

ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง
และดัชนีไกลซีมิก

ณัฏชา ดาวมุกดา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร

กันยายน 2554

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง
และดัชนีไกลซีมิก

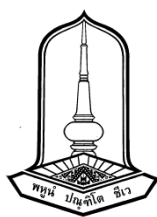
ณัฏชา ดาวมุกดา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร

กันยายน 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวณัชชา คาวมุกดา
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....	ประธานกรรมการ
(ผศ.ดร.วัลยา สุทธิจำ)	(อาจารย์บัณฑิตศึกษาภายนอกคณะ)
.....	กรรมการ
(ผศ.ดร.อนุชิตา มุ่งงาม)	(ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อังคณา น้อยสุวรรณ)	(กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ฐาปนพันธ์นิตกุล)	(ผู้ทรงคุณวุฒิ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....	
(ผศ.ดร.ราไพ เกณฑ์สาธุ)	(รศ.ดร.ไพฑูรย์ สุขศรีงาม)
คณบดีคณะเทคโนโลยี	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
	วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2554

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประเภท
บัณฑิตศึกษา ประจำปี 2553 ด้านการเพิ่มมูลค่าผลิตผลทางการเกษตร และทุนอุดหนุนการวิจัย
สำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.อนุชิตา มุ่งงาม ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.อังคณา น้อยสุวรรณ
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ ประธานกรรมการสอบ
และอาจารย์ ดร.อรอนงค์ ฐาปนพันธ์นิตกุล กรรมการสอบ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาศาสตร์ คณะเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือ
ในการวิจัยและศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ขอขอบคุณคณะกรรมการพิจารณาทุนวิจัยงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ปีงบประมาณ 2554 ประโยชน์และคุณค่าจากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา-มารดา
ครู-อาจารย์ ที่มีส่วนให้ชีวิตและปัญญาแก่ผู้วิจัยจนประสบผลสำเร็จ

ณัชชา คาวมุกดา

ชื่อเรื่อง	ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก
ผู้วิจัย	นางสาวณัฏชา ดาวมุกดา
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีการอาหาร
กรรมการควบคุม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชิตา มุ่งงาม อาจารย์ ดร.อังคณา น้อยสุวรรณ
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวกล้องจากข้าวสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เกิดจากการรับประทานอาหาร โดยวิธีการหุงข้าวมี 4 วิธี ได้แก่ การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า การหุงโดยการนึ่ง การหุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และการหุงด้วยไมโครเวฟ นำข้าวกล้องที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่าง ๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง ลักษณะเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลาติไนเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก พบว่าวิธีการหุงข้าวไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย ความชื้น และปริมาณแป้งทั้งหมด ($p>0.05$) แต่มีผลต่อปริมาณเถ้า คือ ข้าวกล้องที่หุงแบบวิธีดั้งเดิมมีปริมาณเถ้าต่ำที่สุดคือ 1.06% ($p<0.05$) และด้านลักษณะเนื้อสัมผัสนั้นวิธีการหุงข้าวกล้องไม่มีผลต่อค่าความเกาะติดกัน (Cohesiveness) ความยืดหยุ่น(Springiness) และการเคี้ยว (Chewiness) ของข้าวกล้อง ($p>0.05$) แต่มีผลต่อค่าความแข็ง (Hardness) โดยข้าวที่หุงด้วยไมโครเวฟและการนึ่งมีค่าความแข็งสูงกว่าข้าวกล้องที่ได้จากการหุงด้วยวิธีดั้งเดิม ($p<0.05$) ข้าวที่หุงโดยการนึ่งมีระดับของการเกิดเจลลาติไนเซชัน (90.96%) และปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง (Starch leaching) (1.34%) ต่ำที่สุด ($p<0.05$) สอดคล้องกับผลของวิธีการหุงต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก คือ ข้าวที่หุงโดยการนึ่งมีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก (GI=74.43) ต่ำที่สุด ต่างจากวิธีอื่นที่มีดัชนีไกลซีมิกอยู่ในช่วง 76.73 ถึง 78.31 ($p<0.05$)

จากนั้นศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า โดยศึกษาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำมี 3 ระดับ คือ 1:2, 1:3 และ 1:4 พบว่าอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และปริมาณแป้งทั้งหมดของข้าวกล้อง ($p>0.05$) แต่มีผลต่อปริมาณความชื้น โดยข้าวกล้องที่หุงด้วย

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 มีปริมาณความชื้นสูงกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:2 ตามลำดับ ($p<0.05$) การหุงข้าวกล้องโดยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าซึ่งใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีค่าความแข็ง (14.90 N) และการเคี้ยว (2.11 Nmm) สูงกว่าตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในขณะที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องไม่มีผลต่อค่าความเกาะติดกัน และความยืดหยุ่น ($p>0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวกล้องที่หุงโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีระดับของการเกิดเจลลิตินเซชัน (84.05%) ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างเป็น 0.86% ต่ำที่สุด และมีดัชนีไกลซีมิก 67.94 จัดอยู่ในกลุ่มที่มีดัชนีไกลซีมิกปานกลาง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องที่หุงโดยใช้อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากการการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง พบว่าไขมันมีความสัมพันธ์ทางลบในระดับปานกลางกับดัชนีไกลซีมิก ($r_{xy} = -0.591$) ค่าความแข็งมีความสัมพันธ์ทางลบในระดับสูงกับค่าดัชนีไกลซีมิก ($r_{xy} = -0.751$) แต่ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างมีความสัมพันธ์ทางบวกในระดับสูงกับค่าดัชนีไกลซีมิก ($r_{xy} = 0.760$) และระดับของการเกิดเจลลิตินเซชันมีความสัมพันธ์ทางบวกในระดับสูงกับค่าดัชนีไกลซีมิก ($r_{xy} = 0.796$) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

คำสำคัญ : ข้าวกล้อง; วิธีการหุงข้าว; ระดับการเกิดเจลลิตินเซชัน; ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง; ดัชนีไกลซีมิก

TITLE Effects of Cooking Methods on Starch Digestibility and Glycemic Index of Brown Rice

AUTHOR Miss Natcha Daomukda

DEGREE Master Degree of Science **MAJOR** Food Technology

COMMITTEE Asst. Prof. Dr. Anuchita Moongngarm and Dr. Angkana Noisuwan

UNIVERSITY Mahasarakham University **YEAR** 2011

ABSTRACT

The present study aimed to investigate the effects of cooking methods on chemical compositions, physicochemical properties, the starch digestibility, and glycemic index of brown rice (*Oryza sativa* cultivar Kao Dok Mali 105 (Jasmine)). Brown rice was cooked using four different cooking methods : electric cooker, microwave oven, steaming, and conventional method. Cooked rice samples were then subjected to analyze for proximate compositions, total starch, starch leaching, texture analysis profile (texture analyzer), degree of gelatinization, starch digestibility, and glycemic index. In the study on the influence of cooking methods on chemical compositions, the results revealed that the protein, fat, fiber, moisture and total starch content were not affected by the cooking methods, while the conventional cooking method significantly reduced ash content (1.06%). For the study on the effect of cooking method on the texture of cooked rice, the results showed that attributes including cohesiveness, springiness and chewiness were not significantly affected by the cooking methods whereas rice cooked by microwave and steaming method showed significantly higher hardness than those of rice cooked by the conventional method. The lowest degree of gelatinization (90.96%) and starch leaching (1.34%) were significantly observed in cooked rice using steaming method. In addition, the study on the effect of cooking methods on starch digestibility and glycemic index, the steaming method showed the lowest value on starch digestibility glycemic index (74.43) than those of other methods which had the values varied between 76.73 to 78.31.

For the further study on the effects of ratio of rice to water of cooked rice on starch digestibility and glycemic index, the ratio of rice to water of 3 levels; 1:2, 1:3 and 1:4 was applied to cook brown rice using electric rice cooker. The results showed that the ratio of rice to water did not

significantly affect the contents of protein, fat, fiber, ash, and total starch, but influenced the moisture content significantly. The cooked rice using ratio 1:4 had the highest moisture content followed by cooked rice with ratio of rice to water of 1:3 and 1:2 respectively. The effect of ratio of rice to water of cooked rice on texture showed that rice cooked with 1:2 rice to water ratio had higher values of hardness (14.90 N) and chewiness (2.11 Nmm) than other samples, whereas other attributes including cohesiveness and springiness were not significantly affected by the ratio of rice to water. In addition, the lowest degree of gelatinization (84.05%) and starch leaching (0.86%) were observed in cooked rice with ratio rice to water 1:2. For the study on the effect of ratio of rice to water of cooked rice on starch digestibility and glycemic index, cooked rice with ratio of rice to water 1:2 showed the lowest value on starch digestibility and glycemic index (67.94) than those of other ratios of water which had values varied between 77.99 to 79.22.

For the analysis of Pearson's Correlation Coefficient between various variables and glycemic index of brown rice, it was found that fat was moderate negatively correlated to glycemic index ($r_{xy} = -0.591$) and hardness was high negatively correlated to glycemic index ($r_{xy} = -0.751$); while the starch leaching and degree of gelatinization were high positively correlated to glycemic index ($r_{xy} = 0.760, 0.796$ respectively).

Key Words : Brown rice ; Cooking method ; Degree of gelatinization ; Starch digestibility ;

Glycemic index

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพประกอบ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ภูมิหลัง	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ความสำคัญของการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ความหมายของข้าว	6
2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว	6
2.3 เกล็ดของข้าว	8
2.4 ลักษณะของข้าวหอมมะลิ	15
2.5 การหุงข้าว	16
2.6 การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยเครื่องมือ	18
2.7 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก	21
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 แผนการวิจัย	28
3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.3 วิธีการทดลอง	31
3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล	37
3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	37

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	38
4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล	38
4.2 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล	38
4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	57
5.1 สรุปผล	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อลักษณะของข้าวกล้อง ที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	66
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานระดับการเกิดเจลลาทีในเซชันของข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105	68
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความแปรปรวน	70
ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่	81
ประวัติย่อของผู้วิจัย	90

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว	9
ตาราง 2.2 การจำแนกลักษณะข้าวสุกตามปริมาณอะมิโลส	10
ตาราง 2.3 ค่าวัดลักษณะเนื้อสัมผัสจากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	19
ตาราง 2.4 คำจำกัดความของเนื้อสัมผัสข้าวหุงสุกจากการทดลองชิม	20
ตาราง 2.5 ประเภทของแป้งในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อยสลายได้	22
ตาราง 2.6 แบบจำลองดัชนีการย่อยและการประเมินดัชนีไกลซีมิกของตัวอย่างข้าวที่หุงสุกแล้ววิเคราะห์ทันทีและข้าวที่มีการคืนตัว	24
ตาราง 4.1 ผลของวิธีการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง	40
ตาราง 4.2 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้าง	41
ตาราง 4.3 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส	42
ตาราง 4.4 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k), ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI)	46
ตาราง 4.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง	47
ตาราง 4.6 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมี	48
ตาราง 4.7 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องต่อปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้าง	49
ตาราง 4.8 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส	51
ตาราง 4.9 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงข้าวกล้องต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k), ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI)	55
ตาราง 4.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง	56
ตาราง ข 1 การประเมินระดับของการเกิดเจลที่ในเซชันด้วยวิธี Differential alkaline Solubility ในการสร้างกราฟมาตรฐาน	69
ตาราง ค 1 การเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ	71
ตาราง ค 2 เปรียบเทียบปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้างในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ	72

	หน้า
ตาราง ค 3	เปรียบเทียบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ค 4	เปรียบเทียบระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชันในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ค 5	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k), ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ค 6	การเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ตาราง ค 7	เปรียบเทียบปริมาณปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้างในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ตาราง ค 8	เปรียบเทียบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ตาราง ค 9	เปรียบเทียบระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชันในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ตาราง ค 10	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k), ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
ตาราง ง 1	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ปริมาณเถ้าในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ง 2	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ง 3	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของความแข็ง (Hardness) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ง 4	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ง 5	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ง 6	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าดัชนีการย่อย (HI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ
ตาราง ง 7	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

หน้า

ตาราง ง 8	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของปริมาณความชื้นในข้าวกล้อง ที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	85
ตาราง ง 9	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	86
ตาราง ง 10	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของความแข็ง (Hardness) ในข้าวกล้อง ที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	86
ตาราง ง 11	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของการเคี้ยว (Chewiness) ในข้าวกล้อง ที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	87
ตาราง ง 12	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของระดับการเกิดเจลลิตินเซชัน ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	87
ตาราง ง 13	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกัน โดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	88
ตาราง ง 14	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าคงที่ของสมการ (k) ในข้าวกล้อง ที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	88
ตาราง ง 15	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าคงที่ของดัชนีการย่อย (HI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	89
ตาราง ง 16	การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าคงที่ของดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	89

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส	11
ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน	11
ภาพประกอบ 2.3 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C	12
ภาพประกอบ 2.4 กราฟ Texture Profile Analysis	19
ภาพประกอบ 4.1 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชัน	43
ภาพประกอบ 4.2 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อการย่อยได้ของแป้ง	45
ภาพประกอบ 4.3 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องต่อระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชัน	52
ภาพประกอบ 4.4 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องต่อการย่อยได้ของแป้ง	53
ภาพประกอบ ก 1 ลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2	67
ภาพประกอบ ก 2 ลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3	67
ภาพประกอบ ก 3 ลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4	67
ภาพประกอบ ข 1 กราฟมาตรฐานของระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวกล้องดอกมะลิ 105	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ข้าวกล้องเป็นอาหารสุขภาพที่กำลังเป็นที่นิยมเพราะอุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน เกลือแร่ และวิตามิน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550) นอกจากนั้นข้าวกล้องยังประกอบด้วยเส้นใยที่ไม่ละลายในปริมาณสูงถึง 1.37 กรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งสามารถขัดขวางการก่อมะเร็งชนิดต่าง ๆ ได้ (Anderson and Bridges, 1988) ในความหลากหลายทางสายพันธุ์ของข้าวกล้อง ข้าวกล้องสายพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวกล้องสายพันธุ์หนึ่งที่นิยมบริโภคในประเทศไทยและต่างประเทศ เนื่องจากมีกลิ่นหอมและมีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม ข้าวสายพันธุ์นี้มีปริมาณอะมิโลสอยู่ในช่วง 12-17 % โดยน้ำหนัก (วิไลลักษณ์ สมมุติ, 2545) จัดว่าเป็นข้าวที่มีอะมิโลสในปริมาณต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสายพันธุ์อื่น และสามารถย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ส่งผลให้ระดับกลูโคสในเลือดสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว มีรายงานว่าข้าวกล้องมีปริมาณดัชนีไกลซีมิก (glycemic index ; GI) ประมาณ 79 (Powell *et al.*, 2002)

ปัจจุบันมีการศึกษาถึงความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (starch digestibility ; SD) และดัชนีไกลซีมิกของอาหารมากขึ้น เนื่องจากคำดังกล่าวมีผลต่อผู้บริโภคโดยเฉพาะผู้บริโภครวมที่เป็นโรคเกี่ยวกับระดับของน้ำตาลในเลือด เช่น เบาหวาน และโรคอ้วน การบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกและความสามารถในการย่อยได้ของแป้งต่ำ จะทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และมีระดับน้ำตาลในเลือดค่อนข้างคงที่ เมื่อมีน้ำตาลในเลือดอยู่ได้นานขึ้นจะไม่หิวบ่อย ทำให้ควบคุมอาหารได้ดียิ่งขึ้น การศึกษานักวิจัยในหลายประเทศที่ผ่านมาพบว่าอาหารที่มีดัชนีไกลซีมิกต่ำมีความสำคัญเพราะเป็นอาหารเพื่อสุขภาพเหมาะสำหรับคนที่เป็นเบาหวาน และคนที่มีภาวะน้ำหนักเกิน เนื่องจากดัชนีไกลซีมิกเป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เกิดจากอาหารอาหารที่มีดัชนีไกลซีมิกสูง จะทำให้มีการเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็ว (Sanchez-Pardo *et al.*, 2007)

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าดัชนีไกลซีมิกและความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง เช่น วิธีการแปรรูป วิธีการหุงข้าว โครงสร้างของอะมิโลเพกตินและปริมาณอะมิโลส มีรายงานว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีดัชนีไกลซีมิกต่ำ (Frei *et al.*, 2003) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาผลของการหุงสุกด้วยวิธีต่างๆ ต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกในข้าวกล้อง เนื่องจาก

การหุงสุกและการแปรรูปมีผลต่อโครงสร้างของข้าว องค์ประกอบของอาหาร เช่นทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้ง แป้งที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) และส่งผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งรวมถึงดัชนีไกลซีมิก (Mahadevamm and Tharanathan, 2007) ซึ่งจะเป็นประโยชน์แก่ผู้บริโภคโดยเฉพาะกลุ่มที่เป็นโรคเกี่ยวกับระดับของน้ำตาลในเลือดได้เลือกบริโภคข้าวกล้องจากการหุงสุกด้วยวิธีต่างๆ

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีต่างๆ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
- 1.2.5 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า
- 1.2.6 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 วิธีการหุงข้าวกล้องแต่ละวิธีมีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องแตกต่างกัน
- 1.3.2 วิธีการหุงข้าวกล้องแต่ละวิธีมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องแตกต่างกัน
- 1.3.3 วิธีการหุงข้าวกล้องแต่ละวิธีมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องแตกต่างกัน
- 1.3.4 อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องแตกต่างกัน
- 1.3.5 อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องแตกต่างกัน

1.3.6 อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องแตกต่างกัน

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

1.4.1 ทราบผลของวิธีการหุงสุกต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกในข้าวกล้อง

1.4.2 ทราบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องที่หุงสุกด้วยวิธีต่าง ๆ

1.4.3 ทราบผลของวิธีการหุงแบบต่างๆ ในการหุงสุกต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกในอาหาร

1.4.4 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถเป็นพื้นฐานในการพัฒนาการแปรรูปอาหารสำหรับผู้ที่เป็นเบาหวานและมีภาวะน้ำหนักเกินเพราะทำให้สามารถควบคุมน้ำหนักได้ดินนอกจากนี้ผู้ที่มีสุขภาพแข็งแรงคืออยู่แล้วก็สามารถรับประทานเพื่อป้องกันการเกิดโรคหัวใจขาดเลือดและโรคเบาหวานได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ในการวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคามเพื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

1.5.2 การศึกษาผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก จากความมุ่งหมายของงานวิจัยข้อที่ 1 ถึง 3

1.5.2.1 ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

1.5.2.1.1 ตัวแปรอิสระ คือ วิธีการหุงข้าวแบ่งเป็น 4 วิธี ได้แก่ การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า, การหุงโดยการนึ่ง, การหุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และการหุงด้วยไมโครเวฟ

1.5.2.1.2 ตัวแปรตาม

1.5.2.1.2.1 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility)

1.5.2.1.2.2 ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index)

1.5.2.1.2.3 ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch)

1.5.2.1.2.4 องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เส้นใย ความชื้น เถ้า

1.5.2.1.2.5 เนื้อสัมผัสของข้าว (Texture)

1.5.2.1.2.6 แป้งที่ถูกละล้าง (Starch leaching)

1.5.2.1.2.7 ระดับของการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Degree of gelatinization)

1.5.3 การศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า จากความมุ่งหมายของงานวิจัยข้อที่ 4-6

1.5.3.1 ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่

1.5.3.1.1 ตัวแปรอิสระ คือ อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำมี 3 ระดับ คือ 1:2, 1:3 และ 1:4

1.5.3.1.2 ตัวแปรตาม

1.5.3.1.2.1 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility)

1.5.3.1.2.2 ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index)

1.5.3.1.2.3 ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch)

1.5.3.1.2.4 องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เส้นใย ความชื้น เถ้า

1.5.3.1.2.5 เนื้อสัมผัสของข้าว (Texture)

1.5.3.1.2.6 แป้งที่ถูกละล้าง (Starch leaching)

1.5.3.1.2.7 ระดับของการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (Degree of gelatinization)

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 ข้าวกล้อง (Cargo rice, Loonzain rice, Brown rice, Husked rice) คือ ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออกเท่านั้น (แกลบ) โดยยังมีจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวอยู่ซึ่งจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวนี้นี้เป็นส่วนที่มีคุณค่าทางอาหารที่เป็นประโยชน์ (ศิริธร ศิริอมรพรรณ, 2549)

1.6.2 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง (Starch digestibility) คือความสามารถในการย่อยได้ของแป้งโดยเอนไซม์ที่ลำไส้เล็กในร่างกาย เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของแป้งที่ย่อยได้ทั้งหมดกับเวลา ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของการย่อยแป้งได้ และสามารถทราบค่า hydrolysis index หรือดัชนีการย่อยได้จากพื้นที่ใต้กราฟ จากนั้นนำค่าดัชนีการย่อยที่ได้ไปคำนวณหา ดัชนีไกลซีมิกโดยใช้การคำนวณจากสมการ (Jaisut *et al.*, 2008)

1.6.3 ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index) คือ ดัชนีที่ใช้ในการประเมินระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดหลังจากการบริโภคอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง จะทำให้มีการเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็ว อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำ จะทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นช้า ๆ (Sanchez-Pardo *et al.*, 2007)

1.6.4 สตาร์ช (Starch) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสิ่งเจือปน หมายถึง โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ จะถูกสกัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะอมขวัญ, 2546)

1.6.5 เส้นใยอาหาร (Dietary fiber) คือสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนที่ไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในร่างกาย แต่อาจถูกย่อยโดยจุลินทรีย์บางชนิดในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นใยอาหารที่ละลายในน้ำ และเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ พบได้ในถั่วเมล็ดแห้ง ข้าวซ้อมมือ รำข้าว ผักและผลไม้ (นิธิยา รัตนปณณท์, 2549)

1.6.6 หุงข้าวแบบเช็ดน้ำ คือ การนำข้าวสารใส่ในภาชนะที่จะหุง เช่น หม้อ ซาวข้าวสารให้สะอาดก่อนนำไปตั้งไฟ เคี่ยวให้น้ำเดือด เมื่อเมล็ดข้าวสุกแล้วจะรินน้ำทิ้งไปเรียกว่า “เช็ดน้ำข้าว” แล้วเอาหม้อข้าวมาตั้งไฟอ่อนๆ เพื่อให้ข้าวในหม้อแห้งหมด เรียกว่า ดงข้าว จนข้าวสุกกระทันหัน

1.6.7 หุงข้าวแบบนึ่ง คือ การทำให้ข้าวสุกโดยใช้ไอน้ำ นำกระทะมาตั้งบนเตาไฟเติมน้ำในกระทะแล้ววางซึ่งสำหรับนึ่งลงบนกระทะ นำข้าวที่ซาวแล้วใส่ภาชนะทนความร้อนตั้งไว้ในซึ่งใส่น้ำในข้าวให้ท่วมข้าว 1 – 1.5 นิ้ว ปิดฝากระทะ ตั้งไฟให้น้ำในกระทะเดือดเป็นไอน้ำ การนึ่งนี้ต่อมาเปลี่ยนเป็นการนึ่งด้วยลังถึงซึ่งเป็นภาชนะอะลูมิเนียม

1.6.8 หุงข้าวแบบหม้อหุงข้าวไฟฟ้า คือการนำข้าวสารที่ซาวน้ำแล้วใส่ในภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหุง ภายในหม้อของหม้อหุงข้าว จะมีขีดยกกระทะค้ำน้ำให้เต็มตามปริมาณข้าวที่จะหุง เกลี่ยข้าวให้ราบเติมน้ำให้ท่วมฝ่ามือ สำหรับปริมาณน้ำที่จะเติมนี้นิยมแตกต่างกันไปตามชนิดของข้าวและความต้องการของแต่ละบุคคล วางหม้อในลงในหม้อนอกแล้วปิดฝามือเสียบปลั๊กเข้าสวิตช์ไฟอุ่น (Warm) จะติด เมื่อกดสวิตช์สีแดงลง ไฟหุง (Cook) จะติดและหม้อก็อยู่ในสภาพที่หุงข้าว และเมื่อข้าวในหม้อสุก หม้อก็จะเปลี่ยนจากสภาพที่หุงไปเป็นอุ่นพร้อมทั้งไฟก็จะ แสดงว่าหม้ออยู่ในสภาพการอุ่นแล้ว ตามปกติเพื่อให้ข้าวมีรสชาติดียิ่งขึ้นเมื่อสุกแล้ว ยังไม่ควรเปิดฝาคือควรปล่อยให้ข้าวถูกคองอยู่อีก 10-15 นาที เพื่อให้ข้าวอ่อนนุ่ม และอร่อยขึ้น

1.6.9 หุงข้าวโดยไมโครเวฟ คือการนำข้าวสารใส่ในภาชนะด้วยแก้วทนความร้อนที่ใช้ในเตาอบได้ ใส่น้ำในข้าวให้ท่วมข้าวประมาณ 350-400 มล. ลงในข้าว 100 กรัม หุงด้วยไมโครเวฟ 100 °C 25 นาที นำออกมาคนทุก 10 นาที

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหมายของข้าว

ข้าว (Rice) เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในวงศ์ Gramineae ชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* เป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้าที่สามารถกินเมล็ดได้ถือเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นเดียวกับหญ้า องค์กรประกอบทางเคมีที่สำคัญในเมล็ดข้าวได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และเส้นใย การหุงสุก และการให้ความร้อนจะมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าว ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพ การหุงสุกและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก และท้ายที่สุดอาจส่งผลต่อความสามารถในการย่อยได้ ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก ซึ่งมีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

ข้าวเป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกเมล็ดข้าว (Rice fruit, rice grain หรือ rice seed) ซึ่งทาง พฤกษศาสตร์ หมายถึง ผล (Fruit) ที่มีลักษณะเป็นผลเดี่ยว (Single fruit) เกิดจากรังไข่อันเดียวชนิด ลอยตัว (Superior ovary) ของดอกเดี่ยวในแต่ละดอกย่อยที่เกิดรวมกันอยู่เป็นช่อดอก ผลเดี่ยวนี้ ติดแน่นอยู่กับผนังของรังไข่หรือเยื่อหุ้มผล (Pericarp) ซึ่งเมื่อผลสุกหรือแก่จะเป็นผลแห้ง (Dry fruit) ที่ไม่แตก (Indehiscent fruit) เรียกว่าเมล็ด (Caryopsis grain) ที่มีเยื่อหุ้มผลและเปลือกหุ้มเมล็ด (Seed Coat หรือ Testa) เชื่อมรวมกันอย่างแนบแน่น โดยตลอดผลหรือเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแตกต่างตาม พันธุ์ ในด้านขนาด รูปร่าง สี การมีหาง (Awn) หรือไม่มีหาง และขน (Pubescence) หรือไม่มีขนบน เปลือกแข็ง เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าวและส่วนเนื้อผล ผลแท้หรือ ข้าวกล้อง โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

2.2.1 ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เป็นส่วนประกอบภายนอก ส่วนที่ห่อหุ้มนอกสุดของเมล็ด โดยทั่วไปเรียกว่าเกลบ (Hull) หรือเปลือกดอกอันใหญ่ (Lemma) ซึ่งจะหลุดออกในระหว่าง กระบวนการกะเทาะเกลบประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นลักษณะเส้นใย (Fibrous) ส่วนผิว ปกคลุมด้วยขนแหลม แข็ง เปราะ เรียกว่าไตรโครม (Trichomes) นอกจากนี้ยังมีข้าวเมล็ด (Rachilla) และกลีบรองเมล็ด (Sterile lemma)

2.2.2 ข้าวกล้องหรือเนื้อผล เมื่อแกะเปลือกหรือเกลบออกจะเรียกส่วนภายในว่า ข้าวกล้องซึ่งประกอบด้วย

2.2.2.1 เชื้อหุ้มผล (Pericarp) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกมีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ห่อหุ้มผลอยู่ ภายในประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือเนื้อเยื่อชั้นนอกหรือเอพิการ์พ (Epicarp) หรือ เอกโซคาร์พ (Exocarp) เป็นผนังหรือเปลือกที่อยู่นอกสุดมีลักษณะเรียบ เหนียว และเป็นมัน ประกอบด้วยเซลล์ชั้นเดียว เนื้อเยื่อชั้นกลางหรือมิโซคาร์พ (Mesocarp) หรือไฮพอดेर็ม (Hypoderm) เป็นผนังผลชั้นกลางและเนื้อเยื่อชั้นในหรือเอ็นโดคาร์พ (Endocarp) ส่วนผนังของเซลล์ประกอบด้วย โปรตีน (Protein) เชื้อหุ้มผลมีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous) 6 ชั้น มีสารสีหรือรงควัตถุปนอยู่ทำให้ข้าว กล้องมีสีต่างๆ เช่น น้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ น้ำตาลแดง น้ำตาลม่วง น้ำตาลจนเกือบดำ เป็นต้น มีความ อ่อนนุ่มเป็นส่วนที่ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำ ซึ่งขณะที่เชื้อ หุ้มผลยังไม่ถูกทำลายช่วยป้องกันการทำลายของเชื้อรา การทำปฏิกิริยาของค์ประกอบของ เอนโดสเปิร์มกับออกซิเจนหรือขบวนการเสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาของเอนไซม์นอกจากนี้ยังมีโปรตีน เสมิเซลลูโลส และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญ

2.2.2.2 เชื้อหุ้มเมล็ด (Seed coat) อยู่ถัดจากเชื้อหุ้มผล ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 2 ชั้น เรียงเป็นแถวและมีผนังบางกัน (หนาประมาณ 0.5 ไมครอน) ประกอบด้วยไขมัน โปรตีน และสารสี เช่นเดียวกับเชื้อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสีมีส่วนของแป้งอยู่เล็กน้อย

2.2.2.3 นิวเซลลัส (Nucellus) เป็นชั้นเซลล์ที่ติดกับเชื้อหุ้มเมล็ด แต่พันระหว่าง นิวเซลลัสกับเชื้อหุ้มเมล็ดไม่ติดกันแน่น จึงแยกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

2.2.2.4 เชื้อออูโรน (Aleurone layer) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเอนโดสเปิร์มและคัพพะ ประกอบด้วยเซลล์จำนวน 1-7 ด้านหลังเมล็ดมีความหนามากกว่าด้านอื่น ความหนาของส่วนนี้ แตกต่างกันตามพันธุ์ข้าว เชื้อออูโรนนี้จะไม่ติดกับคัพพะในส่วนของใบเลี้ยงด้านท้องของเมล็ดลง มาถึงจุดเชื่อมระหว่างใบเลี้ยงกับเชื้อหุ้มรากอ่อนซึ่งอยู่ข้างในของเมล็ด จึงแบ่งลักษณะของเซลล์ ออูโรนเป็น 2 ลักษณะ คือส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์และมี ไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein bodies) กลุ่มไขมัน (Lipid bodies) และสารอื่นๆ เช่น นิวเคลียส (Nucleus) ไมโครบอดี (Microbodies) ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม (Endoplasmic reticulum) แวลลิเคิล (Vesicle) และ พลาสติด (Plastids) เป็นต้น ส่วนเซลล์ออูโรนที่ห่อหุ้มคัพพะจะบางมีไซโทพลาสซึม น้อย รูปร่างยาวมีกลุ่มไขมันและกลุ่มโปรตีนน้อย มีแวลลิเคิลมากเป็นต้น ส่วนผนังเซลล์จะมีโปรตีน เสมิเซลลูโลสและเซลลูโลสประกอบด้วย

2.2.2.4.1 คัพพะหรือเชื้อชีวิตจะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของ เมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (Radicule) ต้นอ่อน (Plumule) เชื้อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) เชื้อหุ้ม

ต้นอ่อน (Coleoptile) ท่อน้ำท่ออาหาร(Epiblast) และใบเลี้ยง (Scutellum) ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว กัพพะ เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อนจึงอุดมด้วยไขมันและโปรตีน

2.2.2.4.2 ส่วนที่เป็นแป้งหรือเอนโดสเปิร์ม (Starchy endosperm) นั้นจะมีแป้ง เป็นองค์ประกอบหลักประมาณ 78-80% ความชื้น 14% โปรตีน 6-8% และมีไขมันในปริมาณเล็กน้อย เซลล์เม็ดแป้งเป็นรูปหกเหลี่ยม แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นซับอูโรน (Subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้นอยู่ถัดจากชั้นอูโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (Starchy endosperm) ในชั้น ซับอูโรนจะมีกลุ่มโปรตีนอยู่ใน 3 ลักษณะ คือ ลักษณะกลมใหญ่ (ขนาด 1-2 ไมครอน) กลมเล็ก (ขนาด 0.5-0.75 ไมครอน) และเป็นผลึกติดกันขนาด 2-3.5 ไมครอน แต่ในส่วนเนื้อของเมล็ดจะมีกลุ่ม โปรตีนลักษณะกลมใหญ่เท่านั้นแทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช (Starchy granule) มีขนาด 3-9 ไมครอน ที่มีอยู่มากอัดแน่นรวมเป็นกลุ่มเม็ดสตาร์ช (Compound granules) อยู่ในเซลล์ พาเรนไคมา (Parenchyma cells) ที่มีผนังเซลล์บาง มีรูปร่างรีหรือสี่เหลี่ยมเข้าสู่ใจกลางเมล็ด โดยด้านนอกของเมล็ดจะรีและยาวมากกว่าด้านในของเมล็ด

2.3 เคมีของข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

องค์ประกอบหลักที่สำคัญซึ่งพบในเมล็ดข้าว คือ พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน และไขมัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพของเมล็ด และการนำเมล็ดไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สตาร์ชซึ่งมีองค์ประกอบเป็นอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในสัดส่วนต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของข้าว ทำให้ข้าวมีลักษณะในการหุงต้มและคุณภาพต่างกันไป สำหรับโปรตีนในข้าวยังนับว่าเป็นแหล่ง อาหารหลักที่ผู้บริโภคในทวีปเอเชียได้รับจากอาหาร ส่วนไขมันในข้าวจะอยู่เป็นกลุ่มไขมัน (Lipid bodies) หรือหยดกลม (Spherosomes) โดยอยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ชและโปรตีนในชั้นแอลิโรน และคัพพะ จะมีผลในการเสื่อมเสียขณะเก็บรักษาเมล็ดรวมทั้งที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทาง เคมีโดยประมาณ เพื่อให้ทราบองค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารหลักที่มีในข้าว รวมถึงวิเคราะห์ คุณค่าทางอาหารและโภชนาการด้วย ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ของข้าวเปลือก และส่วนที่ได้จากขัดสีที่ความชื้น 14 % จากตารางแสดงให้เห็นว่า เมื่อกะเทาะ เปลือกของข้าวเปลือกได้เป็นข้าวกล้อง ทำให้มีโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และพลังงาน ซึ่งเป็น องค์ประกอบทางเคมีมากขึ้น แต่ทำให้ปริมาณเส้นใยหยาบ เถ้าและเส้นใยอาหารลดลง เนื่องจาก องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีมากในแกลบ (เปลือกแข็งหุ้มเมล็ด) นั่นเองส่วนข้าวสารซึ่งได้จากการ ขัดขาวมีปริมาณสารอาหาร คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า เส้นใยอาหาร รวมทั้งพลังงานลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องเพราะส่วนของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิวเคลลัส ชั้นแอลิโรน รวม

ทั้งนี้ทั้งนั้นหลุดออกไปทำให้เมล็ดข้าวสารมีสีขาวขึ้นและมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น
สำหรับผลพลอยได้จากการขัดสีข้าวเปลือกที่สำคัญ คือ รำข้าวซึ่งประกอบด้วยรำจากการขัดขาว รำ
จากการขัดมัน และกะพละปนกันอยู่ทำให้มีสารอาหารซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกาย
คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า เส้นใยอาหารแต่มีคาร์โบไฮเดรตและพลังงานลดลงเมื่อ
เปรียบเทียบกับข้าวสารผลพลอยได้อีกอย่าง คือ แกลบ ประกอบด้วย โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต
น้อยที่สุดในขณะที่มีเส้นใยหยาบ เถ้า เส้นใยอาหารมากที่สุด

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

ส่วนของข้าว	โปรตีน (ก.)	ไขมัน (ก.)	เส้นใย (ก.)	เถ้า (ก.)	คาร์โบไฮเดรต (ก.)	เส้นใยอาหาร (ก.)	พลังงาน (กิโลจูล) (กิโลแคลอรี)	
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-2.3	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2	1,580	378
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	73-87	2.9-3.9	1,520-1,610	363-385
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3	1,460-1,560	349-373
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29	670-1,990	399-476
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2-21.0	22-34	66-74	1,110-1,390	265-332

ที่มา : (อรนงค์ นัยวิกุล, 2550)

2.3.1 คาร์โบไฮเดรต

2.3.1.1 สตาร์ช เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็นเม็ดห้าเหลี่ยมขนาด 3-9 ไมโครเมตร
รวมกันอยู่เป็นกลุ่มภายในอะมิโลพลาสต์ (Amyloplast) ที่มีลักษณะกลมหรือรี โดยภายในแต่ละ
อะมิโลพลาสต์มีเม็ดสตาร์ชเกาะรวมกันอยู่ประมาณ 20-60 เม็ด สตาร์ชจากข้าวประกอบด้วยอะมิโลส
7-33 % ของน้ำหนักเมล็ดข้าวสาร หรือ 8-37% ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ส่วนที่มีมากคือ
อะมิโลเพกตินซึ่งอาจมีอยู่ในข้าวเหนียวเกือบ 100% การสกัดเม็ดสตาร์ชออกจากเมล็ดข้าวทำได้
ไม่ยาก โดยใช้วิธีบดแบบเปียกด้วยน้ำหรือน้ำค้างอ่อนเพื่อสกัดแยกส่วนโปรตีนออกและสารละลาย
ยังช่วยไม่ให้เม็ดสตาร์ชเสียหายในขณะบด แยกส่วนสตาร์ชออกจากสารละลาย ทำให้แห้งแล้วบดให้
ละเอียดก็จะได้สตาร์ชจากข้าว ความสามารถในการจับไออน์ของสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีมากกว่าสตาร์ช
ข้าวเหนียว เนื่องจากปริมาณอะมิโลสในสตาร์ชข้าวเจ้าที่มากกว่านั่นเอง ส่วนความขุ่นหนืดนั้น
สตาร์ชข้าวเหนียวมีช่วงต่างกันมากกว่าสตาร์ชข้าวเจ้าและสารอาหารอื่นที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช
ข้าวเหนียวจะน้อยกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า แสดงว่าการสกัดสตาร์ชข้าวเหนียวจะได้บริสุทธิ์กว่าสตาร์ช

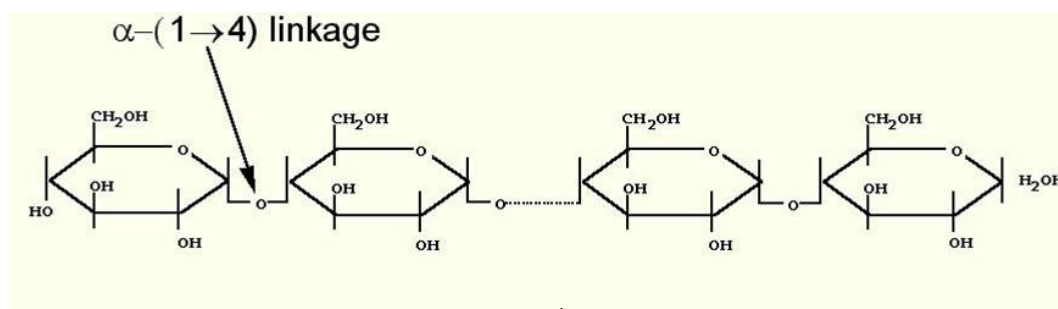
ข้าวเจ้า ลักษณะของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินนี้ส่งผลถึงการจัดแบ่งลักษณะของข้าวเมื่อนำไปขัดสีเป็นข้าวสารแล้วนำไปหุงต้มเป็นข้าวสุก (ตารางที่ 2.2) ปรากฏว่าข้าวที่มีอะมิโลสต่ำจะเป็นข้าวสุกที่เหนียวและจะร่วนขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้น

อะมิโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ชนิด α 1-4 และชนิด α 1-6 เพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 0.1 %) มีระดับของการเกิดโพลิเมอร์ไรซ์ 920-1,110 (ซึ่งแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างข้าว Indica และ Japonica) และมีจำนวนความยาวโซ่ 250-370 (Vandeputte และ Delcour, 2004) น้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 คาลตัน อะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะมิโลสจะพันเป็นเกลียวรอบสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้ อะมิโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลส

ตาราง 2.2 การจำแนกลักษณะข้าวสุกตามปริมาณอะมิโลส

ปริมาณอะมิโลส (%)	ชนิดข้าว	ลักษณะข้าวสุก
1 - 2	ข้าวเหนียว	เหนียวมาก
2 - 9	ข้าวเจ้าอะมิโลสต่ำมาก	เหนียว, นุ่ม
9 - 20	ข้าวเจ้าอะมิโลสต่ำ	เหนียว, นุ่ม
20 - 25	ข้าวเจ้าอะมิโลสปานกลาง	นุ่ม, ค่อนข้างเหนียว
25 - 33	ข้าวเจ้าอะมิโลสสูง	ร่วน, แข็ง

ที่มา : (Julino, 1985)

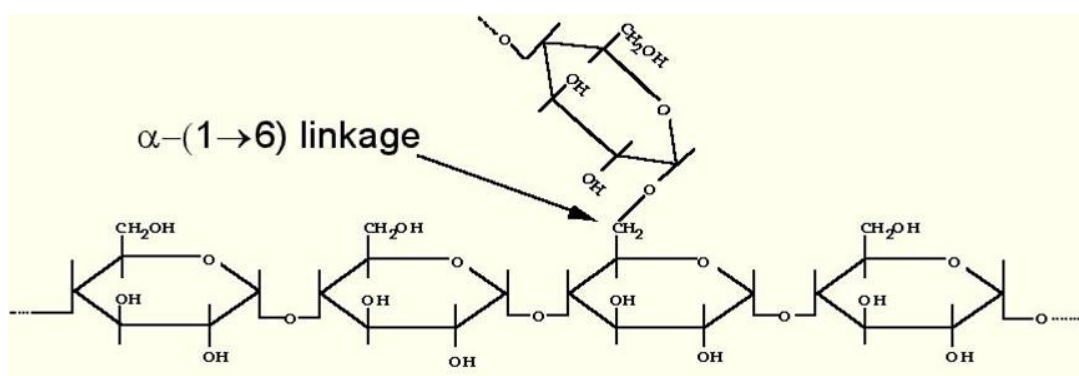


ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา : (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะอมขวัญ, 2546)

โครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิด อะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6500 ถึง 160000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6500 หรือมากกว่า 160000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะอมขวัญ, 2546)

อะมิโลเพกติน (Amylopectin) เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α 1-4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α 1-6 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะอมขวัญ, 2546)



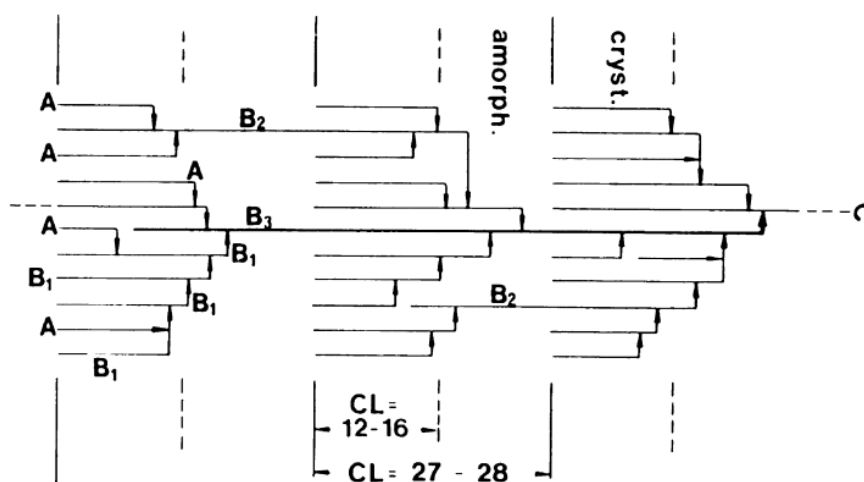
ภาพประกอบ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลเพกติน

ที่มา : (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะอมขวัญ, 2546)

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะกลูโคซิดิกชนิด α 1-6 มีอยู่ประมาณ 5-6% ของปริมาณ หน่วยกลูโคสในอะมิโลเพกตินทั้งหมด มีระดับของการเกิดโพลีเมอร์ไรซ์ 8,200-12,800 และมีความ ยาวโซ่ 19-23 ค่าเฉลี่ยของความยาวโซ่ด้านนอก (External chain lengths ; ECL) เท่ากับ 11.3-15.8 และค่าเฉลี่ยของความยาวโซ่ด้านใน (Internal chain lengths ; ICL) เท่ากับ 3.2-5.7 เมื่อเปรียบเทียบ DP_n และ CL ระหว่างข้าว Indica และ Japonica พบว่าค่า DP_n ของข้าว Indica ต่ำกว่าข้าว Japonica แต่ CL ของข้าว Indica สูงกว่าข้าว Japonica (Vandeputte และ Delcour, 2004) ขนาดโมเลกุลของ อะมิโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุล ประมาณ 1000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกตินมีโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ

1. สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจาก สายชนิดนี้ (Unbranched structure)
2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างของอะมิโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ สาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9:1
3. สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ใน อะมิโลเพกตินแต่ละ โมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น



ภาพประกอบ 2.3 ลักษณะโครงสร้างอะมิโลเพกตินที่ประกอบด้วยสาย A, B และ C
ที่มา : (Vandeputte and Delcour, 2004)

สำหรับอะมิโลเพกตินของสตาร์ทข้าวเจ้า และข้าวเหนียว สายส่วนใหญ่ประมาณ 80-90 % ประกอบด้วยกลุ่มเดี่ยวๆ และสายที่เหลืออีก 10-20% จะเป็นส่วนเชื่อมต่อของแต่ละกลุ่ม ในแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยสายประมาณ 22-25 สาย ทำให้เกิดเป็นส่วนผลึกของเม็ดแป้ง ในการจับกันเป็นกลุ่มของอะมิโลเพกตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ ซึ่งช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาด้วยกรดและเอนไซม์ (กล้านรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

สตาร์ชจากข้าวประกอบด้วยอะมิโลส 7-33 % ของน้ำหนักเมล็ดข้าวสาร หรือ 8-37 % ของปริมาณสตาร์ชทั้งหมด ส่วนที่มีมากคือ อะมิโลเพกตินซึ่งอาจมีอยู่ในข้าวเหนียวเกือบ 100% แต่การเกาะรวมกันอยู่ของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในเม็ดสตาร์ชนั้นมีลักษณะอย่างไร นักวิทยาศาสตร์ยังต้องค้นคว้าวิจัยอีกมากแต่สันนิษฐานว่าส่วนที่ให้โครงร่างและเป็นผลึก (Crystallinity) นั้นเกิดจากอะมิโลเพกติน เมื่อนำเม็ดสตาร์ชไปหารูปแบบการเลี้ยวเบนด้วย รังสีเอกซ์ (x-ray Diffraction) พบว่าเป็นแบบเอ (A- type) ทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้า มีองศาของการเกิดผลึกจากรังสีเอกซ์คล้ายคลึงกัน แต่สตาร์ชจากข้าวเจ้าจะมีเส้นที่ต่ำกว่าที่ช่วงการเลี้ยวเบนของมุม $4.37^{\circ}A$ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

2.3.1.2 พอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช พบมากในเปลือกหุ้มผลและเปลือกหุ้มเมล็ดมากกว่าในเนื้อและคัพพะ เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่วิเคราะห์ได้ในรูปเส้นใยอาหารซึ่งประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส เพกติน ลิกนินและโปรตีนที่ติดอยู่ ในปัจจุบันได้มีการวิจัยถึงประโยชน์ของเส้นใยอาหารต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะในเรื่องเกี่ยวกับโรคอ้วน โรคเบาหวาน มะเร็งลำไส้ใหญ่และเส้นเลือดอุดตัน เส้นใยอาหารจากรำข้าวประกอบด้วย ความชื้น 9%, เฮกโซเซน (ในรูปกลูโคส) 13-14%, เฮมิเซลลูโลส (ในรูปไซโลส) 36-42%, กรดยูโรนิก 8%, เซลลูโลสหายา 27-33% และลิกนิน 12-17% สำหรับเฮมิเซลลูโลสส่วนที่ละลายในน้ำเย็นของข้าวนั้นจะประกอบด้วย น้ำตาลอะราบินอส 38-42%, ไซโลส 7-14%, แมนโนส 0.1-2.0%, กาแล็กโทส 28-31%, กลูโคส 0.1-3.3%, แรมโนส 0.3%, กรดยูโรนิก 6-12% และโปรตีน 4-5% ซึ่งโปรตีนนี้วิเคราะห์ได้เป็นกรดอะมิโนที่เป็นไฮดรอกซีโปรลีน 24-29% อยู่ในลักษณะไกลโคโปรตีนที่มีแอล-อะราบินอสต่อกับไฮดรอกซิลโปรลีนด้วยพันธะโอ-ไกลโคซิด ส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ละลายในด่างจะประกอบด้วย น้ำตาลแรมโนส 1-3%, ฟิวโคส 2-5% และแมนโนสน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังพบปริมาณไฮดรอกซิลโปรลีน 0.5-0.7% ของกรดอะมิโนที่ปนมาทั้งหมด

ผนังเซลล์ที่เตรียมจากข้าวสารด้วยวิธีใช้เอนไซม์ย่อยองค์ประกอบอื่นโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส, โปรติเอส และกลูโคอะไมเลส ย่อยสตาร์ชและโปรตีนจนหมดเหลือเพียงผนังเซลล์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลส แผ่นใยของเฮมิเซลลูโลสรวมทั้งสารเพกตินและโปรตีนอีกประมาณ 3%

2.3.1.3 น้ำตาลอิสระ น้ำตาลอิสระที่พบมากในส่วนของคัพพะและเนื้อเมล็ดของข้าว คือ ซูโครส นอกจากนั้นเป็นแรฟฟิโนส กลูโคส และฟรักโตส โดยพบว่าน้ำตาลทั้งหมดในคัพพะ มีประมาณ 8-25% ในรำมีประมาณ 6.5% และในข้าวสารมีประมาณ 0.52% น้ำตาลไมรีดิคซ์ที่สำคัญ คือ ซูโครส และน้ำตาลรีดิคซ์ที่พบมากคือ กลูโคส และฟรักโตส นอกจากนี้ยังพบน้ำตาล เมลิไบโอส (Melibiose), กลูโคโค ฟรักโตส มอลโตสและน้ำตาลมอลโทโอลิโกแซ็กคาไรด์อื่น ๆ อีกในเมล็ดข้าวที่กำลังงอก

2.3.2 โปรตีน เป็นสารอาหารที่มีในข้าวมากเป็นสองรองจากคาร์โบไฮเดรต โดยคิดคำนวณจากการวิเคราะห์วิธีของเจดดาห์ (Kjeldahl) โดยการนำปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดคูณด้วยแฟกเตอร์ 5.95 เนื่องจากในองค์ประกอบของกลูเตลินซึ่งมีมากในข้าวนั้นมีไนโตรเจนอยู่ 16.8% ปริมาณกรดอะมิโนแต่ละชนิดในโปรตีนจากข้าวเปลือกไม่ต่างจากข้าวกล้องและข้าวสารมากนัก เนื่องจากในส่วนเปลือกมีโปรตีนอยู่น้อยมาก (2-3%) แต่อย่างไรก็ตามในเปลือกมีปริมาณ กรดอะมิโนไลซีนอยู่มากกว่าส่วนอื่นและในข้าวกล้องจะมีไลซีนมากกว่าในข้าวสารเล็กน้อย ซึ่งไลซีนนี้จัดว่าเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายที่มีไม่เพียงพอเป็นอันดับแรกของโปรตีนจากข้าว และธัญชาติอื่นๆ ดังนั้นจึงได้มีการทดลองวิจัยเพื่อเพิ่มปริมาณไลซีนในข้าวโดยการเพิ่มปริมาณ โปรตีนทั้งหมด ปรากฏว่าปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณไลซีนที่เพิ่มขึ้นถึง 10% โปรตีนเท่านั้น ถ้าทำให้โปรตีนในข้าวสูงกว่า 10% ปริมาณไลซีนก็จะไม่เพิ่มมากไปกว่าที่ 10% โปรตีน และปริมาณไลซีนนี้มีในรำและคัพพะมากกว่าในส่วนเนื้อเมล็ด แต่ถ้าคิดโดยปริมาณ รวมของโปรตีนทั้งหมดเราจะได้รับโปรตีนจากเนื้อเมล็ดมาก เนื่องจากสัดส่วนของเนื้อเมล็ดมีมากกว่า ส่วนอื่น และแหล่งที่มีโปรตีนมากอีกส่วนคือ ชั้นถัดจากแอลิวโรนและชั้นแอลิวโรน โดยสะสมอยู่ เป็นกลุ่มโปรตีน

ในการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยการหาค่าไนโตรเจนนั้น ส่วนหนึ่งของไนโตรเจน อาจไม่ได้เกิดจากโปรตีนเท่านั้น โดยมากจากส่วนอื่นได้แก่ กรดอะมิโนที่มีไนโตรเจนเป็นอิสระ และไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนอีกประมาณ 2-4% ของปริมาณไนโตรเจนที่วิเคราะห์ได้และพบว่ากรด อะมิโนอิสระนี้มีในข้าวกล้องประมาณ 0.69% ของโปรตีนทั้งหมด ถ้ามีการใส่ปุ๋ยยูเรียด้วยการฉีดพ่น เพื่อให้ข้าวมีโปรตีนสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณกรดอะมิโนอิสระเพิ่มขึ้นเป็น 0.76% ของโปรตีนทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบของกรดอะมิโนในโปรตีนรวมทั้งกรดอะมิโนอิสระในข้าวเจ้ากับข้าว เหนียวนั้นไม่แตกต่างกัน แสดงว่าลักษณะยีนข้าวเจ้าหรือข้าวเหนียวไม่มีผลต่อโครงสร้างของโปรตีน

2.3.3 ไขมัน ไขมันที่พบในเมล็ดข้าวมีลักษณะเป็นหยดกลมแทรกอยู่ในชั้นแอลิวโรน ขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมโครเมตร อยู่ในถัดจากชั้นแอลิวโรนมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร และอยู่ใน ส่วนคัพพะขนาดเล็กกว่า 0.7 ไมโครเมตร สำหรับในส่วนเนื้อเมล็ดจะอยู่รวมกับกลุ่มโปรตีน และใน เม็ดสตาρχก็จะมีไขมันชนิดที่มีโครงสร้างร่วมกับสารอื่น (Bound lipids) ในการสกัดไขมันออกจาก

ส่วนต่าง ๆ นั้นทำให้แบ่งลักษณะไขมันที่สกัดได้เป็น 2 ส่วน คือ ไขมันที่สกัดได้จากสตาร์ช (Starch lipids) และไขมันที่ไม่ใช่มาจากสตาร์ช (Nonstarch lipids) โดยใช้สารละลายที่ไม่มีขั้ว (Nonpolar solvents) เช่น ไดเอทิลอีเทอร์, ปีโตรเลียมอีเทอร์ และคลอโรฟอร์ม : เมทานอล (2 : 1) ในการสกัด ไขมันที่ไม่ใช่มาจากสตาร์ช ส่วนไขมันจากสตาร์ชสกัดโดยใช้สารละลาย น้ำ – บิวทานอลที่อิ่มตัว เมื่อนำไขมันที่สกัดจากส่วนต่าง ๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบและชนิดของไขมันจะเห็นว่าไขมันจะมีมากในส่วนคัพและร่ามากกว่าในส่วนแกลบและเนื้อเมล็ด ค่าซาฟอนิฟิเคชันและค่าไอโอไดนของไขมันในแกลบมีน้อยกว่าส่วนอื่น สำหรับองค์ประกอบกรดไขมันมีกรดไขมันพาล์มิติก, โอเลอิก และลิโนลิกใกล้เคียงกัน โดยในแกลบมีโอเลอิกมากที่สุด ข้าวสารมีพาล์มิติกและลิโนลิกมากที่สุด ถ้าเปรียบเทียบองค์ประกอบของไขมันจากส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ชจากไขมันจากสตาร์ชก็จะพบว่าไขมันจากสตาร์ชข้าวเจ้ามีพาล์มิติกมากกว่าไขมันที่ไม่ได้มาจากสตาร์ชแต่มีโอเลอิกน้อยกว่าในขณะที่มีลิโนลิกใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มไขมันที่เป็นกลาง ซึ่งจะพบมากที่สุดในปริมาณไขมันที่ไม่ใช่มาจากสตาร์ชทั้งหมดจากทุกส่วนที่แยกได้ โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ส่วนน้อยอยู่ในรูปกรดไขมันอิสระ แต่ไขมันจากสตาร์ชในข้าวกล้องและข้าวสารมีไขมันที่เป็นกลางเพียง 28% และ 26% ตามลำดับ และเป็น ไตรกลีเซอไรด์เพียง 4% และ 2% ตามลำดับเท่านั้น แต่มีกรดไขมันอิสระมากประมาณ 20-21%

ไกลโคลิพิดมีในไขมันที่ไม่ใช่สตาร์ชจากแกลบมากที่สุด และมีไขมันจากสตาร์ชข้าวเจ้าซึ่งเป็นข้าวกล้องและข้าวสารมากกว่าในไขมันที่ไม่ใช่สตาร์ชในส่วนเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีฟอสโฟลิพิดมากที่สุด ไขมันที่อยู่กับสตาร์ชจากข้าวกล้องของข้าวเจ้าจะมีประมาณ 0.6-0.7% และข้าวเหนียวประมาณ 0.2% ในทำนองเดียวกันปริมาณไขมันที่อยู่กับสตาร์ชจากข้าวสารเจ้าจะมีประมาณ 0.5% และข้าวเหนียวประมาณ 0.1% แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไขมันโดยรวมในข้าวเจ้าและข้าวเหนียวจะไม่ต่างกันมากนัก และลักษณะไขมันที่แทรกอยู่ในสตาร์ชอาจจะอยู่ร่วมกับส่วนอะมิโลสดังเช่นการอยู่ร่วมกันของกลีเซอรอลโมโนสเทียรีนกับอะมิโลส

2.4 ลักษณะของข้าวหอมมะลิ

ข้าวหอมมะลิหรือข้าวดอกมะลิ เป็นข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสง หมายถึง พันธุ์ข้าวจะออกดอกในวันที่กลางคืนยาวกว่ากลางวันเท่านั้น คือ ช่วงฤดูหนาวทำให้สามารถปลูกได้เฉพาะนาปีเท่านั้น ส่วนชื่อเรียกว่าข้าวหอมมะลินั้นมีที่มาจากสีของข้าวที่ขาวเหมือนดอกมะลิ แต่มีกลิ่นหอมเหมือนใบเตย ไม่ได้หมายความว่าข้าวนั้นหอมเหมือนมะลิ ลักษณะที่สำคัญของข้าวหอมมะลิ คือ เมื่อหุงหรือนึ่งสุกแล้วเมล็ดข้าวสุกจะอ่อนนุ่มมากกว่าข้าวเจ้าทั่วไป แต่ร่วนน้อยกว่าและมีกลิ่นหอม

ข้าวที่ปลูกเพื่อใช้เป็นข้าวหอมมะลิมี 2 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ กข.15 ซึ่งข้าว กข. 15 ก็คือข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่นำไปอาบรังสีแกมมาทำให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ประมาณ 4-6 % ซึ่งข้าวทั้งสองพันธุ์นี้มีลักษณะ คือ เมล็ดข้าวจะฟักตัวในเวลาประมาณ 8 สัปดาห์ เมล็ดมีเปลือกสีน้ำตาล ยาว 7.4 มม.รูปร่างเรียวยาว เมื่อข้าวสุกจะหอมนุ่ม มีอะมิโลส 14-17% ข้าวประกอบด้วยแป้ง 2 ชนิด คือ อะมิโลเพกตินและอะมิโลส ข้าวเจ้าจะมีแป้งอะมิโลสประมาณ 14-35% ข้าวเหนียวจะมีอะมิโลเพกติน เกือบทั้งหมด ทำให้เหนียวหนึบกว่าข้าวเจ้าเมื่อสุกปลูกได้ในที่นาดอนทั่วไป ทนแล้ง ดินเปรี้ยว ดินเค็ม ด้านทานไส้เดือนฝอยรากปม ไม่ต้านทานโรคไหม้ โรคขอบใบแห้ง เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล และหนอนกอ

ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2549 – 2553) ความต้องการใช้ภายในประเทศเพื่อการบริโภค ทำเมล็ดพันธุ์ อาหารสัตว์ และอุตสาหกรรมแปรรูปอื่นๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 15.91 ล้านตันข้าวเปลือก ในปี 2549 เป็น 18.36 ล้านตันข้าวเปลือก ในปี 2553 หรือเพิ่มขึ้น 3.41% ต่อปี เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรในประเทศ จำนวนสัตว์ และผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอาหารอื่นๆ ในปี 2553 จะมีการใช้ในประเทศประมาณ 18.36 ล้านตันข้าวเปลือก เพิ่มขึ้นจาก 17.07 ล้านตันข้าวเปลือก ในปี 2552 หรือเพิ่มขึ้น 7.57%

การส่งออกในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ปี 2549 – 2553) ปริมาณและมูลค่าการส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 7.49 ล้านตันข้าวสาร มูลค่า 98,179 ล้านบาท (2,602 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ) ในปี 2549 เป็น 8.50 ล้านตันข้าวสาร มูลค่า 159,543 ล้านบาท (5,066 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ) ในปี 2553 หรือเพิ่มขึ้น 1.89% และ 14.33% ต่อปี ตามลำดับ โดยในปี 2553 คาดว่าจะส่งออกได้ประมาณ 8.50 ล้านตันข้าวสาร มูลค่า 159,543 ล้านบาท ลดลงจาก 8.62 ล้านตันข้าวสาร มูลค่า 172,208 ล้านบาท ในปี 2552 คิดเป็น 1.39% และ 7.35% ตามลำดับ ปริมาณลดลงเนื่องจากประเทศ ผู้นำเข้าข้าวคุณภาพดีและคุณภาพต่ำจากไทยหันไปซื้อข้าวจากเวียดนาม เมียนมาร์ และกัมพูชา ซึ่งมีราคาถูกโดยเฉพาะ เวียดนามมีการลดค่าเงินดองและลดราคาข้าวถึง 2 ครั้ง รวมทั้งหลังเกิดวิกฤตทางด้านอาหารในช่วงปี 2550 - 2551 มีกำไรเพิ่มผลผลิตข้าวในประเทศมากขึ้น ส่วนมูลค่าลดลงเนื่องจาก ไตรมาสสุดท้ายได้รับผลกระทบจากการแข็งค่าของเงินบาท

2.5 การหุงข้าว

จากการสำรวจวิธีการหุงข้าวของผู้บริโภคในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกสามารถแบ่งวิธีการหุงข้าวได้ 7 วิธี (Julino, 1985) คือ

2.5.1 การหุงข้าวในเตาอบ (Oven cooking) ทำได้โดยการเติมน้ำเดือดประมาณ 220-260 มล. ลงในข้าวสาร 100 กรัม ในถ้วยแก้วทนไฟที่ใช้ในเตาอบได้โดยมีฝาปิด หุงต้มในเตาอบ 176°C 28 นาทีแล้วเปิดฝาทิ้งไว้ 5 นาที (ถ้าเป็นข้าวหนึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 33 นาที)

2.5.2 การหุงข้าวด้วยปริมาณน้ำน้อย (Small amount of water) ต้มน้ำในถ้วยแก้วทนไฟ มีฝาปิดจำนวน 200 มล. จนเดือดเติมน้ำ 100 กรัม ต้มเดือด 2 นาที แล้วลดไฟแบบอ่อนอีก 18 นาที โดยมีแผ่นกั้นความร้อนรองและปิดฝา บางประเทศใส่ข้าวขณะที่น้ำเย็นแทนใส่ข้าวขณะน้ำเดือดและบางประเทศแช่ข้าวสารก่อนต้ม เช่น ข้าวเหนียวนิยมนำแช่ก่อนเสมอ ถ้าเป็นข้าวหนึ่งต้องใช้เวลาในการอุ่น 23 นาที และอาจต้องเติมน้ำมากขึ้น วิธีที่นิยมที่สุดในปัจจุบันคือ การใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่ต้งไฟได้อัตโนมัติ เรียกว่าหุงข้าวแบบไม่เช็ดน้ำ

2.5.3 การหุงข้าวด้วยปริมาณน้ำปานกลาง (Medium amount of water) ใช้กระทะหรือหม้ออะลูมิเนียมที่มีฝาปิดใส่น้ำ 400 มล. ต้มจนเดือดแล้วเติมน้ำข้าวสาร 100 กรัม ต้มเดือด 2 นาที ลดไฟแบบอ่อน 13-18 นาที โดยมีฝาปิด เทน้ำออกเมื่อจะบริโภคหรือบางประเทศใส่ข้าวขณะที่น้ำเย็นแล้ว ต้มข้าวจนสุกเทน้ำที่เหลือออกแล้วดองแบบปิดฝาด้วยความร้อนที่ 176°C เป็นเวลา 5 นาที ให้อุ่นน้ำระเหยจนข้าวแห้ง ถ้าเป็นข้าวหนึ่งต้องใช้เวลาอุ่น 23 นาที วิธีนี้เรียกว่าการหุงข้าวแบบเช็ดน้ำ

2.5.4 การหุงข้าวด้วยปริมาณน้ำมาก (Large amount of water) ใช้กระทะหรือหม้ออะลูมิเนียมที่มีฝาปิดเติมน้ำ 800 มล. ต้มให้เดือด ใส่ข้าวสาร 100 กรัม ต้มเดือด 12 หรือ 20 นาทีโดยเปิดฝา เทน้ำที่เหลือออกก่อนนำไปรับประทาน บางประเทศหุงต้มแบบปิดฝา บางประเทศใส่ข้าวขณะที่น้ำเย็นแทนใส่ข้าวขณะน้ำเดือด เมื่อเทน้ำออกแล้วจะอุ่นให้อุ่นน้ำระเหยทำให้ข้าวแห้ง (176°C, 5 นาที) ถ้าเป็นข้าวหนึ่งใช้เวลาต้ม 25 นาที เรียกวิธีนี้ว่าการหุงข้าวแบบเช็ดน้ำ

2.5.5 การนึ่ง (Steaming) นึ่งข้าว 100 กรัม ในหม้อ 2 ชั้น โดยหม้อที่ใส่ข้าวมีรูด้านล่างซึ่งจุ่มลงหม้อน้ำเดือด (100 มล.) เป็นเวลา 10 นาที และยกหม้อนึ่งขึ้นเหนือหม้อที่ใส่น้ำเดือดต่อไป 30-45 นาที บางประเทศจะต้มข้าวกับน้ำ (อัตราส่วนข้าว : น้ำ เท่ากับ 1:1.5) จนข้าวอุ้มน้ำหมดใช้เวลาประมาณ 5 นาทีแล้วจึงนึ่งด้วยไอน้ำอีก 30 นาที

2.5.6 การนึ่งแบบเติมน้ำมัน (Steaming with oil added) ต้มน้ำ 800 มล. ในกระทะหรือหม้ออะลูมิเนียมจนเดือด ใส่ข้าวสาร 100 กรัม ต้มเดือด 5 หรือ 15 นาทีโดยเปิดฝา เทน้ำที่เหลือออก เทข้าวที่สะเด็ดน้ำลงในหม้อนึ่งซึ่งเป็นหม้อ 2 ชั้น ชั้นในใส่ข้าวที่สะเด็ดน้ำแล้วเติมน้ำมัน 1 ช้อนโต๊ะ (4.9 มล.) และน้ำมันร้อน 60 มล. นึ่งในน้ำเดือดในอยู่หม้ออีกชั้น 15 นาที

2.5.7 การหุงข้าวในน้ำเติมน้ำมัน (Cooking in water with oil added) ต้มข้าวสาร 100 กรัม ผสมน้ำมันเมล็ดฝ้าย 1 ช้อนโต๊ะ (14.9 มล.) ในกระทะหรือหม้ออะลูมิเนียม 2-5 นาที แล้วเติมน้ำ 200 หรือ 250 มล. ลงในหม้อแล้วอุ่น 20, 25 หรือ 28 นาที โดยวางหม้อข้าวบนแผ่นกั้นความร้อน

ด้านล่างอีก 15 นาที บางประเทศเติมน้ำมันลงในน้ำ 250 มล. ต้มน้ำเดือด จึงใส่ข้าวสารแล้วอุ่นในหม้อ ปิดฝา 30 นาที

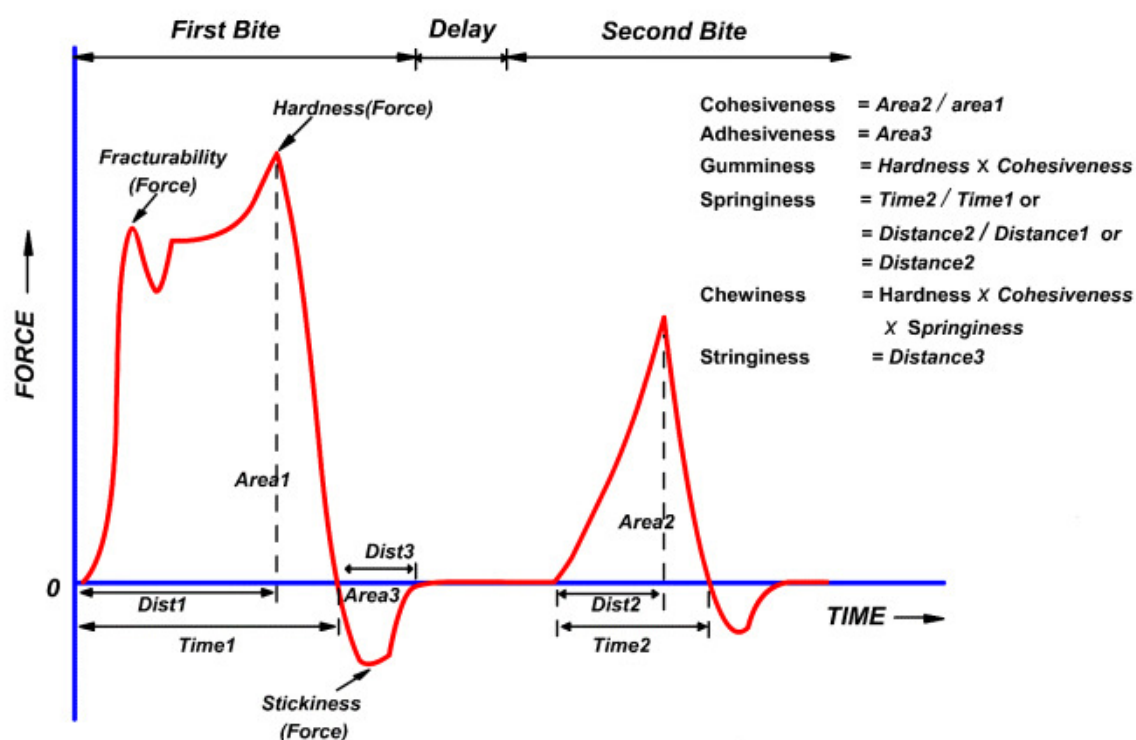
สำหรับการหุงต้มข้าวเมล็ดยาวของไทย เพื่อให้ได้คุณภาพดีที่สุดตามสภาพข้าว เช่น ข้าวที่มีอะมิโลสสูงซึ่งเป็นข้าวชนิดร่วนแข็ง นิยมใส่น้ำมากกว่าข้าวอะมิโลสต่ำซึ่งในระหว่างการหุงต้มเมล็ดข้าวจะดูดน้ำไว้ เมื่อเมล็ดสุกแล้วแต่มียังมีน้ำเหลืออยู่ต้องหุงต้มไปอีกสักครู่จะช่วยให้เมล็ดข้าวดูดน้ำเพิ่มขึ้นและช่วยลดความแข็งกระด้างของข้าวสุกลงได้ ในทางตรงกันข้ามการหุงต้มข้าวอะมิโลสต่ำต้องระมัดระวังปริมาณน้ำหุงต้มเพราะหากน้ำมากเกินไปเมล็ดข้าวสุกจะแฉะและ

2.6 การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยเครื่องมือ

การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกโดยการทดสอบทางประสาทสัมผัสและโดยการวัดด้วยเครื่องวัดมีบทบาทสำคัญมากขึ้น เนื่องจากมีผู้บริโภคมากขึ้นและผู้บริโภคแต่ละกลุ่มแต่ละประเทศมีความนิยมลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกแตกต่างกัน ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกนี้เป็นผลมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ พันธุ์ข้าว คุณสมบัติทางเคมีและเคมีเชิงฟิสิกส์ การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว (เช่น ระดับการสีข้าว สภาพการทำให้แห้งและความชื้นสุดท้ายของข้าว) และวิธีการหุงต้ม ดังนั้นจึงมีกลุ่มนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามทดลองเปรียบเทียบผลการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสข้าวหุงสุกและหาความสัมพันธ์เพื่อให้สามารถคาดคะเนลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกได้เร็วขึ้นและถูกต้องตามความต้องการของผู้บริโภคและการแปรรูปได้ดีขึ้น

ในปัจจุบันมีเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัสเพื่อใช้ประเมินและเปรียบเทียบกับผลทางประสาทสัมผัสหลายชนิด และลักษณะของเนื้อสัมผัสที่วัดได้จากเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการวัดเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกมีคำจำกัดความดังแสดงในตารางที่ 2.3 และเมื่อเปรียบเทียบค่าวัดทางลักษณะจากผู้ชิมกับเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสได้ผลดังตารางที่ 2.4

คุณลักษณะของเนื้อสัมผัสข้าวหุงสุกเหล่านี้ วัดได้โดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสชนิดต่าง ๆ เช่น เทกซ์เจอร์โรมิเตอร์ (Texturometer), เครื่องวัดยูนิเวอร์แซลเทสติง (Universal Testing Machine), เครื่อง ยูนิเวอร์แซล เทกซ์เจอร์แอนาไลเซอร์ (Universal Texture Analyzer), เครื่องเชียร์เพรส (Shear Press), เครื่องแพบส์เทกซ์เจอร์เทสเตอร์ (Pabst Texture tester) เป็นต้น เครื่องเหล่านี้ไม่จำเป็นต้องวัดลักษณะเนื้อสัมผัสทั้งหมด ทำการวัดเพียงบางลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับความต้องการของผู้บริโภคในแต่ละกลุ่มเท่านั้น สำหรับพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์โดยวัดลักษณะตามความต้องการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ค่าวัดในลักษณะปริมาณที่เปรียบเทียบได้



ภาพประกอบ 2.4 กราฟ Texture Profile Analysis

ตาราง 2.3 ค่าวัดลักษณะเนื้อสัมผัสจากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

ค่าวัด	ผลจากเครื่อง
ความกระด้าง	ความสูงของพีคจากเส้นโค้งแรก
ความยืดหยุ่น	อัตราส่วนของเส้นทางระหว่างเส้นทางการกดของหวัคคเส้นโค้งที่สองและหนึ่ง
ความเกาะติดกัน	อัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างเส้นโค้งที่สองกับเส้นโค้งแรก
ความเหนียวติดกัน	แรงค่าลบที่เกิดจากแรงดึงขึ้นของหวัคคขึ้นจากตัวอย่าง
ความเหนียวยึดติด	ผลจากการคูณค่าความกระด้างกับความเกาะติด
การเคี้ยว	ผลจากการคูณค่าความเหนียวยึดติดกับความยืดหยุ่น

ที่มา : (Lyon *et al.*, 2000)

ตาราง 2.4 คำจำกัดความของเนื้อสัมผัสข้าวหุงสุกจากการทดลองชิม

คำจำกัดความ	ความหมาย
ความแข็งหรือกระด้าง (Hardness)	ปริมาณแรงที่ต้องใช้กดข้าวสุกลงไประหว่างฟันที่เคี้ยวครั้งแรกมีผลออกมาเป็นความนุ่ม(ความแน่นแข็งต่ำ), ความแน่นแข็งปานกลาง และความแน่นแข็งสูง ในทำนองเดียวกับความแข็งและความกระด้างของข้าวหุงสุก
ความเหนียวติดกัน (Adhesiveness)	ปริมาณแรงที่ต้องใช้แยกข้าวหุงสุกที่เหนียวติดปาก(ขณะที่รับประทาน), ติดกันเองและติดภาชนะ มีผลการวัดจากความร่วน(ความเหนียวติดกันต่ำ) จนถึงเหนียวติดกันสูง
ความยืดหยุ่น (Springiness)	ลักษณะข้าวหุงสุกที่ถูกฟันกดทับระหว่างฟันแล้วยืดหยุ่นกลับคืน มีผลการวัดจากความยืดหยุ่นต่ำ (เหนียวหนืดไหลได้) จนถึงความยืดหยุ่นสูง (เป็นยางยืดหยุ่น)
ความเกาะติดกัน (Cohesiveness)	ปริมาณแรงภายในที่ทำให้ข้าวหุงสุกเกาะติดกันก่อนที่จะถูกตัดขาดจากกันด้วยการกดและกีดของฟัน ระหว่างฟันบนและฟันล่างมีผลการวัดจากลักษณะและเนื้อ(ความเกาะติดกันต่ำ) นุ่ม(ความเกาะติดกันปานกลาง) เหนียวคล้ายหนัง(ความเกาะติดกันสูง)
การเคี้ยว (Chewiness)	ระยะเวลา(เป็นวินาที) ที่ต้องการในการเคี้ยวข้าวหุงสุกในอัตราที่ใช้แรงคงที่ลงไปบดข้าวสุกอย่างสม่ำเสมอจนละเอียดพอที่จะกลืนลงคอได้
ความสามารถในการทำ แตกหัก (Fracturability)	แรงในการกดข้าวหุงสุกให้ขาด มีผลการวัดจากข้าวแข็งมากจนถึงข้าวเกาะกันมาก
ความเหนียวติดยืด (Gumminess)	ความเหนียวยืดติดจากการเคี้ยวโดยใช้พลังงานในการย่อยข้าวหุงสุกจนละเอียดถึงขั้นที่จะกลืนลงคอได้ มีความหมายตรงข้ามกับคำว่าความแข็ง และความเกาะติดกัน มีผลการวัดเป็นความร่วนไปจนถึงความเหนียวติดยืดสูง

ที่มา : (Kohlwey, 1994)

2.7 ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง คือ การย่อยได้ของแป้งโดยเอนไซม์อะไมเลส ที่ลำไส้เล็กในร่างกาย ถ้าการย่อยเกิดขึ้นช้าจะทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือด

ให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่าการย่อยอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าดัชนีไกลซีมิก เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของแป้งที่ย่อยได้ทั้งหมดกับเวลา ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของการย่อยแป้งได้ และสามารถทราบค่าดัชนีการย่อย (Hydrolysis index ; HI) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟนั้น จากนั้นนำค่าดัชนีการย่อยที่ได้ไปคำนวณหาดัชนีไกลซีมิก โดยใช้การคำนวณจากสมการเมื่อพิจารณาแป้งตามความสามารถในการถูกย่อยสลายสามารถแบ่งประเภทของแป้งในอาหารได้ดังตารางที่ 2.5

ดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index ; GI) คือ ดัชนีที่ใช้ในการประเมินระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดหลังจากการบริโภคอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง จะทำให้มีการเพิ่มระดับน้ำตาลในเลือดอย่างรวดเร็ว อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำจะทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นช้าๆ

การจัดระดับของดัชนีไกลซีมิกของอาหาร

- 2.7.1 อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำ (Low glycemic index ; $GI \leq 55$) เช่น ผักเกือบทุกชนิด ผลไม้บางชนิดที่ไม่หวานมาก ผลิตภัณฑ์นม โยเกิร์ตธรรมชาติ ถั่ว ธัญพืช ข้าวโอ๊ต
- 2.7.2 อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกปานกลาง (Medium glycemic index ; GI อยู่ในช่วง 56 - 69) เช่น ขนมปังโฮลวีท มันฝรั่ง
- 2.7.3 อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกสูง (High glycemic index ; $GI \geq 70$) เช่น ขนมปังขาว น้ำตาลทราย ผลิตภัณฑ์พวกคอร์นเฟลก และน้ำอัดลม

การตอบสนองของกลูโคสในเลือดโดยทั่วไปประมาณค่าโดยใช้ดัชนีไกลซีมิก โดยเปรียบเทียบกับอาหารมาตรฐาน คือขนมปังขาวหรือน้ำตาลกลูโคสกำหนดให้มีค่าดัชนีไกลซีมิกเท่ากับ 100 ถ้าตัวอย่างอาหารที่ศึกษามีดัชนีไกลซีมิกเป็น 50 กล่าวได้ว่ามีความสามารถในการเพิ่มระดับกลูโคสในเลือดเป็นครึ่งหนึ่งของอาหารมาตรฐาน อาหารที่มีค่าดัชนีไกลซีมิกต่ำมีความสำคัญในแง่ของการเป็นอาหารเพื่อสุขภาพเหมาะสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานและผู้ที่มิภาวะน้ำหนักเกิน อาหารที่มีดัชนีไกลซีมิกและ ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งต่ำจะช่วยลดปริมาณความต้องการอินซูลินในร่างกาย ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดให้คงที่ทำให้ไม่หิวบ่อยและควบคุมอาหารได้ (Jaisut *et al.*, 2008)

ตาราง 2.5 ประเภทของแป้งในอาหารเมื่อพิจารณาตามความสามารถในการถูกย่อยสลายได้

ประเภทแป้ง	แหล่งของแป้ง	การย่อยสลายในลำไส้เล็ก
แป้งที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (Rapidly digestible starch)	อาหารที่มีส่วนผสมของแป้ง เมื่อผ่านการหุงใหม่ๆ	สามารถถูกย่อยสลายได้ อย่างรวดเร็ว ไปเป็นน้ำตาล กลูโคสภายในเวลา 20 นาที
แป้งที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้าๆ (Slowly digestible starch)	แป้งจากธัญชาติดิบ ผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุกแล้ว	สามารถถูกย่อยสลายได้ช้าๆ แต่ก็ยังถูกย่อยไปเป็นน้ำตาล กลูโคสได้อย่างสมบูรณ์ใช้ เวลาตั้งแต่ 20-110 นาที
แป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ (Enzyme-resistant starch)	เมล็ดธัญพืชที่ถูกลบค หรือแป้งที่เกิดการคืนตัว	ทนทานต่อการย่อยสลาย ด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก

ที่มา : (เกื้อกูล ปิยะอมขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด, 2001)

การย่อยได้ของแป้งมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแป้งที่เป็นองค์ประกอบและได้รับความสนใจมากขึ้นเกี่ยวกับโรคเบาหวานประเภทที่ 2 มีการศึกษาถึงการประเมินของระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดหลังจากที่ได้รับเข้าไปซึ่งมีแหล่งของพืชที่แตกต่างกันในเรื่องของคาร์โบไฮเดรต ดัชนีไกลซีมิกได้มาจากการผลิตน้ำตาลกลูโคสในเลือดหลังจากการกินอาหารเข้าไปโดยสอดคล้องกับการผลิตคาร์โบไฮเดรตของอาหารอ้างอิงหลังจากที่ได้รับเข้าไป การตอบของสนองไกลซีมิกต่ำจะเป็นประโยชน์เกี่ยวกับโภชนาการ โดยเฉพาะคนที่ เป็นโรคเกี่ยวกับการทนกลูโคสไม่ได้ นักโภชนาการได้แนะนำให้กินถั่วเนื่องจากมีระดับคาร์โบไฮเดรตต่ำและอัตราของกระบวนการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ต่ำ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการแสดงถึงผลของอาหารที่มีดัชนีไกลซีมิกต่ำ คาร์โบไฮเดรตสูง ต่อการหลังอินซูลินซึ่งบี-เซลล์มีหน้าที่ช่วยส่งเสริม ปริมาณที่แตกต่างกันของคาร์โบไฮเดรตที่ได้รับเข้าไปในร่างกายจากแหล่งเดียวกัน ดูเหมือนว่าดัชนีไกลซีมิกจะไม่ได้รับอิทธิพลดังเช่นในกรณีของข้าวขาวหนึ่ง นอกจากดัชนีไกลซีมิก ปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยแล้ว ยังมีการวัดลักษณะเฉพาะของการย่อยได้ของแป้ง แป้งที่ทนทานต่อการย่อยจะเกิดกระบวนการหมักในลำไส้ใหญ่ซึ่งคล้ายกับคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ช สามารถป้องกันโรค เช่น มะเร็งลำไส้ใหญ่ลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือดและลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจ

ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งที่สำคัญคือปริมาณอะมิโลส โดยข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ จะย่อยได้เร็วกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง ส่งผลต่อค่าดัชนีไกลซีมิกคือ

ข้าวที่ย่อยได้เร็วจะมีค่าดัชนีไกลซิมิกสูงกว่าข้าวที่ย่อยได้ช้า ทำให้การเปลี่ยนแปลงน้ำตาลในเลือดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสูงมาก แต่ข้าวที่มีค่าดัชนีไกลซิมิกต่ำ จะมีการปลดปล่อยน้ำตาลเข้าสู่กระแสเลือดอย่างช้าๆและสม่ำเสมอ ทำให้ร่างกายสามารถควบคุมปริมาณน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในระดับปกติได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยอื่นด้วยที่มีผลต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง ได้แก่ สภาพการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ข้าวเกิดการกินตัว ทำให้กระบวนการย่อยแป้งเกิดช้า และค่าดัชนีไกลซิมิกลดลง โครงสร้างโดยละเอียดของอะมิโลเพกติน พบว่าข้าวที่มีส่วนของอะมิโลเพกตินสายยาว อะมิโลเพกตินขนาดกลางสูง และมีส่วนของอะมิโลเพกตินสายสั้นต่ำ จะทำให้ปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (Rapidly digestible starch, RDS) ลดลง และปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (Slowly digestible starch, SDS) เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ค่าดัชนีไกลซิมิกต่ำ และคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์จะมีผลต่อการทำนายดัชนี ไกลซิมิก โดยข้าวที่ใช้อุณหภูมิในการเกิดเจลในเซชันและใช้เวลาในการหุงต้มสูง และวัดค่า Amylograph viscosity และเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของข้าวที่ขยายตัว จะส่งผลให้ค่าดัชนีไกลซิมิกของข้าวต่ำ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับกระบวนการเผาผลาญน้ำตาลในเลือดของคนที่เป็นโรคเบาหวานได้

Frei และคณะ (2003) ศึกษาการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซิมิกของข้าวที่มีปริมาณอะมิโลส แตกต่างกัน 6 สายพันธุ์ จากประเทศฟิลิปปินส์ ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ การทดลองแรก วิเคราะห์ข้าวที่หุงสุกใหม่ทันทีหลังการหุงต้ม เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของการกินตัว การทดลองชุดที่สอง นำข้าวสุกไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำให้ข้าวเกิดการกินตัว จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้วิธีการย่อยด้วยเอนไซม์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการประเมินค่าดัชนีไกลซิมิกแตกต่างกันในระหว่างข้าวแต่ละสายพันธุ์ ค่าดัชนีไกลซิมิกของข้าวหุงสุกที่ได้อยู่ในช่วงระหว่าง 68-109 และข้าวที่มีการกินตัวอยู่ในช่วงระหว่าง 64-87 โดยสายพันธุ์ข้าวเหนียวมีแนวโน้มในการย่อยแป้งเร็วกว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีอะมิโลสสูง ซึ่งการเก็บข้าวไว้ในตู้เย็นทำให้ค่าดัชนีไกลซิมิกลดลงในทุกสายพันธุ์ สำหรับสายพันธุ์ข้าวเหนียวการย่อยแป้งลดลงสูงที่สุดหลังจากเก็บไว้ในตู้เย็น

ตาราง 2.6 แบบจำลองดัชนีการย่อยและการประเมินดัชนีไกลซิมิกของตัวอย่างข้าวที่หุงสุกแล้ว
วิเคราะห์ทันทีและข้าวที่มีการคืนตัว

สายพันธุ์	อะไมโลส (%DM)	สิ่งทดลอง	C_{∞}	k	ดัชนีการย่อย	ดัชนีไกลซิมิก
Milagrosa	26.9	Cooked	44.3±6.0	0.022	51.4±6.7ef	68.0±3.7ef
		Retrograded	39.8±3.4	0.021	45.3±4.1f	65.0±2.2f
Manumbacay	26.9	Cooked	66.6±4.1	0.028	86.8±4.9cd	87.3±2.7cd
		Retrograded	50.9±5.0	0.035	62.9±6.5e	74.2±3.6e
Kutsiyam	18.7	Cooked	41.5±2.7	0.031	52.4±5.9ef	68.5±3.2ef
		Retrograded	38.0±4.7	0.023	43.5±2.7f	63.6±1.5f
Kinaures	9.8	Cooked	73.4±6.4	0.080	104.2±4.5b	96.9±2.5b
		Retrograded	68.3±2.4	0.030	85.6±6.4cd	86.7±3.5cd
Bagoean	0	Cooked	68.0±6.4	0.062	95.8±8.8bc	92.3±4.8bc
		Retrograded	35.0±1.5	0.043	47.3±2.3f	65.7±1.2f
Karaya	0	Cooked	85.4±0.7	0.129	126.6±1.6a	109.2±0.9a
		Retrograded	53.5±7.1	0.112	78.2±8.7d	82.6±4.7d

ที่มา : (Frei *et al.*, 2003)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลของการแปรรูปต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและต่อดัชนีไกลซีมิก ในอาหาร Jaisut และคณะ (2008) ศึกษาผลของการทำแห้งด้วยวิธี High-temperature fluidized bed drying ต่อการลดอัตราการย่อยแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องคอกมะลิ 105 โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ อุณหภูมิในการทำแห้งและระยะเวลาในการอบ พบว่าอุณหภูมิในการอบแห้งมีอิทธิพลต่อ ดัชนีไกลซีมิกและการย่อยได้ของแป้งมากกว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบข้าวเปลือก การอบแห้งข้าว ด้วยวิธี High-temperature fluidized bed drying นั้นสามารถทำให้ดัชนีไกลซีมิกลดลงจากระดับสูง คือ 70.3 มาอยู่ที่ระดับต่ำ – ปานกลาง คือ 59 – 64 ซึ่งสภาวะที่ดีที่สุดในการอบแห้งข้าวคือ อุณหภูมิ 150°c เป็นเวลา 120 นาที เนื่องจากเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมันของแป้งข้าว เมื่อให้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงทำให้น้ำระเหยออกเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความแข็งแรง มากขึ้น เป็นผลให้อนุหุ้ย่อยแป้งได้ยากทำให้ข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีดัชนีการย่อย และดัชนีไกลซีมิกต่ำ และเมื่อนำมาสีจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ดมากขึ้น

Rendon-Villalobos และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมไฮโดรคอลลอยด์ ได้แก่ TC-20, TC-1 และ WHIP ต่อปริมาณ Resistant starch และการย่อยของแป้งในทอรัทิลลา พบว่าทอรัทิลที่ไม่ได้เติมไฮโดรคอลลอยด์มีปริมาณ Resistant starch เพิ่มขึ้น 50% หลังจากเก็บไว้เป็นเวลา 7 วัน เพราะแป้งทอรัทิลลาเกิดการคืนตัว แต่การเติมไฮโดรคอลลอยด์จะช่วยเสริมคุณลักษณะ ของผลิตภัณฑ์ด้านเนื้อสัมผัสแต่จะทำให้ปริมาณ Resistant starch ลดลง เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ ไปด้านการเกิดอันตรกิริยาของสารละลายแป้งในขณะการเกิดเจล อีกทั้งยังมีอัตราการย่อยที่ช้า โดยเฉพาะตัวอย่างที่เก็บไว้เป็นเวลา 14 วัน และทอรัทิลลาที่มีการเติม TC1 มีเปอร์เซ็นต์การย่อยต่ำ ที่สุดเพราะไฮโดรคอลลอยด์ชนิดนี้มีส่วนผสมของเซลลูโลสที่เอนไซม์ในร่างกายไม่สามารถย่อยได้ จากการศึกษาี้แสดงว่าไฮโดรคอลลอยด์จะไปลดการเกิด Resistant starch ในทอรัทิลลา การเติม ไฮโดรคอลลอยด์ในทอรัทิลลาจะให้เนื้อสัมผัสที่นุ่มในขณะการเก็บรักษาได้ แต่จะไปลด Resistant starch และคุณประโยชน์บางอย่างต่อผู้บริโภค อย่างไรก็ตามทอรัทิลลาที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ จะมีอัตราการย่อยที่ช้าซึ่งจะทำให้กลูโคสเข้าสู่กระแสเลือดได้ช้าและสามารถเพิ่มระยะเวลา ระหว่างมื้ออาหารได้ด้วย

Han และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาผลของวิธีการหุงสุกด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่การหุง ด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เตาอบไมโครเวฟ หม้อนึ่งความดันสูง (Autoclave) และ Stone pot ต่อปริมาณ Resistant starch และดัชนีการย่อยในข้าว (*Oryza sativa*) และถั่วเหลือง [*Glycine max* (L.) Merr.] พบว่าวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อการย่อยแป้ง กระบวนการหุงสุกทุกวิธีเหนี่ยวนำให้ ตัวอย่างมีปริมาณ Resistant starch ลดลง เนื่องจากในกระบวนการหุงสุกมีการให้ความร้อนเหนี่ยวนำ

ให้แป้งส่วนที่ย่อยได้ยากให้สามารถย่อยได้ อีกทั้งความร้อนทำให้ชั้นผนังเซลล์ของไฟเบอร์เกิดการละลายเป็นผลทำให้การย่อยแป้งสูงขึ้น ในข้าวและถั่วเหลืองที่หุงด้วย Stone pot มีปริมาณ Resistant starch สูงที่สุดคือ 1.2 และ 3.8% ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการหุงสุกที่แตกต่างกัน ทำให้การถ่ายโอนความร้อนต่างกัน ความร้อนที่มีสำหรับการหุงด้วย Stone pot นั้นไม่เพียงพอต่อการทำลายแป้งส่วนที่ย่อยได้ยาก

Sanchez-Pardo และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของวิธีการอบขนมเค้กด้วยไมโครเวฟ เตาอบธรรมดา และระยะเวลาในการเก็บต่อความสามารถในการย่อยแป้ง Resistant starch การกินตัวของแป้งและดัชนีไกลซีมิก โดยในการทดลองใช้ขนมปังขาวเป็นตัวอย่างอ้างอิง หลังจากเวลาผ่านไป 180 นาทีขนมปังขาวมีการย่อยถึง 55% จากตัวอย่างทั้งสองระหว่างขนมเค้กสดที่อบด้วยไมโครเวฟมีการย่อยช้ากว่าขนมเค้กสดที่อบด้วยวิธีดั้งเดิม การที่ผลิตภัณฑ์ที่อบด้วยไมโครเวฟมี ดัชนีการย่อยต่ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณ Resistant starch ที่สูง ขนมเค้กที่อบด้วยวิธีดั้งเดิมนั้นมี ดัชนีการย่อยสูงแต่เมื่อเก็บไว้เป็นระยะเวลา 8 วัน พบว่ามีดัชนีการย่อยลดลงเนื่องจากแป้งเมื่อได้รับความร้อนเกิดเจลาติไนซ์ เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นสายโซ่เกลียวคู่ของอะมิโลสมาจับตัวกันอีกครั้งหนึ่งเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ หรือแป้งเกิดการคืนตัว ค่าดัชนีการย่อยนี้มีค่าสอดคล้องกับดัชนีไกลซีมิก การอบขนมเค้กด้วยไมโครเวฟแทนการอบแบบดั้งเดิมจะทำให้ขนมเค้กมีดัชนีไกลซีมิกลดลงจากเดิมมีค่า 77.92 จัดอยู่ในกลุ่มดัชนีไกลซีมิกสูงมาเป็น 59.13 จัดอยู่ในกลุ่มไกลซีมิกต่ำ-ปานกลาง เพราะแป้งเกิดเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์เอนไซม์ย่อยแป้งได้ยาก

Mahadevammn และ Tharanathan (2007) ได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณอะมิโลส Resistant starch และการย่อยแป้ง ในข้าว (*Oryza sativa*) ซึ่งมีข้าวที่ผ่านกระบวนการแปรรูปทั้ง 7 วิธี ได้แก่ Parboiled rice Vermicelli Expanded rice Puffed rice Parched rice Rice flake-thick และ Rice flake-thin พบว่าข้าวที่ผ่านการแปรรูปมี resistant starch จากเดิม 0.2% เพิ่มขึ้นในช่วง 1.8-2.6% โดยใน Parched rice จะมีปริมาณ Resistant starch สูงที่สุด การที่ Resistant starch เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนเกิดเจลาติไนซ์แล้วถูกทำให้เย็นตัวลงโมเลกุลของอะมิโลสเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้เป็นผลึกที่แข็งแรงและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ เมื่อพิจารณาที่ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง พบว่า Vermicelli มีการย่อยต่ำที่สุด เนื่องจากในการทำผลิตภัณฑ์เส้นนั้นต้องการแป้งที่มีอะมิโลสสูงเมื่อผ่านการเจลาติไนซ์แล้วแป้งเกิดการคืนตัวซึ่งเป็นลักษณะที่ต้องการเพราะสามารถขึ้นรูปเป็นเส้นได้ดี จึงทำให้ Vermicelli มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวที่ผ่านการแปรรูปมีปริมาณของเม็ดแป้งที่เสียหายเพิ่มขึ้นและในตัวอย่าง Expanded rice มีปริมาณเม็ดแป้งที่เสียหายสูงที่สุดเป็นผลให้การย่อยได้ของแป้งสูงด้วย เพราะเป็นกระบวนการแปรรูปที่ใช้อุณหภูมิสูงถึง 280 °C ทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งถูกทำลาย

Hu และคณะ (2004) ศึกษาการย่อยได้ของแป้งและประเมิณค่าระดับไกลซิมิกของข้าว 3 ชนิด ได้แก่ อินดิกา จาปอนิกา และข้าวลูกผสม ซึ่งข้าวแต่ละชนิดจะมีปริมาณอะมิโลสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ปริมาณอะมิโลสสูง ปานกลาง ต่ำ และต่ำมาก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ กลุ่มแรก นำข้าวที่หุงสุกแล้วมาวิเคราะห์ทันที และกลุ่มที่สอง จะนำข้าวที่หุงสุกแล้วไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การวิเคราะห์จะใช้วิธีการย่อยโดยเอนไซม์ พบว่าปริมาณอะมิโลสมีผลกระทบต่อการประเมิณค่าระดับไกลซิมิกและปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อย โดยปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออะมิโลสเพิ่มขึ้นในข้าวชนิดเดียวกัน ซึ่งข้าวจาปอนิกามีปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอินดิกาและข้าวลูกผสมที่มีปริมาณอะมิโลสใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ ข้าวที่มีอะมิโลสสูงสายพันธุ์ ZF201 ซึ่งมีลักษณะเฉพาะโดยการวัดด้วยเครื่อง RVA พบตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (PKV) ความหนืดของแป้งเปียกเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (HPV) และความหนืดของแป้งเปียกเมื่อลดอุณหภูมิ (CPV) มีค่าต่ำ ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อยสูงกว่าและมีระดับไกลซิมิกต่ำกว่าข้าวสายพันธุ์อื่น การกินตัวของข้าวที่หุงสุกจะทำให้ค่าดัชนีการย่อยและระดับไกลซิมิกลดลงในทุกสายพันธุ์ โดยพบว่าสายพันธุ์ข้าวเหนียวและสายพันธุ์ที่มีอะมิโลสต่ำจะมีแนวโน้มในการย่อยแป้งเร็ว และสมบูรณ์กว่าข้าวสายพันธุ์ที่มีอะมิโลสปานกลางและสูง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาผลของวิธีการหุงสุกด้วยวิธีต่าง ๆ และอัตราส่วนของน้ำต่อข้าวในการหุงข้าวกล้อง เพื่อทำการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก ซึ่งมีการดำเนินการศึกษาค้นคว้าดังนี้

- 3.1 แผนการวิจัย
- 3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 3.3 วิธีการทดลอง
- 3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล
- 3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ซึ่งกลุ่มตัวอย่างคือ ข้าวกล้องจากข้าวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในการนำข้าวมาวิเคราะห์ทำการเลือกตัวอย่างจากประชากรโดยใช้การสุ่ม (Random selection) และทำการเลือกตัวอย่างเข้ากลุ่มทดลองแบบ (Random assignment) แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

3.1.1 การศึกษาผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก แผนการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely randomized design ; CRD) ชนิดอิทธิพลกำหนด (Fixed effect model) มี 1 ปัจจัย คือ วิธีการหุงข้าวมี 4 ระดับ ได้แก่ การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า, การหุงโดยการนึ่ง, การหุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และการหุงด้วยไมโครเวฟ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ รวมหน่วยการทดลอง 12 หน่วยการทดลอง

3.1.2 การศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก ของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า แผนการทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely randomized design ; CRD) ชนิดอิทธิพลกำหนด (Fixed effect model) มี 1 ปัจจัย คือ อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำมี 3 ระดับ คือ 1:2, 1:3 และ 1:4 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ รวมหน่วยการทดลอง 9 หน่วยการทดลอง

3.2 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งปลูกบริเวณพื้นที่เขตอำเภอบรบือ จังหวัดมหาสารคาม เก็บเกี่ยวระหว่างเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2552

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์

- 3.2.2.1 เครื่องแก้วต่างๆ (Glassware)
- 3.2.2.2 เครื่องชั่ง (Balance)
- 3.2.2.3 หม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Electric rice cooker) (SHARP KSH-106; Japan)
- 3.2.2.4 หม้อนึ่ง (Steaming pot)
- 3.2.2.5 เครื่องไมโครเวฟ (Microwave) (TOSHIBA ER-D23SC)
- 3.2.2.6 หม้ออะลูมิเนียม
- 3.2.2.7 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) (TA-XT2i; UK)
- 3.2.2.8 เครื่องบ่มแบบเขย่า (Shaking Incubater) (LAB TECH; KOREA)
- 3.2.2.9 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) (Rotina 48 R)
- 3.2.2.10 เครื่อง Vortex mixer (HAMONY; JAPAN)
- 3.2.2.11 เครื่อง UV-spectrophotometer (Spectronic Genesys 5)
- 3.2.2.12 เครื่อง Magnetic stirrer
- 3.2.2.13 เทอร์มอมิเตอร์ (Thermometer)
- 3.2.2.14 ไมโครปิเปต (Micro-pipett)
- 3.2.2.15 เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) (METTLER TOLEDO)
- 3.2.2.16 เครื่องให้ความร้อน (Water bath) (SCHUTZART)
- 3.2.2.17 เครื่อง Sonicator
- 3.2.2.18 เครื่องวิเคราะห์โปรตีน (Kjeldahl apparatus) (Gerhardt)
- 3.2.2.19 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxhlet aparatus) (BUCHI E-816; SWITZERLAND)
- 3.2.2.20 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (VELP scientific)

3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3.1 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนหรือโปรตีนวิธีเจลดาล์ (Crude protein)

3.2.3.1.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H_2SO_4) (Caro erba)

- 3.2.3.1.2 โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) (UNIVAR; AUSTRALIA)
- 3.2.3.1.3 คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4$) (ANALAR; ENGLAND)
- 3.2.3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 35 % w/v (UNIVAR; AUSTRALIA)
- 3.2.3.1.5 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 15 % w/v (UNIVAR; AUSTRALIA)
- 3.2.3.1.6 สารละลายกรดบอริกอิ่มตัว (H_3BO_3) (RANKEM; INDIA)
- 3.2.3.1.7 สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม
- 3.2.3.1.8 สารละลายมาตรฐานของกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.2 N (J.T. Baker; THAILAND)
- 3.2.3.1.9 วัสดุควบคุมการเดือด เช่น เศษกระเบื้อง
- 3.2.3.2 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Crude fat)
 - 3.2.3.2.1 Petroleum ether ช่วงจุดเดือด 40-60 องศาเซลเซียส (RCI Lab scan)
 - 3.2.3.2.2 Acetone (NORMAPUR)
- 3.2.3.3 สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์หาเส้นใยอาหารดิบ (Crude fiber)
 - 3.2.3.3.1 สารละลายกรดวาล์ฟริกเข้มข้น 1.25 % (Caro erba)
 - 3.2.3.3.2 สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.25 % (BDH)
 - 3.2.3.3.4 Acetone (NORMAPUR)
- 3.2.3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด (Total starch)
 - 3.2.3.4.1 Potassium hydroxide (2 M) (BDH)
 - 3.2.3.4.2 Sodium acetate buffer (100 mM, pH 5)
 - 3.2.3.4.3 Sodium acetate buffer (1.2 M, pH 3.8)
 - 3.2.3.4.4 Sodium acetate buffer (200 mM, pH 4.5)
 - 3.2.3.4.5 Ethanol 80% (ANALAR; ENGLAND)
 - 3.2.3.4.6 Thermostable α -amylase (SIGMA; GERMANY)
 - 3.2.3.4.7 Amyloglucosidase (SIGMA; DENMARK)
 - 3.2.3.4.8 Glucose oxidase-peroxidase (MEGAZYME; IRELAND)
 - 3.2.3.4.9 D-glucose standard solution (SIGMA; USA)
- 3.2.3.5 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์แป้งที่ถูกชะล้าง (Starch leaching)
 - 3.2.3.5.1 Ethanol 95% (ANALAR; ENGLAND)
 - 3.2.3.5.2 Sodium acetate buffer (pH 4.75)

3.2.3.5.3 Amyloglucosidase (SIGMA; DENMARK)

3.2.3.5.4 Glucose oxidase-peroxidase (MEGAZYME; IRELAND)

3.2.3.5.5 D-glucose standard solution (SIGMA; USA)

3.2.3.6 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน (Degree of gelatinization)

3.2.3.6.1 Iodine

3.2.3.6.2 Potassium iodide

3.2.3.6.3 สารละลาย KOH 10 M (BDH)

3.2.3.6.4 Hydrochloric acid (J.T. Baker; THAILAND)

3.2.3.7 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการย่อยแป้ง

3.2.3.7.1 HCl-KCl buffer (pH 1.5)

3.2.3.7.2 Pepsin solution (SIGMA; GERMANY)

3.2.3.7.3 Tris-Maleate buffer (pH 6.9)

3.2.3.7.4 Sodium acetate buffer (pH 4.75)

3.2.3.7.5 α -amylase (SIGMA; GERMANY)

3.2.3.7.6 Amyloglucosidase (SIGMA; DENMARK)

3.2.3.7.7 Glucose oxidase-peroxidase (MEGAZYME; IRELAND)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องที่หุงสุกวิธีต่าง ๆ เพื่อศึกษา องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิด เจลาทีโนเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก ดัดแปลงจากวิธีของ Juliano (1985)

นำข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ที่กะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องสีข้าวกล้อง นำมาคั่วข้าวเต็มเมล็ด จากนั้นนำมาหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า การหุงโดยการนึ่ง การหุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และการหุงด้วยไมโครเวฟ อุณหภูมิที่ใช้ในการหุงขึ้นอยู่กับแต่ละวิธี ตัวแปรที่ควบคุม คือ ปริมาณข้าวและน้ำในการหุง นำข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 คั่วข้าวเต็มเมล็ดนำมาหุง ด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าใช้อัตราส่วนน้ำ 1:3 เวลาที่ใช้ในการหุง 35 นาที แล้วงดต่ออีก 5 นาที

เพื่อให้ความร้อนระอุให้ทั่วอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการหุง 100°C หุงด้วยไมโครเวฟใช้อัตราส่วนน้ำ 1:4 เวลาที่ใช้ในการหุง 25 นาที นำออกมาคนทุก 10 นาที อุณหภูมิสูงสุดในการหุง 100°C หุงแบบวิธีดั้งเดิม (แบบเขี่ยน้ำ) ต้มข้าวใช้อัตราส่วนน้ำ 1: 6 ด้วยไฟแรงต้มจนเมล็ดข้าวแตก 20 นาทีคนทุก 5 นาที แล้วรินน้ำออกงดต่ออีก 5 นาที อุณหภูมิสูงสุดในการหุง 100°C และหุงโดยการนึ่ง ต้มน้ำในหม้อหนึ่งให้เดือดนำข้าวใส่ภาชนะแตนเลส อัตราส่วนน้ำ 1:1.25 นึ่งเป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิสูงสุดในการหุง 100°C นำข้าวที่ได้แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำไปทำแห้งแบบ Freeze Drying เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ส่วนที่สองนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกทันที

3.3.1.2 การเตรียมตัวอย่างข้าวหุงสุกเพื่อศึกษาอัตราส่วนของข้าวต่อการนำไปในการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิก

นำข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ที่กะเทาะเปลือกออกมาคัดข้าวเต็มเมล็ด จากนั้นนำมาหุงโดยใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยใช้ตัวอย่างข้าว 100 กรัม และใช้น้ำกลั่นในการหุง 200 300 และ 400 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการหุง 27 36 และ 47 นาที คิดเป็นอัตราส่วน 1:2, 1:3 และ 1:4 ตามลำดับ ตัวแปรที่ควบคุมคือ ปริมาณข้าวและน้ำกลั่นที่ใช้ในการหุงนำข้าวที่หุงแล้วไปทำแห้งแบบ Freeze Drying เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี นำข้าวที่ได้แบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรกนำไปทำแห้งแบบ Freeze Drying เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ส่วนที่สองนำไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกทันที

3.3.2 การวิเคราะห์

3.3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในข้าวสุก

3.3.2.1.1 การหาวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนหรือโปรตีนหยาบวิธีเจดดาห์

(Total nitrogen and crude protein : Kjeldahl method) (AOAC, 2000)

ใส่วัสดุควบคุมการเคี้ยว 2-3 ชิ้น ในหลอดเจดดาห์ ใส่ K_2SO_4 3.0 กรัม แล้วชั่งตัวอย่าง 0.3-0.4 กรัม ใส่ในหลอดเจดดาห์ เติมน้ำ CuSO_4 0.13 กรัม แล้วเติมน้ำ H_2SO_4 เข้มข้น 6.0 มิลลิลิตร ลงในหลอดเขย่าเบา ๆ เพื่อผสม จากนั้นใส่หลอดเจดดาห์ในช่องเครื่องย่อยซึ่งมีเตาไฟฟ้า ต้มนาน 20 นาที แล้วทำการย่อยต่อ 90 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำหลอดเจดดาห์ ที่ย่อยแล้วไปเติมน้ำกลั่น 18 มิลลิลิตร (ปริมาตรประมาณ 3 เท่า ของกรดที่ย่อยเพื่อทำการเจือจางกรด) แล้วนำไปใส่ในช่องกลั่นของเครื่องกลั่นอัตโนมัติ กดปุ่มสารละลาย NaOH เข้มข้น 35 % w/v ให้ไหลลงผสมกับสารในหลอดเจดดาห์ ในปริมาตรต่าง 5 เท่า (30 มิลลิลิตร) ของ H_2SO_4 ที่ใช้อยู่ ดวงสาร H_2BO_3 อิมตัว

ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติม mix indicator 3 หยด นำไปวางตำแหน่งสิ่งที่กลั่นได้ จากนั้นนำสารที่กลั่นได้ไตเตรทกับสารละลาย HCL เข้มข้น 0.2 N จนถึงจุดสมมูลแล้วบันทึกผล

3.3.2.1.2 การหาปริมาณไขมันด้วยวิธีซอกซ์เลท (Extractable lipid : Soxhlet method) (AOAC, 2000)

ชั่งตัวอย่างประมาณ 3 กรัม วางบนกระดาษซังสารและห่อลงใส่ใน Extraction thimble และทำการสวม Adapter นำเข้าเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ซึ่งปิกเกอร์ประจำเครื่องให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม แล้วใส่ตัวทำละลายคือ Petroleum ether ใส่ลงในปิกเกอร์ 100 มิลลิลิตร ใส่ Thimble บรรจุตัวอย่างลงในหลอดซอกซ์เลทปรับอัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องสกัดให้เหมาะสม กลั่นระบบ Reflex ด้วยระบบ Steam bath เป็นเวลา 90 นาที หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักไขมัน

3.3.2.1.3 การวิเคราะห์หาเส้นใยอาหารดิบ (Crude fibre) (AOAC, 2000)

ชั่งน้ำหนักถ้วยกรอง (Crucible) ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วจดน้ำหนักไว้ จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยกรอง (Crucible) นำถ้วยกรองใส่ในแท่นของชุดหาปริมาณเส้นใยอาหารดิบเติมสารละลาย H_2SO_4 เข้มข้น 1.25 % ที่ร้อนโดยการให้ความร้อนก่อนบนแผ่นให้ความร้อน แล้วเติมในช่องย่อยจนถึงระดับ 150 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำให้ร้อนด้วยแผ่นให้ความร้อนเพื่อลดเวลาในการต้มให้เดือดหยดสารป้องกันการเกิดฟอง (N-octanol) ประมาณ 3 หยด หลังจากมีการเดือดแล้วต้มต่อไปอีก 30 นาที เปิดลิ้นไปที่ Vacuum เพื่อระบายกรด H_2SO_4 ออกแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน 3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 30 มิลลิลิตร ให้การล้างแต่ละครั้งเปิดลิ้นไปที่ Pressure เพื่อดันให้อากาศผ่านฐานของถ้วยกรอง ทำให้ส่วนผสมในถ้วยแก้วคลุกเคล้ากันโดยตลอดหลังจากปล่อยน้ำล้างครั้งสุดท้ายออกจนหมดแล้วเติมสารละลาย KOH เข้มข้น 1.25 % ที่ทำให้ร้อนไว้ก่อนแล้วลงไป 150 มิลลิลิตร พร้อมกับหยด N-octanol ประมาณ 3 หยด แล้วต้มให้เดือดนาน 30 นาทีล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน 3 ครั้ง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นเย็นอีก 1 ครั้ง แล้วล้างอีก 3 ครั้งด้วย Acetone ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เปิดให้ความร้อนเข้าทุกครั้งที่ทำการล้างทำให้ตัวอย่างในถ้วยกรองแห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะได้น้ำหนักคงที่ ซึ่งค่าที่ได้นี้เป็นน้ำหนักของเส้นใยดิบ

3.3.2.1.4 การวิเคราะห์เถ้า (AOAC, 2000)

โดยเผาถ้วย Crucible เปล่าในเตาเผา (Muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นลงใน Desiccator นานประมาณ 1 ชั่วโมง ชั่งถ้วย Crucible ให้ละเอียดถึงหน่วยมิลลิกรัม ชั่งตัวอย่างอาหารประมาณ 5 กรัม ลงในถ้วย Crucible วางถ้วย Crucible บนเตาไฟฟ้าในตู้คว้น เพิ่มอุณหภูมิทีละน้อยจนคว้นหมดไปและตัวอย่างเปลี่ยนเป็นถ่านสีดำ ย้ายถ้วย Crucible ใส่ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550°C นาน 16 ชั่วโมง นำเอาถ้วย Crucible ออกจากเตาเผาไปทำให้เย็นใน

Desiccator ถ้าเข้ายังมีส่วนสีดาปนอยู่ ให้เติมน้ำกลั่น 1-2 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากระจายตัว ล้างเข้าจากแท่งแก้วให้หมด แล้วนำด้วย Crucible ไปอบได้น้ำจนแห้ง นำด้วย Crucible ไปเข้าเตาเผา อีก 24 ชั่วโมง จนได้สีขาวทั้งหมด ทำให้เย็นใน Desiccator แล้วชั่งน้ำหนักละเอียด ถึงหน่วยมิลลิกรัม

3.3.2.1.5 การวิเคราะห์ความชื้น (AOAC, 2000)

โดยอบด้วยใส่ตัวอย่าง (Moisture can) พร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นานประมาณ 15 นาที ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) ชั่งน้ำหนักพร้อมฝา โดยเครื่องชั่งละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ชั่งตัวอย่างประมาณ 3 – 5 กรัม ใส่ลงในถ้วยใส่ตัวอย่าง บันทึกน้ำหนัก นำไปอบในตู้อบลมร้อน $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 30 นาที แล้วชั่งน้ำหนัก

3.3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด จากวิธีของ Goni และคณะ (1996)

ชั่งตัวอย่างข้าวกล้องที่หุงแล้วมา 100 มิลลิลิตร (จดน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่หลอด Centrifuge ขนาดความจุอย่างต่ำ 17 มิลลิลิตร เติมน้ำ 80% ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร นำไปปั่นที่ อุณหภูมิ $80-85^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vortex mixer เติมน้ำ 80% อีก 5.0 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที แล้วเทส่วนใส ที่ เติม KOH 2 M ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร ลงไปในหลอด Centrifuge แล้วปั่นด้วยเครื่อง Magnetic stirrer เป็นเวลา 20 นาที ในกลองที่มีน้ำแข็งเพื่อละลายแป้ง เติม Sodium acetate buffer 1.2 M (pH 3.8) ลงไป 8.0 มิลลิลิตร (พร้อม Stirrer) แล้วเติม α -amylase 0.1 มิลลิลิตร และเอนไซม์ Amyloglucosidase 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vortex mixer แล้วจึงนำไปปั่นใน Water bath อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 นาที โดยเอาออกมาเขย่าเป็นช่วง ๆ 1-2 ครั้ง

นำสารที่ได้ในข้างต้นมาเทใส่ Volumetric flask ขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นดูดสารละลายส่วนใส 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง (3 ข้าง) เติม GOPOD 3.0 มิลลิลิตร ทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่น 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD 3.0 มิลลิลิตร และทำ Standard glucose โดยดูด Standard glucose 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD 3.0 มิลลิลิตร นำไปปั่นที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 20 นาที นำไปวัดนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณหา ปริมาณแป้งทั้งหมด

3.3.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง (Starch leaching) ดัดแปลงจากวิธีของ

Williams และคณะ (1970)

ชั่งตัวอย่างข้าวหุงสุกมา 5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนให้เข้ากัน จากนั้นนำไปปั่นผสมด้วย Vortex mixer เป็นเวลา 2 นาที แล้วนำไป Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000

rpm เป็นเวลา 10 นาทีแล้วดูดสารละลายส่วนที่ใสมา 2 มิลลิลิตร เติมนีออนอล 95% 8 มิลลิลิตรแล้วผสมให้เข้ากัน จากนั้นดูดสารละลายข้างต้นมา 1 มิลลิลิตร เติมนีออนอล buffer (pH 4.75) 1 มิลลิลิตร เติมนีออน Amyloglucosidase 30 ไมโครลิตร แล้วนำไปปั่นที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 45 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาล โดยดูดสารละลายที่ปั่นไว้ 0.1 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง (3 ซ้ำ) เติมนีออน GOPOD 3.0 มิลลิลิตร ทำ blank โดยใช้ น้ำกลั่น 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD 3.0 มิลลิลิตรและทำ Standard glucose โดยดูด Standard glucose 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ GOPOD 3.0 มิลลิลิตร นำไปปั่นที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 20 นาที นำไปวัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง

3.3.2.4 การวัดเนื้อสัมผัสข้าว คัดแปลงจากวิธีของ Bao และคณะ (2004) และวิธีของ Cheng และคณะ (2005)

ใช้เครื่องวัดลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA-XT2i โดยใช้ cylinder probe ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ซึ่งตัวอย่างข้าวสุกใส่ในกระบอกวัดเนื้อสัมผัส 40 กรัม และเลือกโปรแกรม Texture profile analysis กำหนดให้ระยะที่ Probe กดไปที่ตัวอย่าง 10 mm ด้วยความเร็ว 2 mm/s จากนั้นทำการวัดตัวอย่างข้าวและบันทึกผลต่าง ๆ ดังนี้ ความแข็ง (Hardness), ความเกาะติดกัน (Cohesiveness) และความยืดหยุ่น (Springiness)

3.3.2.5 การวิเคราะห์ระดับของการเกิดเจลลีนในเซชัน (Degree of gelatinization)
จากวิธีของ Brich และ Priestley (1973)

นำข้าวที่หุงแต่ละวิธีมาทำให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 58 °C แล้วบดร่อนผ่านตะแกรง ซึ่งตัวอย่างแป้งข้าว 0.2 กรัม ใส่ น้ำกลั่น 98 มิลลิลิตร เติมนีออน KOH 10 M 2 มิลลิลิตร คน 5 นาทีแล้วนำไป เซนตริฟิวจ์แยกส่วนใส ปิเปตส่วนใส 1 มิลลิลิตร เติมนีออนไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ 0.4 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ใส่สารละลายไอโอดีน 0.1 มิลลิลิตร ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร

ทดลองคล้ายกันโดยซึ่งตัวอย่างแป้งข้าว 0.2 กรัม ใส่ น้ำกลั่น 95 มิลลิลิตร เติมนีออน KOH 10 M 5 มิลลิลิตร คน 5 นาทีแล้วนำไป เซนตริฟิวจ์แยกส่วนใส ปิเปตส่วนใส 1 มิลลิลิตร เติมนีออนไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ใส่สารละลายไอโอดีน 0.1 มิลลิลิตร ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงจากขั้นแรกมาหารด้วยค่าที่ได้จากตอนที่สอง แล้วนำค่าที่ได้มาแทนค่าในสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานระดับของการเกิดเจลลีนในเซชันของข้าวขาวดอกมะลิ 105

3.3.2.6 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการย่อยแป้งเพื่อหาความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก จากวิธีของ Goni และคณะ (1997)

นำข้าวกล้องที่ผ่านการหุงสุกมาวิเคราะห์ทันทีเพื่อหลีกเลี่ยงการกินตัวของแป้ง ซึ่งตัวอย่างข้าวมา 50 มิลลิกรัม ใน Erlenmeyer flask ขนาด 30 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายบัฟเฟอร์ HCl-KCl (pH 1.5) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไปแล้วทำการ Sonicate เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ Pepsin 0.2 มิลลิลิตร (เอนไซม์ pepsin 1 มิลลิกรัม ในสารละลายบัฟเฟอร์ HCl-KCl pH 1.5 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร) ลงในตัวอย่างแล้วนำไปบ่มที่เครื่อง Shaking Incubator อุณหภูมิ 40° C เป็นเวลา 60 นาที และปรับปริมาตรให้ได้ 25 มิลลิลิตร โดยการเติม Tris – maleate buffer (pH 6.9) ลงไป 15 มิลลิลิตร

การย่อยแป้งจะเริ่มจากการเติม Tris – maleate buffer ลงไป 5 มิลลิลิตร ซึ่งจะประกอบด้วย 2.6 IU ของ α -amylase ลงไปในตัวอย่างแล้วนำ Flask ที่มีตัวอย่างนำไปบ่มที่เครื่อง Shaking Incubator อุณหภูมิ 37° C โดยเขย่าในระดับปานกลาง ทำการสุ่มตัวอย่างสารละลายออกมา 1 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลอง ทุกๆ 30 นาที เริ่มจากนาทีที่ 0 จนครบ 180 นาที ตัวอย่างที่สุ่มออกมา นำไปแช่ในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ α -amylase จากนั้นเติม Sodium acetate buffer 0.4 M (pH 4.75) ลงไป 3.0 มิลลิลิตร และเติมเอนไซม์ Amyloglucosidase ลงไป 60 ไมโครลิตร เพื่อย่อยแป้ง นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60° C เป็นเวลา 45 นาที แล้วนำมาวัดความเข้มข้นของกลูโคสโดยใช้ Glucose oxidase–peroxidase kit (Megazyme) โดยดูดตัวอย่างที่เวลาต่างๆ (30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที) มา 0.1 มิลลิลิตร เติม Glucose oxidase–peroxidase (GOPOD Reagent) 3 มิลลิลิตร แล้วทำ blank โดยนำน้ำกลั่น 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ Glucose oxidase–peroxidase (GOPOD Reagent) 3 มิลลิลิตร และทำ Standard glucose โดยดูด D-glucose 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ Glucose oxidase–peroxidase (GOPOD Reagent) 3 มิลลิลิตร หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่าง blank และกลูโคสมาตรฐานมาบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 50° C เป็นเวลา 20 นาที นำมาวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร วิเคราะห์ 3 ซ้ำ คำนวณค่าการดูดกลืนแสงให้เป็นเปอร์เซ็นต์ของการย่อยแป้งแล้วนำมาแทนค่าในแบบจำลองของ Goñi และคณะ (1997) ซึ่งประยุกต์มาจากจลนพลศาสตร์ของการย่อยแป้ง สมการแรกที่เกี่ยวข้องคือ

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

เมื่อ C คือ เปอร์เซ็นต์ของการย่อยแป้งที่เวลาใดๆ

C_{∞} คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล

k คือ ค่าคงที่

t คือ เวลา (นาที)

เมื่อได้ค่า C_{∞} แล้วนำมาแทนค่าหาพื้นที่ใต้กราฟการย่อย โดยจะคำนวณตามสมการดังนี้

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty} / k) [1 - \exp[-k(t_f - t_0)]] \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ C_{∞} คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล

t_f คือ เวลาสุดท้าย (180 นาที)

t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (0 นาที)

k คือ ค่าคงที่

สร้าง Non-linear model ตามวิธีของ Goni และคณะ (1997) เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงการย่อยของแป้ง จากนั้นหาพื้นที่ใต้กราฟการย่อยออกมาเป็นสมการทำให้ทราบค่าดัชนีการย่อย (Hydrolysis index) เพื่อไปคำนวณหาดัชนีไกลซีมิก (Glycemic index)

$$GI = 39.71 + (0.549 \times HI) \dots \dots \dots \text{สมการที่ 3}$$

3.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้ทดลองได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้

3.4.1 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่างๆต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง ดัชนีไกลซีมิก ปริมาณแป้งทั้งหมด องค์ประกอบทางเคมี เนื้อสัมผัสของข้าว แป้งที่ถูกละลายและระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน นำเสนอในรูปค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และทดสอบสมมุติฐานการวิจัยโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 1 ปัจจัย

3.4.2 นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองสัดส่วนของน้ำในการหุงต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งดัชนีไกลซีมิก ปริมาณแป้งทั้งหมด องค์ประกอบทางเคมี เนื้อสัมผัสของข้าว แป้งที่ถูกละลายและระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน นำเสนอในรูปค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และทดสอบสมมุติฐานการวิจัยโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบมี 1 ปัจจัย

3.5 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลและทดสอบสมมุติฐานด้วยสถิติ F-test (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่ตามวิธีของ Scheffe ที่ $\alpha = 0.05$

ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิก โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation) แบบเพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

ผู้วิจัยได้เสนอการวิเคราะห์ข้อมูลและแปลความหมายข้อมูลเป็นลำดับขั้นตอนดังนี้

- 4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.2 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล
- 4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

4.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อความเข้าใจตรงกันถึงสัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง กำหนดความหมายของสัญลักษณ์ดังนี้

$\bar{x}$ แทนค่าเฉลี่ย

SD แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n แทนจำนวนซ้ำการทดลอง

F แทนสถิติทดสอบที่ใช้พิจารณาใน F-distribution

4.2 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการทดลองผู้ทดลองได้เสนอผลการทดลองตามลำดับดังนี้

ตอนที่ 1 ผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ความชื้น ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง คุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิก

ตอนที่ 2 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงข้าวต่อองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ความชื้น ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง คุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิก

การหาจลนพลศาสตร์ของการย่อยแป้งโดยใช้เอนไซม์ในการย่อย ซึ่งอัตราการย่อยแป้งที่เหมาะสมตามเปอร์เซ็นต์ของปริมาณแป้งทั้งหมดที่เวลาแตกต่างกัน คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ

180 นาที หลังจากนั้นจึงนำมาคำนวณหาดัชนีไกลซิมิกตามแบบจำลองของ Goñi และคณะ (1997) โดยใช้สมการดังนี้

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt}) \dots\dots\dots \text{สมการที่ 1}$$

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty} / k) [1 - \exp[-k(t_f - t_0)]] \dots\dots\dots \text{สมการที่ 2}$$

$$GI = 39.71 + (0.549 \times HI) \dots\dots\dots \text{สมการที่ 3}$$

4.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

4.3.1 ผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกระงับ คุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลาทีนในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซิมิก

4.3.1.1 ผลของวิธีการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง

นำข้าวกล้องที่ได้จากการหุงแต่ละวิธี ได้แก่ ไมโครเวฟ, หุงด้วยวิธีดั้งเดิม หรือการหุงแบบเช็ดน้ำ หุงโดยการนึ่ง และหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และความชื้น ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าวิธีการหุงไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย และความชื้นของข้าวกล้อง ($p > 0.05$) (ตาราง ค1 ภาคผนวก ค) โดยค่าเฉลี่ยของปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงระหว่าง 6.83-8.69 กรัม/100 กรัม, ปริมาณไขมันอยู่ในช่วงระหว่าง 2.12-2.45 กรัม/100 กรัม, ปริมาณเส้นใยอยู่ในช่วงระหว่าง 1.73-2.11 กรัม/100 กรัม และปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงระหว่าง 54.69-57.73 กรัม/100 กรัม แต่วิธีการหุงข้าวมีผลต่อปริมาณเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่ข้าวที่หุงด้วยไมโครเวฟ และการนึ่งมีปริมาณเถ้ามากกว่าข้าวที่หุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) (ตาราง ง1 ภาคผนวก ง) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Juliano (1993) ที่ได้รายงานว่าองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวกล้อง พบว่าข้าวกล้องหุงสุกโดยทั่ว ๆ ไปมีปริมาณ โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้า คือ 7.1-8.3, 1.6-2.8, 0.6-1.0 และ 1.0-1.5 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ

การที่ข้าวกล้องที่หุงแบบวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) มีปริมาณเถ้าต่ำที่สุด เนื่องจากในข้าวกล้องโดยเฉพาะบริเวณชั้นรำ ประกอบไปด้วยสารอาหารหลายชนิดโดยเฉพาะวิตามินและแร่ธาตุ ซึ่งวิตามินและแร่ธาตุบางชนิดสามารถละลายได้ในน้ำ จึงเป็นไปได้ว่าจะสูญเสียในขณะรินน้ำทิ้งที่เป็นขั้นตอนหนึ่งในการหุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ)

ตาราง 4.1 ผลของวิธีการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง

วิธีการหุง	องค์ประกอบทางเคมี (%)				
	โปรตีน ^{ns}	ไขมัน ^{ns}	เส้นใย ^{ns}	เถ้า	ความชื้น ^{ns}
ไมโครเวฟ	8.49±1.26	2.45±0.09	1.93±0.23	1.42±0.01 ^a	54.69±2.93
ดั้งเดิม (เขื่อน้ำ)	6.83±0.22	2.12±0.18	2.06±0.43	1.06±0.10 ^b	55.18±2.10
นึ่ง	8.05±0.28	2.42±0.04	2.11±0.29	1.34±0.01 ^a	56.03±1.82
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	8.69±0.58	2.35±0.19	1.73±0.33	1.27±0.16 ^{a,b}	57.73±1.26

^{ns} ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

^{a, b, c, ...} ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

4.3.1.2 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้าง

นำข้าวกล้องที่หุงจากวิธีต่าง ๆ มาวิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมด คือ ปริมาณแป้งทั้งหมดประกอบด้วย แป้งส่วนที่ย่อยได้ (Digestible starch) และแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วย เอนไซม์ (Resistant starch) พบว่าวิธีการหุงไม่มีผลต่อปริมาณแป้งทั้งหมด ($p>0.05$) (ตาราง ค2 ภาคผนวก ค) โดยข้าวกล้องมีปริมาณแป้งทั้งหมดอยู่ในช่วง 80.53-81.97 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 4.2

จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่ของ Hu และคณะ (2004) รายงานไว้ซึ่งพบว่าปริมาณแป้งทั้งหมดของข้าว *Japonica* พันธุ์ต่าง ๆ มีค่าเฉลี่ยของปริมาณแป้งทั้งหมด อยู่ในช่วงระหว่าง 75.0-80.7 กรัม/100 กรัม และจากงานวิจัยของ Sagum และ Arcot (2000) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของกระบวนการแปรรูปต่อปริมาณแป้งทั้งหมด และไม่พบความแตกต่างของปริมาณแป้งทั้งหมดในข้าวสายพันธุ์ *Doongara* ดิบและที่ผ่านการต้มแล้ว ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าวิธีการหุงต้มหรือกระบวนการแปรรูปไม่มีผลต่อปริมาณแป้งทั้งหมด นอกจากนี้พบว่าระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งทั้งหมดในข้าว แต่การเก็บข้าวไว้นานจะลดความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน และสตาร์ช ตลอดจนการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างโปรตีนและสตาร์ช (Chrastil, 1990)

แป้งที่ถูกชะล้าง (Starch leaching) คือ แป้งที่สูญเสียในกระบวนการหุงต้ม มีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัวของเม็ดแป้งและเป็นคุณสมบัติหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงหลังการหุงต้ม จากการนำข้าวกล้องที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ มาวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง พบว่าข้าวที่หุงโดยไมโครเวฟ หุงด้วยวิธีดั้งเดิม และหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า มีปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างสูงกว่า

ข้าวกล้องที่หุงโดยการนึ่งอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง2 ภาคผนวก ง) ซึ่งข้าวกล้องที่หุงด้วยการนึ่งมีปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างต่ำที่สุด คือ 1.34 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างมีความสัมพันธ์กับการพองตัวของเม็ดแป้ง เนื่องจากเม็ดแป้งที่ได้รับความร้อนในภาวะที่มีปริมาณน้ำมากจะพองตัวออกมาและมีอะไมโลสซึ่งละลายน้ำได้จะหลุดออกมาด้วย หากมีความดันหรือแรงเฉือนที่ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลาย จะทำให้ได้สารละลายที่มีลักษณะข้น ประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลเพกติน ซึ่งเป็นแป้งที่ถูกชะล้างออกมา (นิธิยา รัตนานนท์, 2549) การที่ข้าวกล้องที่หุงด้วยการนึ่งมีปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างต่ำเนื่องจากวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ใช้ใช้น้ำในปริมาณน้อยคือ 1:1.25 จึงทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวและมีส่วนอะไมโลสที่หลุดออกมาน้อยนอกจากนี้อิทธิพลที่มีต่อแป้งที่ถูกชะล้าง คือ อันตรกิริยาของโครงสร้างสตาร์ช, สารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสและลิปิด และปริมาณอะไมโลส (Hoover and Vasanathan, 1994; Jayakody *et al.*, 2005)

ตาราง 4.2 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้าง

วิธีการหุง	ปริมาณแป้งทั้งหมด (%) ^{ns} ($\bar{x} \pm SD$)	แป้งที่ถูกชะล้าง (%) ($\bar{x} \pm SD$)
ไมโครเวฟ	81.97 $\pm$ 2.71	1.80 $\pm$ 0.20 ^a
ตั้งเค็ม (เขี่ยน้ำ)	81.00 $\pm$ 2.29	1.92 $\pm$ 0.10 ^a
นึ่ง	80.53 $\pm$ 3.37	1.34 $\pm$ 0.10 ^b
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	80.67 $\pm$ 5.19	2.03 $\pm$ 0.16 ^a

^{ns} ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{a, b, c, ...} ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกันไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.3.1.3 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส

นำข้าวกล้องที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ มาประเมินคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสของข้าวโดยวิเคราะห์คุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA-XT2i ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ Hardness, Cohesiveness, Springiness และ Chewiness ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

จากการวิเคราะห์ค่า Hardness หรือความแข็ง พบว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยไมโครเวฟ และการนึ่งมีค่า Hardness เท่ากับ 12.56-12.73 N ซึ่งมากกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) มีค่า Hardness เท่ากับ 9.36 N และข้าวที่หุงด้วยการนึ่งมีค่าความแข็งมากกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ($p < 0.05$) (ตาราง ง3 ภาคผนวก ง) กรณีการหุงข้าวด้วยไมโครเวฟนั้นมีแมกนีตรอน (Magnetron) เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นสะเทือนจนกันแล้วเกิดพลังงานความร้อนสูง (Thomson, 1990) ข้าวมีการสูญเสียไอน้ำที่ผิวมากจึงมีค่า Hardness สูง จากการทดลองของ สุริยา และคณะ (2550) ได้ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการอบแห้งกล้วยตากแบบลมร้อนร่วมกับการอบแห้งด้วยคลื่นไมโครเวฟระบบสุญญากาศ พบว่าการอบด้วยไมโครเวฟจะเกิดลักษณะแห้ง และแข็งที่ผิวหน้าของกล้วยเนื่องจากผิวหน้าของกล้วยมีความชื้นผิวหน้าลดลงรวดเร็วกว่าเนื้อกล้วยภายใน จึงทำให้น้ำภายในเคลื่อนที่ออกได้ยาก ส่วนวิธีการนึ่งนั้นเป็นวิธีการที่ใช้น้ำในการหุงน้อย คือ ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.25 จึงทำให้ข้าวมีความแข็งมากกว่าข้าวที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและวิธีดั้งเดิม จึงเป็นเหตุผลให้ข้าวกล้องมีความแข็งต่างกันในขณะที่มีปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกัน

ส่วนคุณลักษณะด้านอื่นได้แก่ ค่า Cohesiveness หรือความเกาะติดกันของข้าวกล้อง ค่า Springiness หรือความยืดหยุ่นของข้าวกล้อง และค่า Chewiness หรือการเคี้ยว พบว่าวิธีการหุงข้าวไม่มีผลต่อค่า Cohesiveness Springiness และ Chewiness อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตาราง ก3 ภาคผนวก ก) ดังตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส

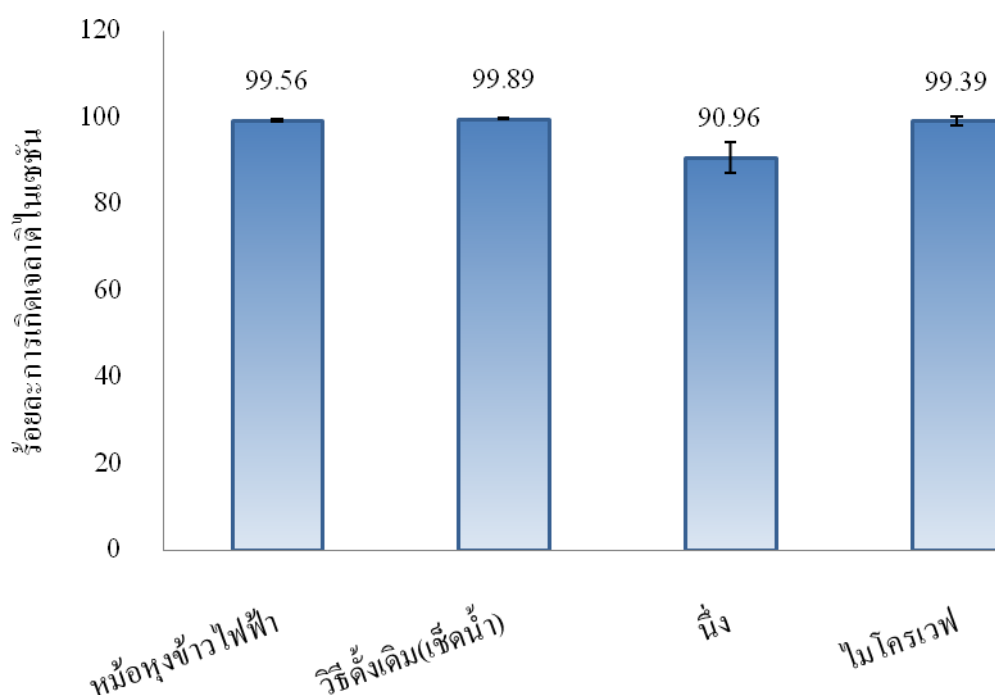
วิธีการหุง	คุณลักษณะทางเนื้อสัมผัส			
	Hardness (N)	Cohesiveness ^{ns}	Springiness ^{ns} (mm)	Chewiness ^{ns} (Nmm)
ไมโครเวฟ	12.56±1.31 ^{a,b}	0.24±0.01	0.39±0.12	1.16±0.21
ดั้งเดิม (เช็ดน้ำ)	9.36±1.03 ^c	0.25±0.01	0.56±0.07	1.29±0.23
นึ่ง	12.73±0.65 ^a	0.25±0.01	0.50±0.17	1.61±0.55
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	9.71±1.08 ^{b,c}	0.25±0.01	0.35±0.18	0.85±0.47

^{NS} ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

^{a, b, c, ...} ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.3.1.4 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน (Degree of gelatinization)

นำข้าวกล้องที่ได้จากการหุงทั้ง 4 วิธีมาวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน พบว่า ข้าวกล้องที่หุงโดยวิธีไมโครเวฟ, วิธีดั้งเดิม (เช็ดน้ำ) และหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน อยู่ในช่วง 99.39-99.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าข้าวที่ได้จากการหุงด้วยการนึ่ง ซึ่งมีระดับการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำที่สุด คือ 90.96 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) (ตาราง ง4 ภาคผนวก ง) ดังภาพประกอบที่ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากการหุงข้าวกล้องด้วยการนึ่งใช้น้ำในการหุงน้อย คือ อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.25 และน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเจลาตินในเซชันของเมล็ดแป้งที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของข้าวกล้อง (Lund, 1984) โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของเมล็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในสถานะที่มีน้ำ น้ำจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้ส่วนของอณูฐานเริ่มคลายออก จากนั้นเมื่อให้ความร้อนและปริมาณน้ำที่มากเพียงพอทำให้พันธะไฮโดรเจนของส่วนอณูฐาน และส่วนผลึกถูกทำลาย เม็ดแป้งจะพองตัวและสุก (Bemiller and Whistler, 1996)

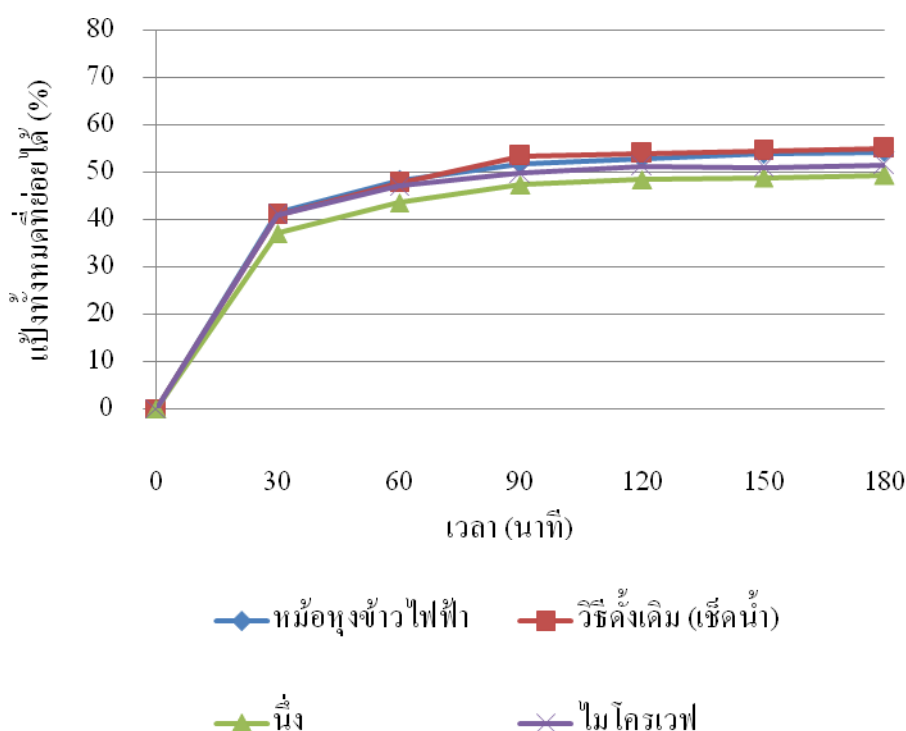


ภาพประกอบ 4.1 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อระดับของการเกิดเจลาตินในเซชัน

4.3.1.5 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง

นำข้าวกล้องที่ได้จากการหุงในแต่ละวิธีมาวิเคราะห์อัตราการย่อยแป้งที่เวลาต่าง ๆ โดยขั้นแรกโปรตีนในข้าวกล้องจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์เปปซิน จากนั้นใช้เอนไซม์ α -amylase และ amyloglucosidase เพื่อย่อยแป้งให้เปลี่ยนไปเป็นกลูโคสและตรวจวัดปริมาณกลูโคส สุ่มตัวอย่างออกมาทุก ๆ 30 นาที เพื่อตรวจวัดปริมาณกลูโคส จนครบ 180 นาที ผลการทดลองพบว่าข้าวกล้องสุกที่ได้จากการหุงแต่ละวิธีถูกย่อยอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก โดยมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้สูงถึง 37-40% และหลังจาก 30 นาทีเป็นต้นไปปริมาณแป้งที่ย่อยได้ของข้าวทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จาก 37-40% จนถึงประมาณ 49-55% ที่เวลาการย่อย 180 นาที โดยข้าวที่ได้จากการนึ่งมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลาของการย่อย คือมีแป้งที่ย่อยได้เท่ากับ 37.05 % ที่เวลา 30 นาที และมีแป้งที่ย่อยได้ 49.32 % ที่เวลา 180 นาที และข้าวที่หุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ที่สูงที่สุด คือมีแป้งที่ย่อยได้เท่ากับ 40.93 % ที่เวลา 30 นาที และมีแป้งที่ย่อยได้ 55.03 % ที่เวลา 180 นาที ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2

จากผลการทดลองพบว่าการย่อยได้ของแป้งข้าวกล้องที่หุงด้วยการนึ่งโดยเอนไซม์ α -amylase และ Amyloglucosidase เกิดขึ้นได้น้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดเจลลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์ของแป้งในข้าวกล้อง ดังจะเห็นจากภาพประกอบ 4.2 จากการทดลอง Chung และคณะ (2006) ศึกษาผลของการเกิดเจลและการคืนตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของแป้งข้าวเหนียว ผลการทดลองพบว่า ในแป้งข้าวเหนียวที่เกิดเจลลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์นั้นจะทำให้ขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ทำให้ความไวในการทำงานของเอนไซม์ลดลงรวมทั้งการเข้าถึงของเอนไซม์ในเม็ดแป้งเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการย่อยได้ของแป้งสูงหรือต่ำขึ้นกับระดับการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชในข้าว



ภาพประกอบ 4.2 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อการย่อยได้ของแป้ง

4.3.1.6 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิก

นำข้าวกล้องที่หุงสุกในแต่ละวิธีมาวิเคราะห์หาอัตราการย่อยแป้งที่เวลาต่าง ๆ แล้วนำไปสร้างสมการเอกโปเนนเชียล ซึ่งจะได้อัตราการย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}) และค่าคงที่ (k) เพื่อใช้ในการคำนวณดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิก ดังตารางที่ 4.4

จากการคำนวณค่า C_{∞} คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล พบว่าข้าวกล้องที่หุงวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และหม้อหุงข้าวไฟฟ้า มีค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}) เท่ากับ 54.21% และ 53.16% มากกว่าข้าวกล้องที่หุงจากไมโครเวฟและการนึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}) เท่ากับ 50.78% และ 48.51% (ตาราง ง5 ภาคผนวก ง)

จากการคำนวณค่า k คือ ค่าคงที่ของสมการ พบว่าจากสมการอัตราการย่อยได้ของแป้งในตัวอย่างข้าวกล้องที่หุงแต่ละวิธี มีค่า k โดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 0.04-0.05 เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าวิธีการหุงข้าวแต่ละวิธีไม่มีผลต่อค่าคงที่ของสมการ ($p>0.05$) (ตาราง ค5 ภาคผนวก ค)

จากการคำนวณดังสมการที่ 3 ข้าวกล้องที่หุงได้ในแต่ละวิธีมีดัชนีไกลซีมิกค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 74.43-78.31 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Miller และคณะ (2011) ที่กล่าวว่าข้าวกล้องมีดัชนีไกลซีมิกเท่ากับ 76 จัดเป็นกลุ่มดัชนีไกลซีมิกสูง นอกจากนี้พบว่าข้าวกล้องที่หุงโดยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) มีดัชนีการย่อยเป็น 70.30 และมีดัชนีไกลซีมิก คือ 78.31 สูงกว่า

ข้าวกล้องที่หุงด้วยไมโครเวฟและหุงโดยการนึ่งที่มีดัชนีการย่อยเป็น 67.43 และ 63.25 และมีดัชนีไกลซีมิก คือ 76.31 และ 74.43 ตามลำดับ และข้าวกล้องที่หุงด้วยไมโครเวฟและหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกสูงกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยการนึ่ง ($p<0.05$) (ตาราง ค6 และค7 ภาคผนวก ค)

ข้าวกล้องที่หุงจากการนึ่งนั้นสุกและสามารถนำมารับประทานได้แต่มีระดับของการเกิด เกลาที่ในเซชันที่ต่ำกว่าตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) เนื่องจากโครงสร้างเม็ดแป้งยังไม่ถูกทำลายทั้งหมดจึงทำให้มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกต่ำ ก่อนหน้านี้ Lee และคณะ (2005) ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณสมบัติทางกายภาพและการย่อยได้ของแป้ง พบว่าข้าวที่หุงโดยใช้ไมโครเวฟและหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีระดับของการเกิดเกลาที่ในเซชันต่ำกว่าข้าวที่หุงด้วยหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ข้าวที่หุงด้วยหม้อนึ่งความดันมีอัตราการย่อยแป้งที่สูงทำให้ระดับกลูโคสในเลือดของสัตว์ทดลองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรายงานคล้ายกันว่าการหุงข้าวด้วยหม้อนึ่งความดันมีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกสูง (Han *et al.*, 2008)

ตาราง 4.4 ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_∞), ค่าคงที่ของสมการ (k), ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI)

วิธีการหุง	C_∞	k^{ns}	HI	GI
ไมโครเวฟ	50.78±0.65 ^b	0.05±0.00	67.43±0.35 ^b	76.73±0.19 ^b
ดั้งเดิม (เช็ดน้ำ)	54.21±0.38 ^a	0.04±0.00	70.30±0.14 ^a	78.31±0.08 ^a
นึ่ง	48.51±0.80 ^b	0.05±0.00	63.25±0.90 ^c	74.43±0.50 ^c
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	53.16±1.23 ^a	0.05±0.00	69.74±1.75 ^{a b}	77.99±0.96 ^{a b}

NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

a, b, c.... ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

4.3.1.7 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง

วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง พบว่าโปรตีนไม่มีความสัมพันธ์ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง ในขณะที่ไขมันมีความสัมพันธ์ทางลบในระดับปานกลาง และค่าความแข็งมีความสัมพันธ์ทางลบในระดับสูงต่อค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อปริมาณไขมัน และค่า hardness ในข้าวกล้องเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างและระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน มีความสัมพันธ์ทางบวกในระดับสูงต่อค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างและระดับการเกิดเจลาตินในเซชันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในตารางที่ 4.5

ตาราง 4.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง

	โปรตีน	ไขมัน	แป้งที่ถูกชะล้าง	Hardness	เจลาตินในเซชัน	HI	GI
โปรตีน	-	0.641*	-0.166	0.406	-0.231	-0.414	-0.414
ไขมัน		-	-0.480	0.701*	-0.374	-0.590*	-0.591*
แป้งที่ถูกชะล้าง			-	-0.756*	0.781*	0.759*	0.760*
Hardness				-	-0.521	-0.751*	-0.751*
เจลาตินในเซชัน					-	0.796*	0.797*
HI						-	1.000*
GI							-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.3.2 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต้มองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกละลาย คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลที่ในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

4.3.2.1 ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต้มองค์ประกอบทางเคมี

โดยนำข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการคัดเฉพาะข้าวเต็มเมล็ดมาหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2, 1:3 และ 1:4 จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า และความชื้น ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6

ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำไม่มีผลต่อปริมาณ โปรตีน ไขมัน เส้นใย และเถ้าของข้าวกล้อง ($p>0.05$) (ตาราง 4.6 ภาคผนวก ก) ข้าวกล้องที่ได้จากการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำทั้งสามระดับมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ ปริมาณ โปรตีนมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8.59-8.87 กรัม/100 กรัม, ไขมันมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.35-2.49 กรัม/100 กรัม, เส้นใยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.73-1.98 กรัม/100 กรัม และเถ้ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.27-1.41 กรัม/100 กรัม

ในขณะที่อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงนั้นมีผลต่อปริมาณความชื้น อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (ตาราง 4.6 ภาคผนวก ง) โดยพบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการหุงโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อข้าว 1:4 มีความชื้นสูงที่สุด เท่ากับ 64.74% รองลงมาคือข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 เท่ากับ 57.73% ส่วนการหุงที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อข้าว 1:2 มีความชื้นต่ำที่สุด เท่ากับ 46.89%

ตาราง 4.6 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต้มองค์ประกอบทางเคมี

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	องค์ประกอบทางเคมี (%)				
	โปรตีน ^{ns}	ไขมัน ^{ns}	เส้นใย ^{ns}	เถ้า ^{ns}	ความชื้น
1:2	8.59±1.07	2.49±0.04	1.97±0.06	1.41±0.01	46.89±1.41 ^c
1:3	8.69±0.58	2.35±0.19	1.73±0.33	1.27±0.16	57.73±1.26 ^b
1:4	8.87±0.59	2.35±0.12	1.98±0.21	1.38±0.09	64.74±1.88 ^a

NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

a, b, c... ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

4.3.2.2 ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อปริมาณแป้งทั้งหมด และแป้งที่ถูกระคาย

วิเคราะห์ปริมาณแป้งทั้งหมดในข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ ที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงนั้นไม่มีผลต่อปริมาณแป้งทั้งหมด ($p>0.05$) (ตาราง ๗ ภาคผนวก ก) ดังตารางที่ 4.7

อัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงนั้นมีผลต่อปริมาณแป้งที่ถูกระคาย อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) (ตาราง ๗ ภาคผนวก ง) พบว่าการหุงข้าวกล้องด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 มีปริมาณแป้งที่ถูกระคายสูงที่สุด คือ 3.98% รองลงมาคือการหุงที่ใช้ อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 มีค่าเป็น 2.03% ส่วนการหุงที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีปริมาณ แป้งที่ถูกระคายต่ำที่สุดเท่ากับ 0.86%

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณแป้งที่ถูกระคายในข้าวกล้องแปรผันตามอัตราส่วน น้ำที่ใช้ การหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าข้าวต้องการปริมาณน้ำที่เพียงพอเพื่อให้เม็ดแป้ง เกิดเจลาติไนเซชันที่สมบูรณ์ เม็ดแป้งที่ได้รับความร้อนในภาวะที่มีปริมาณน้ำมากจะพองตัวทำให้ มีอะไมโลสบางส่วนที่ละลายน้ำได้หลุดออกมานอกเม็ดแป้ง อัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงมีผลต่อ ความพองตัวของเม็ดแป้ง ในปี ค.ศ. 2008 Chung และคณะ ศึกษาผลของความชื้นต่อคุณสมบัติการ เกิดเจล ความสามารถในการย่อยได้และดัชนีไกลซีมิกของแป้งที่ได้จากถั่วชนิดต่าง ๆ และได้ศึกษา ความสามารถในการพองตัวของเม็ดแป้งและอะไมโลสที่ถูกระคายของแป้งถั่ว ผลการทดลองพบว่า ปริมาณอะไมโลสที่ถูกระคายเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิหรือความร้อนที่ให้แก่แป้ง (Chung *et al.*, 2008)

ตาราง 4.7 ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวต่อปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกระคาย

อัตราส่วนข้าวต่อ น้ำ	ปริมาณแป้งทั้งหมด (%) ^{ns} ($\bar{x} \pm SD$)	แป้งที่ถูกระคาย (%) ($\bar{x} \pm SD$)
1:2	82.36 $\pm$ 1.41	0.86 $\pm$ 0.17 ^c
1:3	80.67 $\pm$ 5.19	2.03 $\pm$ 0.16 ^b
1:4	79.26 $\pm$ 1.54	3.98 $\pm$ 0.15 ^a

NS ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

a, b, c, ... ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

4.3.2.3 ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส

ศึกษาอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องที่มีต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของข้าวกล้อง ผลการทดลองพบว่าข้าวกล้องที่หุงโดยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเมื่อใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 ให้ข้าวลักษณะกึ่งดิบกึ่งสุก ภายในเมล็ดข้าวมีลักษณะของไตสีขาวหลงเหลืออยู่ การหุงข้าวกล้องที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 ให้ข้าวที่สุก นุ่ม เหนียว มีลักษณะตรงตามคุณภาพการรับประทาน ส่วนข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 นั้นข้าวที่ได้สุกแต่และไม่น่ารับประทาน

ผลการวิเคราะห์ค่า Hardness หรือความแข็งของข้าวกล้องแสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงนั้นมีผลต่อค่า Hardness อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง10 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้องที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีค่า Hardness สูงที่สุด คือ 14.90 N รองลงมาคือข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 ที่ให้ค่า Hardness เท่ากับ 9.71 N ส่วนข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 มีค่า Hardness ต่ำที่สุดเท่ากับ 6.85 N

จากการวิเคราะห์ค่า Cohesiveness หรือความเกาะติดกันของข้าว และค่า Springiness หรือความยืดหยุ่นของข้าวกล้อง ทั้งนี้พบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องไม่มีผลต่อค่า Cohesiveness และ Springiness ของข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตาราง ก8 ภาคผนวก ก) ผลดังตารางที่ 4.8 พบว่าในข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนน้ำที่แตกต่างกัน มีค่าเฉลี่ยของ Cohesiveness และ Springiness อยู่ในช่วงระหว่าง 0.22-0.26 และ 0.35-0.54 mm ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ค่า Chewiness หรือการเคี้ยว ทั้งนี้พบว่าอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงนั้นมีผลต่อค่า Chewiness อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง11 ภาคผนวก ง) ผลดังตารางที่ 4.8 โดยข้าวกล้องที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีค่า Chewiness เท่ากับ 2.11 Nmm มากกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 ที่มีค่า Chewiness เท่ากับ 0.85 Nmm และ 0.64 Nmm

การที่ข้าวกล้องที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีค่า hardness และ chewiness สูงกว่าตัวอย่างอื่น เนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอสำหรับการเกิดเจลลาตินเซชันให้สมบัติข้าวที่ได้นั้นยังดิบอยู่ จากการรายงานของ Whistler และ Bemiller (1999) กล่าวว่าคุณภาพในการรับประทานของข้าวนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น เวลา อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และการกวนในกระบวนการจะส่งผลต่อความแข็งและคุณลักษณะด้านอื่นๆของข้าว

ตาราง 4.8 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อคุณลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัส

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส			
	<i>Hardness</i> (N)	<i>Cohesiveness</i> ^{ns}	<i>Springiness</i> ^{ns} (mm)	<i>Chewiness</i> (Nmm)
1:2	14.90±0.54 ^a	0.26±0.02	0.54±0.07	2.11±0.39 ^a
1:3	9.71±1.08 ^b	0.25±0.01	0.35±0.18	0.85±0.47 ^b
1:4	6.85±0.86 ^c	0.22±0.01	0.41±0.09	0.64±0.23 ^b

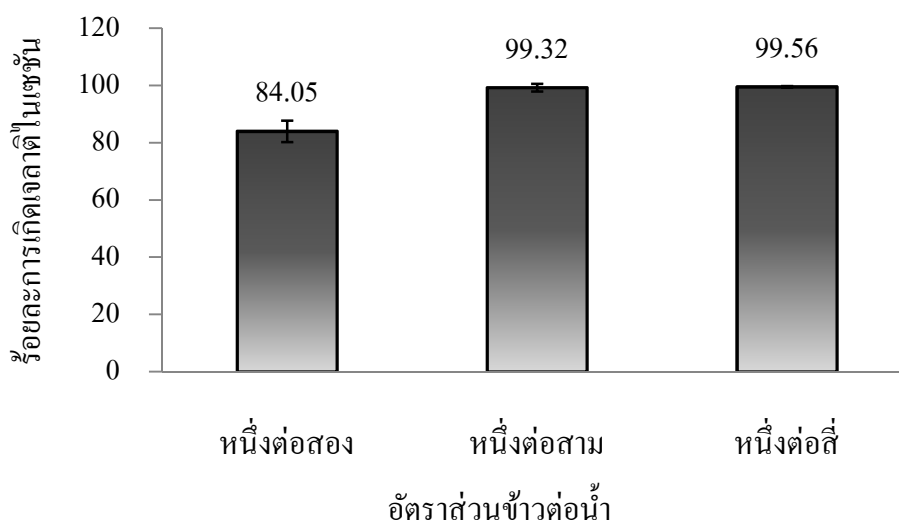
^{ns} ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

^{a, b, c, ...} ตัวเลขที่มีอักษรในแนวตั้งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกันไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

4.3.2.4 ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน (Degree of gelatinization)

ศึกษาผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าต่อระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวกล้อง พบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวมีอิทธิพลต่อระดับการเกิดเจลาตินในเซชันของข้าวกล้อง ($p\leq 0.05$) (ตาราง ง12 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 และ 1:3 มีระดับการเกิดเจลาตินในเซชัน คือ 99.56 และ 99.32 % สูงกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 ที่มีระดับการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำที่สุดคือ 84.05 % ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.3

การที่ข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีระดับของการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำที่สุด อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงมีไม่เพียงพอ จึงส่งผลให้การทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งในเมล็ดข้าวเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ดังที่ Bemiller และ Whistler (1996) กล่าวว่าไว้ว่าการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้ง ต้องมีน้ำและความร้อนเป็นตัวช่วยทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้ง น้ำที่ถูกดูดซึมเข้าไปในเมล็ดแป้งจะไปทำลายโครงสร้างส่วนผลึก ทั้งนี้โครงสร้างส่วนผลึกมีความหนาแน่นสูงจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้ยากกว่าส่วนอื่นของเมล็ดแป้ง

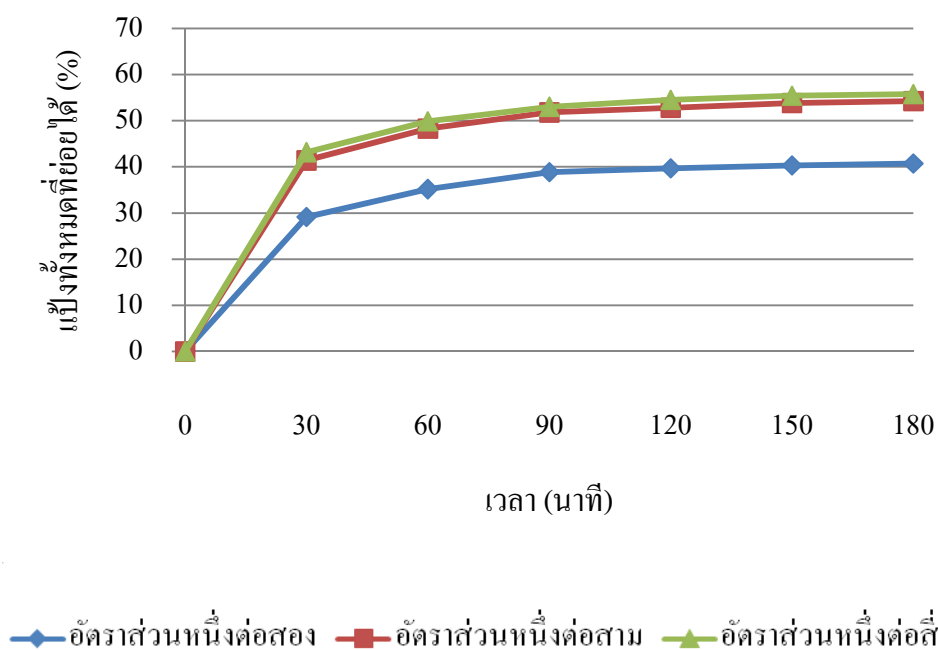


ภาพประกอบ 4.3 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องต่อระดับของการเกิดเจลาติโนเซชัน

4.3.2.5 ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง

ศึกษาผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งที่ 3 ระดับ คือ 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยนำข้าวกล้องหุงสุกที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่อัตราส่วนต่าง ๆ มาวิเคราะห์การย่อยได้ของแป้งที่เวลาต่าง ๆ โดยขั้นแรกจะย่อยโปรตีนในข้าวกล้องด้วยเอนไซม์เปปซิน จากนั้นย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ α -amylase และ amyloglucosidase เพื่อให้เปลี่ยนเป็นกลูโคส สุ่มตัวอย่างออกมาทุก ๆ 30 นาทีเพื่อตรวจวัดปริมาณกลูโคส จนครบ 180 นาที พบว่าข้าวกล้องถูกย่อยอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก โดยมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้สูงถึง 29-43% และหลังจาก 30 นาทีเป็นต้นไป การย่อยได้ของแป้งของข้าวทุกตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จาก 29-43% จนถึงประมาณ 40-55% ที่เวลาการย่อย 180 นาที โดยข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้สูงที่สุด คือมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้เท่ากับ 43.13 % ที่เวลา 30 นาที และมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ 55.76 % ที่เวลา 180 นาที ข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ต่ำที่สุดตลอดระยะเวลาการย่อย คือมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้เท่ากับ 29.17 % ที่เวลา 30 นาที และมีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ 40.73 % ที่เวลา 180 นาที ดังภาพประกอบ 8 เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้ต่ำกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เนื่องจากข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีระดับของการเกิดเจลาติไนเซชันที่ต่ำกว่าที่มีเม็ดแป้งดิบบางส่วนเหลืออยู่จึงไปลดความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง Walker และ Hope (1963) กล่าวว่าเม็ดแป้งดิบถูกย่อยได้ยากกว่าแป้งที่เกิดเจลาติไนเซชันแล้ว เนื่องจากระหว่างการเกิดเจลาติไนเซชันเม็ดแป้งจะมีการพองตัวร่างแหโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง พันธะไฮโดรเจนถูกทำลายเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามากขึ้นในที่สุดการพองตัวนั้นไม่สามารถผันกลับได้ เม็ดแป้งแตกโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินถูกละลายออกมา ลักษณะเช่นนี้ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งเป็นอิสระไม่จับกันเองจึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดี รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ต่าง ๆ ได้ดีขึ้น



ภาพประกอบ 4.4 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องต่อการย่อยได้ของแป้ง

4.3.2.6 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง

นำข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่แตกต่างกันมาวิเคราะห์หาความสามารถในการย่อยได้ของแป้งแล้วนำไปสร้างสมการเอกโปเนนเชียล ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ คือ เปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}) และ ค่าคงที่ (k) โดยใช้สมการที่ 1

จากนั้นนำพารามิเตอร์ทั้งสองไปใช้ในการคำนวณดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกต่อไป ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.9

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล พบว่าอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงนั้นมีผลต่อค่า C_{∞} อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง13 ภาคผนวก ง) โดยข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 มีค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล เท่ากับ 53.16% และ 54.63% ซึ่งมากกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล เท่ากับ 40.08%

จากการคำนวณค่า k คือ ค่าคงที่ของสมการ พบว่าสัดส่วนของน้ำต่อข้าวในการหุงนั้นมีผลต่อค่า k อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตาราง ง14 ภาคผนวก ง) โดยที่ข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 มีค่า k สูงที่สุด เท่ากับ 0.05 ส่วนกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีค่า k ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.04

จากการคำนวณดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกดังสมการที่ 3 พบว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 มีดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกสูงที่สุด ส่วนข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกต่ำที่สุด คือ $HI = 51.41$ และ $GI = 67.94$ จัดอยู่ในกลุ่มที่มีดัชนีไกลซีมิกปานกลาง ซึ่งมีค่าแตกต่างจากข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตาราง ง15 และ ง16 ภาคผนวก ง)

ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีระดับการเกิดเจลาคีโนเซชันต่ำที่สุด ทำให้มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกต่ำกว่าตัวอย่างอื่นด้วย สอดคล้องกับการรายงานจากลักษณะของเม็ดแป้งดิบที่มีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐานเรียงตัวกันหนาแน่นไม่มีรู หรือช่องเปิดที่จะให้เอนไซม์เข้าทำงานมีผลให้เอนไซม์เข้าไปย่อยเม็ดแป้งได้ยาก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ตาราง 4.9 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงข้าวกล้องต่อเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k), ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI)

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	C_{∞}	k	HI	GI
1:2	40.08±0.13 ^b	0.04±0.00 ^b	51.41±0.40 ^b	67.94±0.22 ^b
1:3	53.16±1.23 ^a	0.05±0.00 ^a	69.74±1.75 ^a	77.99±0.96 ^a
1:4	54.63±0.88 ^a	0.05±0.00 ^a	71.97±1.20 ^a	79.22±0.66 ^a

^{a, b, c, ...} ตัวเลขที่มีอักษรในแนวดิ่งเดียวกันอักษรกำกับเหมือนกัน ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.3.2.7 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง พบว่าความชื้น แป้งที่ถูกชะล้างมีความสัมพันธ์ทางบวกในระดับสูงมาก และระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน มีความสัมพันธ์ทางบวกในระดับสูง ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อความชื้น แป้งที่ถูกชะล้าง และระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่า Hardness และ Chewiness นั้นมีความสัมพันธ์ทางลบในระดับสูงต่อดัชนีการย่อย และดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อค่า Hardness และ Chewiness เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังตารางที่ 4.10

ตาราง 4.10 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ต่อความสามารถในการย่อยได้ของ
แป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง

	ความชื้น	แป้งที่ถูกระคาย	Hardness	Chewiness	เจลาตินในเซชัน	HI	GI
ความชื้น	-	0.942*	0.942*	-0.858*	0.902*	0.951*	0.951*
แป้งที่ถูกระคาย		-	1.000*	-0.797*	0.745*	0.831*	0.831*
Hardness			-	-0.797*	0.745*	0.831*	0.831*
Chewiness				-	-0.833*	-0.898*	-0.898*
เจลาตินในเซชัน					-	-0.966*	-0.966*
HI						-	1.000*
GI							-

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวกล้องจากข้าวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกระงับ คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก โดยมีวิธีการหุงข้าว 4 วิธี ได้แก่ การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า การหุงโดยการนึ่ง การหุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และการหุงด้วยไมโครเวฟ ตอนที่ 2 ศึกษาผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกระงับ คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เมื่อใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 3 ระดับ คือ 1:2 1:3 และ 1:4 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลของการหุงข้าวด้วยวิธีต่าง ๆ ต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกระงับ คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิก

จากผลการทดลองพบว่าวิธีการหุงไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย ความชื้น แป้งทั้งหมด ค่า Cohesiveness ค่า Springiness ค่า Chewiness ของข้าวกล้อง ($p>0.05$) แต่มีผลต่อปริมาณเถ้า ปริมาณแป้งที่ถูกระงับ ค่า Hardness ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก โดยที่ข้าวที่หุงด้วยไมโครเวฟ และการนึ่งมีปริมาณเถ้ามากกว่าข้าวที่หุงด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) และจากการหุงข้าวทั้ง 4 วิธีพบว่าข้าวที่หุงโดยไมโครเวฟ หุงด้วยวิธีดั้งเดิม และหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า มีปริมาณแป้งที่ถูกระงับสูงกว่าข้าวที่หุงโดยการนึ่ง ซึ่งข้าวกล้องที่หุงด้วยการนึ่งมีปริมาณแป้งที่ถูกระงับต่ำที่สุด คือ 1.34 % แตกต่างจากตัวอย่างข้าวที่หุงด้วยวิธีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ในส่วนของคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสพบว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยไมโครเวฟและการนึ่งมีค่า Hardness มากกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีดั้งเดิม(แบบเช็ดน้ำ) และข้าวที่หุงด้วยการนึ่งมีค่าความแข็งมากกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ($p<0.05$) ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน พบว่าข้าวกล้องที่หุงโดยวิธีไมโครเวฟ, วิธีดั้งเดิม (เช็ดน้ำ)

และหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามี ระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน อยู่ในช่วง 99.39-99.89 % ซึ่งสูงกว่าข้าวที่ได้จากการหุงด้วยการนึ่งซึ่งมีระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันต่ำที่สุด คือ 90.96 % ($p \leq 0.05$) ผลของวิธีการหุงข้าวกล้องต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก พบว่าข้าวกล้องที่หุงโดยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ) มีดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกสูงกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยไมโครเวฟและหุงโดยการนึ่ง และข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกสูงกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยการนึ่ง

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง พบว่าไขมันและค่า Hardness มีสหสัมพันธ์ทางลบต่อค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างและระดับการเกิดเจลลิตีในเซชัน มีสหสัมพันธ์ทางบวกต่อค่าดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าการหุงโดยการนึ่ง ซึ่งทำได้โดยการต้มข้าวในหม้อนึ่งให้เดือดจากนั้นนำข้าวใส่ภาชนะสเตนเลส อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:1.25 และนึ่งเป็นเวลา 30 นาที โดยอุณหภูมิสูงสุดในการนึ่งเป็น 100°C เป็นวิธีการหุงข้าวที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากข้าวกล้องที่หุงได้จากวิธีนี้มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกต่ำ ซึ่งทำให้วิธีการหุงข้าวนี้เป็นทางเลือกในการหุงข้าวสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานและผู้ที่มีความอ้วน

5.1.2 ผลของอัตราส่วนของข้าวต่อน้ำในการหุงต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณแป้งทั้งหมด ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง คุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ความสามารถในการย่อยได้ของแป้ง และดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวกล้องด้วยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้านั้นไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เส้นใย เถ้า ปริมาณแป้งทั้งหมด ค่า Cohesiveness และค่า Springiness ของข้าวกล้อง ($p > 0.05$) แต่มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง ค่า Hardness ค่า Chewiness ระดับของการเกิดเจลลิตีในเซชัน ดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิก โดยความชื้นของข้าวแปรผันตามปริมาณน้ำที่ใช้ ข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 มีความชื้นสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:2 ตามลำดับ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกันข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 มีปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:2 ตามลำดับ ด้านคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสพบว่าการหุงข้าวกล้องโดยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 ข้าวที่ได้มีลักษณะกึ่งสุกกึ่งดิบ มีค่า Hardness และ Chewiness สูงกว่าตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ข้าวกล้องที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีความแข็งมากที่สุด รองลงมาคือข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ

1:3 และ 1:2 ตามลำดับ การหุงข้าวกล้องที่ใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 ข้าวที่ได้นั้นนุ่ม เหนียว มีลักษณะตรงตามคุณภาพการรับประทาน ส่วนข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4 นั้น ข้าวที่ได้สุก แต่ละเอียด และไม่น่ารับประทาน ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อระดับ การเกิดเจลลิตินในเซชัน พบว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 มีระดับการเกิด เจลลิตินในเซชันสูงกว่าข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 ($p \leq 0.05$) ผลของอัตราส่วนข้าวต่อ น้ำในการหุงต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิก พบว่าปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงนั้นมีผลต่อดัชนีการ ย่อยและดัชนีไกลซีมิก คือข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2 มีดัชนีการย่อยและดัชนี ไกลซีมิกต่ำที่สุด คือ $HI = 51.41$ และ $GI = 67.94$ จัดอยู่ในกลุ่มที่มีดัชนีไกลซีมิกปานกลาง ซึ่งมีค่าแตกต่างจากข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3 และ 1:4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ต่อดัชนี การย่อยและดัชนีไกลซีมิกของข้าวกล้อง พบว่าความชื้น แป้งที่ถูกหะล้าง และระดับการเกิด เจลลิตินในเซชัน มีสหสัมพันธ์ทางบวกต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิกอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่า Hardness และ Chewiness นั้นมีสหสัมพันธ์ทางลบต่อดัชนีการย่อยและดัชนีไกลซีมิก อย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

การเลือกวิธีการหุงข้าวที่มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกต่ำเป็น อีกทางเลือกหนึ่งแก่ผู้บริโภคโดยเฉพาะกลุ่มที่เป็นโรคเกี่ยวกับระดับของน้ำตาลในเลือด

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

5.2.2.1 ควรมีการนำไปวิจัยและพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอาหาร เช่น พัฒนาให้เป็น ผลิตภัณฑ์ข้าวแปรรูปหุงสุกที่มีความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิกต่ำซึ่งเป็น ประโยชน์ในทางการค้าได้

5.2.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซี มิกในข้าวสายพันธุ์อื่น หรือข้าวที่ผ่านการขัดสี

5.2.2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงที่ระดับต่าง ๆ ในสัดส่วนที่ ละเอียดยิ่งขึ้นต่อความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและดัชนีไกลซีมิก

5.2.2.4 พัฒนาวิธีการหุงที่สามารถลดความสามารถในการย่อยได้ของแป้งและ ดัชนีไกลซีมิก

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ และกล้านรงค์ ศรีรอต. (2554). มารู้จักแป้งสุขภาพ (Resistant Starch) กันเถอะ. *สตาร์ช*, 1 (1), 4-5.
- นิธิยา รัตนปนนท์. (2549). *เคมีอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
- วิไลลักษณ์ สมมุติ. (2545). *ลักษณะและคุณค่าพันธุ์ข้าวพื้นเมืองไทย*. ปราจีนบุรี: สำนักพิมพ์จิรวัดน์ เอ็กซ์เพรส.
- ศิริธร ศิริอมรพรรณ. (2549). *เทคโนโลยีพืชและรากพืช*. มหาสารคาม: คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- สุริยา อติวิทยากรณ์, กมลวรรณ แจ่มชัด, อนุวัตร แจ่มชัด. (2550) *การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการ อบแห้งกล้วยตากแบบลมร้อนร่วมกับการอบแห้งด้วยคลื่น ไมโครเวฟระบบสุญญากาศ. ใน : การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 4. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 612-620.*
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2550). *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2538). *เคมีทางัญญาหาร*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Anderson, J. W., & Bridges, S. R. (1998). Dietary fiber content of selected foods. *American Society for Clinical Nutrition*, 47, 440-447.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. 17 th ed. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemical.
- Bao, J., Sun,M., Zhu,L. & Corke,H. (2004). Analysis of quantitative trait loci for some starch properties of rice (*Oryza sativa* L.): thermal properties, gel texture and swelling volume. *Cereal Science*, 39, 379-385.
- Bemiller, J.N. and Whistler, R.I. (1996). *Carbohydrates*. In Food Chemistry. 3 rd ed. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Birch, G. G., and Priestley, R. J. (1973). Degree of gelatinization of cooked rice. *Die Starke*, 25 (3), 98-101.

- Cheng, F.M., Zhong, L.J., Wang, F. & Zhang, G.P. (2005). Differences in cooking and eating properties between chalky and translucent parts in rice grains. *Food Chemistry*, 90, 39-46.
- Chrastil, J. (1990). Protein-Starch Interactions in Rice Grains. Influence of Storage on Oryzenin and Starch. *J. Agric. Food Chem*, 38, 1804-1809.
- Chung, H.J., Lim, H.S., & Lim, S.T., (2006). Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch. *Journal of Cereal Science*, 43, 353–359.
- Chung, H. J., Liu, Q., Hoover, R., Warkentin, T. D., & Vandenberg, B. (2008). In vitro starch digestibility, expected glycemic index, and thermal and pasting properties of flours from pea, lentil and chickpea cultivars. *Food Chemistry*, 111, 316–321.
- Frei, M., Siddhuraju, P., & Becker, K. (2003). Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. *Food Chemistry*, 83, 395-402.
- Goni, I., Garcia-Alonso, A., Saura-Calixto, F., (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition Research*, 17, 427–437.
- Goni, I., Garcia-Diz, L., Manas, E., & Saura-Calixto, F., (1996). Analysis of resistant starch: a method for foods and food products. *Food Chemistry*, 56, 445–449.
- Han, S. H., Lee, S. W., & Chul R. (2008). Effects of cooking methods on starch hydrolysis kinetics and digestion-resistant fractions of rice and soybean. *European Food Research and Technology*, 227, 1315-1321.
- Hoover, R., & Vasanathan, T. (1994). The effect of annealing on the physicochemical properties of wheat, oat, potato and lentil starches. *Journal of Food Biochemistry*, 17, 303 -325.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z., & Wu, D. (2004). Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *Journal of Cereal Science*, 40, 231-237.
- Jaisut, D., Prachayawarakorn, S., Varanyanond, W., Tungtrakul, P., & Saponronnarit, S. (2008). Effects of drying temperature and tempering time on starch digestibility of brown fragrant rice. *Journal of Food Engineering*, 86, 251-258.
- Jayakody, L., Hoover, R., Liu, Q., & Weber, E. (2005). Studies on tuber and root starches. I. Structure and physicochemical properties of Innala (*Solenostemon rotundifolius*) starches grown in Sri Lanka. *Food Research International*, 38, 615–629.

- Juliano, B.O. (1985). *Rice : Chemistry and technology*. 2 nd ed. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Juliano, B.O. (1993). *Rice in Human Nutrition*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Kohlwey, D.E. (1994). New methods for the evaluation of rice quality and related terminology. In *Rice Science and Technology*. New York: Maecel Dekker, Inc.
- Lee, S. G., Lee, J.H., Han, S.H., Lee, J.W., & Rhee, C. (2005). Effect of Various Processing Methods on the Physical Properties of Cooked Rice and on *in vitro* Starch Hydrolysis and Blood Glucose Response in Rats. *Starch/Stärke*, 57, 531–539.
- Lund, D. (1984). Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 20, 73-249.
- Mahadevamma, S., & Tharanathan, R. N. (2007). Processed rice starch characteristics and morphology. *European Food Research and Technology*, 225, 603-612.
- Miller, J. B., Pang, D., & Bramall, L. (2011). Rice: a high or low glycemic index food. *Am J Clin Nutr*, 56, 1034-1036.
- Poewll, K. F., Holt, S. H., & Brand-Miller, J.C. (2002). International table of glycemic index and glycemic load values. *American Society for Clinical Nutrition*, 76, 5-56.
- Whistler, R. L. and Bemiller, J. N. (1999). *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists*. St. Paul, Minnesota: Eagan Press.
- R. Rendón-Villalobos, E. Agama-Acevedo, J.J. Islas-Hernández, J. Sánchez-Muñoz, & L.A. Bello-Pérez. (2006). In vitro starch bioavailability of corn tortillas with hydrocolloids. *Food Chemistry*, 97, 631-636.
- Sánchez-Pardo, M. E., Alicia, O., Rosalva, M., & Hugo, N. (2007). In vitro Starch Digestibility and Predicted Glycemic Index of Microwaved and Conventionally Baked Pound Cake. *Plant Foods for Human Nutrition*, 62, 99-105.
- Sagum, R., & Arcot, J. (2000). Effect of domestic processing methods on the starch, non-starch polysaccharides and in vitro starch and protein digestibility of three varieties of rice with varying levels of amylose. *Food Chemistry*, 70, 107-111.
- Thompson, S., & Thompson, A. (1990). In home pasteurization of raw goat's milk by microwave treatment. *Int. J. Food Microbiol*, 10, 59-64.

- Vandeputte, G.E., & Delcour, J.A. (2004). From sucrose to starch granule to starch physical behaviour: a focus on rice starch. *Carbohydrate Polymer*, 58, 245-266.
- Walker, G.J. & Hope, P.M. (1963) The Action of Some Alpha Amylases on Starch Granules. *Biochem. J.*, 86, 452-462.
- Williams, P. C., Kuzina, F. D., & Hlynka, I. (1970). A rapid colorimetric procedure for estimating the amylose content of starches and flours. *Cereal Chemistry*, 47, 411–420.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลของอัตราส่วนข้าวต่อน้ำในการหุงต่อลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า



ภาพประกอบ ก 1 ลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2



ภาพประกอบ ก 2 ลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3



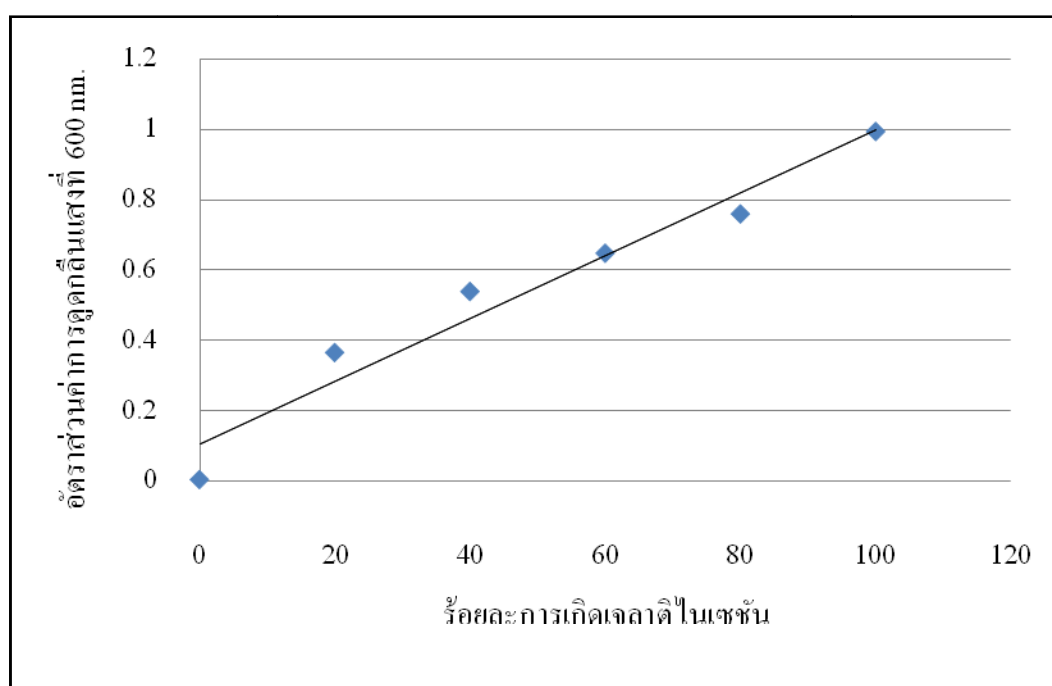
ภาพประกอบ ก 3 ลักษณะของข้าวกล้องที่หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4

ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐานระดับการเกิดเจลาตีในเซชันของข้าวกล้องจากข้าวสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ตาราง ข 1 การประเมินระดับของการเกิดเจลลาติโนเซชันด้วยวิธี Differential alkaline solubility
ในการสร้างกราฟมาตรฐาน

ร้อยละการเกิด เจลลาติโนเซชัน	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตร		อัตราส่วนของค่า การดูดกลืนแสง
	0.2M KOH	0.5M KOH	
0	0.003	0.478	0.006
20	0.194	0.527	0.368
40	0.488	0.901	0.542
60	0.540	0.830	0.651
80	0.627	0.822	0.763
100	0.889	0.891	0.998



$$y = 0.008x + 0.108 \quad R^2 = 0.954$$

ภาพประกอบ ข 1 กราฟมาตรฐานของระดับการเกิดเจลลาติโนเซชันของข้าวกล้องดอกมะลิ 105

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตาราง ค 1 การเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. ปริมาณโปรตีน					
วิธีการหุง	6.273	3	2.091	4.062	0.050
ความคลาดเคลื่อน	4.119	8	0.515		
รวม	10.391	11			
2. ปริมาณไขมัน					
วิธีการหุง	0.192	3	0.064	3.066	0.091
ความคลาดเคลื่อน	0.167	8	0.020		
รวม	0.360	11			
3. ปริมาณเส้นใย					
วิธีการหุง	0.269	3	0.089	0.834	0.512
ความคลาดเคลื่อน	0.860	8	0.108		
รวม	1.130	11			
4. ปริมาณเถ้า					
วิธีการหุง	0.220	3	0.073	7.867	0.009*
ความคลาดเคลื่อน	0.074	8	0.009		
รวม	0.295	11			
5. ปริมาณความชื้น					
วิธีการหุง	16.017	3	5.339	1.194	0.372
ความคลาดเคลื่อน	35.784	8	4.473		
รวม	51.801	11			

ตาราง ค 2 เปรียบเทียบปริมาณปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกระหว่างในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. ปริมาณแป้งทั้งหมด					
วิธีการหุง	3.789	3	1.263	0.099	0.958
ความคลาดเคลื่อน	101.942	8	12.743		
รวม	105.731	11			
2. ปริมาณแป้งที่ถูกระหว่าง					
วิธีการหุง	0.813	3	0.271	12.354	0.002*
ความคลาดเคลื่อน	0.176	8	0.021		
รวม	0.989	11			

ตาราง ค 3 เปรียบเทียบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. ความแข็ง (Hardness)					
วิธีการหุง	29.182	3	9.727	8.928	0.006*
ความคลาดเคลื่อน	8.717	8	1.090		
รวม	37.899	11			
2. ความเกาะติดกัน (Cohesiveness)					
วิธีการหุง	0.0001	3	0.00005	0.548	0.663
ความคลาดเคลื่อน	0.0008	8	0.0001		
รวม	0.0010	11			
3. ความยืดหยุ่น (Springiness)					
วิธีการหุง	0.084	3	0.028	1.393	0.314
ความคลาดเคลื่อน	0.163	8	0.020		
รวม	0.248	11			
4. การเคี้ยว (Chewiness)					
วิธีการหุง	0.883	3	0.294	1.898	0.208
ความคลาดเคลื่อน	1.241	8	0.155		
รวม	2.124	11			

ตาราง ค 4 เปรียบเทียบระดับของการเกิดเจลลาทีโนเซชันในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
ระดับของการเกิดเจลลาทีโนเซชัน					
วิธีการหุง	168.764	3	56.255	16.036	0.001*
ความคลาดเคลื่อน	28.064	8	3.508		
รวม	196.828	11			

ตาราง ค 5 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k),
ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞})					
วิธีการหุง	58.399	3	19.466	28.592	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	5.447	8	0.681		
รวม	63.845	11			
2. ค่าคงที่ของสมการ (k)					
วิธีการหุง	0.00016	3	0.000055	2.222	0.163
ความคลาดเคลื่อน	0.00020	8	0.000025		
รวม	0.00036	11			
3. ดัชนีการย่อย (HI)					
วิธีการหุง	92.429	3	30.810	30.681	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	8.034	8	1.004		
รวม	100.462	11			
4. ดัชนีไกลซีมิก (GI)					
วิธีการหุง	27.897	3	9.299	30.675	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	2.425	8	0.303		
รวม	30.322	11			

ตาราง ค 6 การเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. ปริมาณโปรตีน					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.121	2	0.0604	0.099	0.907
ความคลาดเคลื่อน	3.648	6	0.608		
รวม	3.769	8			
2. ปริมาณไขมัน					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.0401	2	0.0200	1.086	0.396
ความคลาดเคลื่อน	0.111	6	0.0184		
รวม	0.151	8			
3. ปริมาณเส้นใย					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.109	2	0.0546	1.057	0.404
ความคลาดเคลื่อน	0.310	6	0.0517		
รวม	0.420	8			
4. ปริมาณเถ้า					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.0314	2	0.0157	1.378	0.322
ความคลาดเคลื่อน	0.0685	6	0.0114		
รวม		8			
5. ปริมาณความชื้น					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	485.434	2	242.717	102.082	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	14.266	6	2.378		
รวม	499.700	8			

ตาราง ค 7 เปรียบเทียบปริมาณปริมาณแป้งทั้งหมดและแป้งที่ถูกชะล้างในข้าวกล้องที่หุงด้วย
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. ปริมาณแป้งทั้งหมด					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	14.458	2	7.229	0.691	0.537
ความคลาดเคลื่อน	62.733	6	10.455		
รวม	77.191	8			
2. ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้าง					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	14.867	2	7.433	287.870	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	0.155	6	0.0258		
รวม	15.022	8			

ตาราง ค 8 เปรียบเทียบคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ
แตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. ความแข็ง (Hardness)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	99.935	2	49.967	68.428	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	4.381	6	0.730		
รวม	104.316	8			
2. ความเกาะติดกัน (Cohesiveness)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.00208	2	0.00104	5.089	0.051
ความคลาดเคลื่อน	0.00123	6	0.00020		
รวม	0.00332	8			
3. ความยืดหยุ่น (Springiness)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.05933	2	0.02966	1.938	0.224
ความคลาดเคลื่อน	0.09184	6	0.01531		
รวม	0.151	8			
4. การเคี้ยว (Chewiness)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	3.805	2	1.902	13.380	0.006*
ความคลาดเคลื่อน	0.853	6	0.142		
รวม	4.658	8			

ตาราง ค 9 เปรียบเทียบระดับของการเกิดเจลลิตีไนเซชันในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ
แตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
ระดับของการเกิดเจลลิตีไนเซชัน					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	473.791	2	236.895	53.738	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	26.450	6	4.408		
รวม	500.241	8			

ตาราง ค 10 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞}), ค่าคงที่ของสมการ (k),
ดัชนีการย่อย (HI) และดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำ
แตกต่างกัน โดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p
1. การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_{∞})					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	384.659	2	192.329	248.748	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	4.639	6	0.773		
รวม	389.298	8			
2. ค่าคงที่ของสมการ (k)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	0.00012	2	0.00006	95.176	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	0.000004	6	0.00000		
รวม	0.00013	8	06		
3. ดัชนีการย่อย (HI)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	763.309	2	381.654	246.167	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	9.302	6	1.550		
รวม	772.611	8			
4. ดัชนีไกลซีมิก (GI)					
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ	230.097	2	115.049	245.959	0.000*
ความคลาดเคลื่อน	2.807	6	0.468		
รวม	232.904	8			

ภาคผนวก ง
การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่

ตาราง ง 1 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ปริมาณเก่าในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		2	4	3	1
	ค่าเฉลี่ย	1.06	1.27	1.34	1.42
2	1.06	-	0.132	0.042*	0.012*
4	1.27		-	0.850	0.385
3	1.34			-	0.814

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 2 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		3	1	2	4
	ค่าเฉลี่ย	1.34	1.80	1.92	2.03
3	1.34	-	0.035*	0.011*	0.004*
1	1.80		-	0.830	0.368
2	1.92			-	0.818

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 3 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของความแข็ง (Hardness) ในข้าวกล้อง
ที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		2	4	1	3
	ค่าเฉลี่ย	9.36	9.71	12.56	12.73
2	9.36	-	0.982	0.036*	0.028*
4	9.71		-	0.061	0.047*
1	12.56			-	0.998

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 4 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของระดับการเกิดเจลลาตินในเซชันใน
ข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		3	1	4	2
	ค่าเฉลี่ย	90.96	99.36	99.56	99.89
3	90.96	-	0.004*	0.004*	0.003*
1	99.36		-	1.000	0.990
4	99.56			-	0.997

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 5 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล
(C_□) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		3	1	4	2
	ค่าเฉลี่ย	48.51	50.78	53.16	54.21
3	48.51	-	0.059	0.001*	0.000*
1	50.78		-	0.047*	0.007*
4	53.16			-	0.521

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 6 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าดัชนีการย่อย (HI) ในข้าวกล้อง
ที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		3	1	4	2
	ค่าเฉลี่ย	63.25	67.43	69.74	70.30
3	63.25	-	0.007*	0.000*	0.000*
1	67.43		-	0.121	0.049*
4	69.74			-	0.922

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 7 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าดัชนีไกลซีมิก (GI) ในข้าวกล้อง
ที่หุงด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการหุงข้าว		3	1	4	2
	ค่าเฉลี่ย	74.43	76.73	77.99	78.31
3	74.43	-	0.007*	0.000*	0.000*
1	76.73		-	0.122	0.049*
4	77.99			-	0.919

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ

1 การหุงข้าวด้วยไมโครเวฟ

2 การหุงข้าวด้วยวิธีดั้งเดิม (แบบเช็ดน้ำ)

3 การหุงด้วยการนึ่ง

4 การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

ตาราง ง 8 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของปริมาณความชื้นในข้าวกล้องที่หุงด้วย
อัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	2	3
	ค่าเฉลี่ย	46.89	57.73	64.74
1	46.89	-	0.000*	0.000*
2	57.73		-	0.004*

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 9 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของปริมาณแป้งที่ถูกชะล้างในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	2	3
	ค่าเฉลี่ย	0.86	2.03	3.98
1	0.86	-	0.000*	0.000*
2	2.03		-	0.000*

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 10 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของความแข็ง (Hardness) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		3	2	1
	ค่าเฉลี่ย	6.85	9.71	14.90
3	6.85	-	0.018*	0.000*
2	9.71		-	0.001*

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 11 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของการเคี้ยว (Chewiness) ในข้าวกล้อง
ที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		3	2	1
	ค่าเฉลี่ย	0.64	0.85	2.11
3	0.64	-	0.802	0.009*
2	0.85		-	0.018*

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 12 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของระดับการเกิดเจลลาตินในเซชันใน
ข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	3	2
	ค่าเฉลี่ย	84.05	99.56	99.32
1	84.05	-	0.000*	0.000*
3	99.56		-	0.990

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 13 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของเปอร์เซ็นต์การย่อยแป้ง ณ จุดสมดุล (C_□) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	2	3
	ค่าเฉลี่ย	40.08	53.16	54.63
1	40.08	-	0.000*	0.000*
2	53.16		-	0.205

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 14 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าคงที่ของสมการ (k) ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	2	3
	ค่าเฉลี่ย	0.04	0.05	0.05
1	0.04	-	0.000*	0.000*
2	0.05		-	0.118

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 15 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าคงที่ของดัชนีการย่อย (HI)
ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	2	3
	ค่าเฉลี่ย	51.41	69.74	71.97
1	51.41	-	0.000*	0.000*
2	69.74		-	0.170

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง ง 16 การเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยรายคู่ของค่าคงที่ของดัชนีไกลซีมิก (GI)
ในข้าวกล้องที่หุงด้วยอัตราส่วนข้าวต่อน้ำแตกต่างกันโดยวิธีหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ		1	2	3
	ค่าเฉลี่ย	67.94	77.99	79.22
1	67.94	-	0.000*	0.000*
2	77.99		-	0.170

* มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ

- 1 การหุงข้าวกล้องด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:2
- 2 การหุงข้าวกล้องด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:3
- 3 การหุงข้าวกล้องด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ 1:4

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นางสาวณัชชา คาวมุกดา
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2530
จังหวัด และประเทศที่เกิด	มุกดาหาร
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2542	ประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนอนุบาลมุกดาหาร อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
พ.ศ. 2548	มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร
พ.ศ. 2552	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ. 2554	ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.ม.) สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่ง สถานที่ทำงาน	-
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	บ้านเลขที่ 162/11 ถนนพิทักษ์พนมเขต อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร 49000
ทุนวิจัย หรือทุนการศึกษา	ทุนประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปี 2554 ทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554