและเตาไมโครเวฟ





รูปที่ ค.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบภาพข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 48 72 ชั่วโมง และแบบ cycle: (A) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ; (B) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และ (C) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

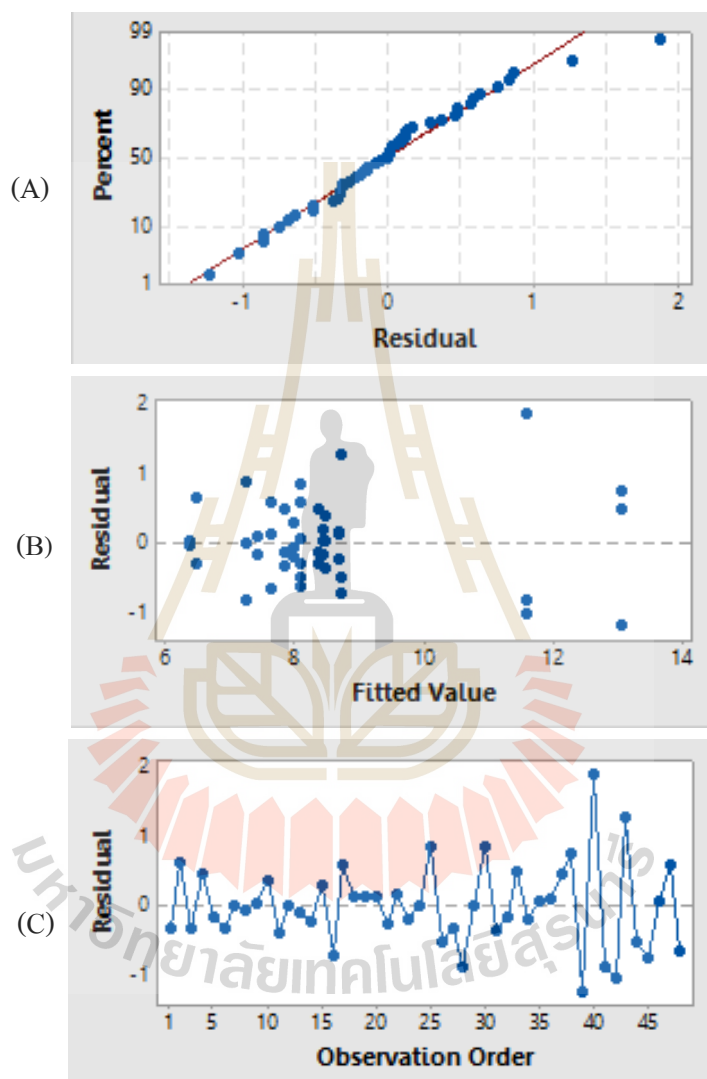
ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวสุกที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 48 72 ชั่วโมง และแบบ cycle

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F-value	p-value
Incubated time, X ₁	4	31.58	7.89	16.39	0.000
Cooking method, X ₂	1	0.05	0.05	0.10	0.758
X ₁ *X ₂	4	3.74	0.93	1.94	0.180
Error	10	4.82	0.48		
Total	19	40.19			

R² = 89.07; adjusted R² = 83.94; p<0.05 indicates statistical significance



- 1.2 การตรวจสอบความถูกต้องแบบภาพของปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวหุงสุกใหม่ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่ม 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน



- รูปที่ ค.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบภาพข้าวหุงสุกที่ผ่านการบ่ม 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน: (A) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ; (B) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และ (C) การตรวจสอบความเสถียรของความ

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของข้าวหุงสุกใหม่ และข้าวหุงสุกที่ผ่านการต้ม 4°C นาน 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปแช่แข็ง -20°C เป็นเวลา 45 วัน

Source	Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F-value	p-value
Storage time, X_1	3	65.69	20.90	43.37	0.000
Cooking method, X_2	3	8.28	2.76	5.47	0.004
$X_1 * X_2$	9	57.98	6.40	02.69	0.000
Error	32	06.06	0.50		
Total	47	047.80			

$R^2 = 89.07$; adjusted $R^2 = 83.94$; $p < 0.05$ indicates statistical significance

ประวัติผู้เขียน

นางสาวนาฏนภางค์ พามขุนทด เกิดเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2537 ศึกษาในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนปัทมขัยประชานิรมิตร จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558

ปี พ.ศ.2559 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานทางวิชาการระหว่างการศึกษາ :

1. ระดับชาติ

- Proceedings

- 1) ชีราพร จุลยุเสน กฤษณากค์ กั้นร้วกลาง ฉัฐพร ชัชวาลชาติรี **นาฏนภางค์ พามขุนทด** และเมวีกา สมบัติไทย. ผลของวิธีการอบแห้งต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและปริมาณสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของกล้วยดิบ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 3 ประจำปี 2560 มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ วันที่ 4 เมษายน 2560 (บทความวิจัยดีเด่นระดับชาติ)
- 2) ชีราพร จุลยุเสน ฉัฐพร ชัชวาลชาติรี **นาฏนภางค์ พามขุนทด** วีรชัย ออาจหาญ และพยุงศักดิ์ จุลยุเสน. การปรับสภาพฟางข้าวด้วยไมโครเวฟร่วมกับด่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 4 ประจำปี 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วันที่ 3 เมษายน 2561
- 3) ชีราพร จุลยุเสน ฉัฐพร ชัชวาลชาติรี **นาฏนภางค์ พามขุนทด** ฉัฐวดี นิมพาลี สุภัทรา มั่งจันท์ก จุฑามาศ ศูนย์กลาง พิจิตรา พรหมมานุญ และสิทธิ วงศ์สอนธรรม. ผลการเติมฟรีไบโอติกต่อลักษณะทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของโยเกิร์ตชนิดกวน. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 4 ประจำปี 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วันที่ 3 เมษายน 2561
- 4) ฉัฐพร ชัชวาลชาติรี ชีราพร จุลยุเสน **นาฏนภางค์ พามขุนทด** ศิริพร สอนสมบุรณ์ สุข วีรชัย ออาจหาญ และพยุงศักดิ์ จุลยุเสน. 2561. การปรับสภาพแห้งมันสำปะหลังด้วยด่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์. การประชุมวิชาการสมาคม

วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 และการประชุมวิชาการสมาคม
วิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับนานาชาติ ครั้งที่ 11 วันที่ 26-27 เมษายน 2561
(บทความวิจัยดีเด่นระดับชาติ)

2. ระดับนานาชาติ

- Proceedings

- 1) **Pamkhuntod, N.**, Junyusen, T., Liplap, P., and Junyusen, P. (2017). The effects of varieties and storage conditions on hardness and whiteness of cooked rice. The 11th SEATUC Symposium, HCMC University of Technology, Vietnam, 13-14 March 2017.
- 2) Sornsomboonsuk, S. , Junyusen, T. , **Pamkhuntod, N.** , Chatchavanthatri, N. , Moolkaew, P., and Junyusen, P. (2018). Effects of heat/ moisture treatment on physicochemical and morphological characteristics of cassava starch. The 19th TSAE National Conference and the 11th TSAE International conference, Kasetsart University, Thailand, 26-27 April 2018.
- 3) Moolkaew, P. , Junyusen, T. , Chatchavanthatri, N. , **Pamkhuntod, N.** , Sornsomboonsuk, S., and Junyusen, P. (2018). Effects of autoclave and microwave-assisted extractions of *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) sing on polysaccharides yields and microstructural characteristics. The 19th TSAE National Conference and the 11th TSAE International conference, Kasetsart University, Thailand, 26-27 April 2018.