ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกรดแกมมา-แอมิโนบิวทิริก องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้
และคุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 หุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

นายวัฒนา ธรรมบัญชา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF TEMPERATURE ON GAMMA-AMINOBUTYRIC ACID CONTENT, VOLATILE COMPONENTS AND QUALITY OF COOKED GERMINATED BROWN RICE CHAI NAT 1 IN RETORT POUCH

Mr. Wattana Tammabancha

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology
Department of Food Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกรดแกมมา-แอมิโนบิวทิริก องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้และคุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 หุงสุกในรีทอร์ตเพาช์
โดย	นายวัฒนา ธรรมบัญชา
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.นินนาท ชินประหัษฐ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภา คงเป็นสุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตุลยธัญ)

วัฒนา ธรรมบัญชา : ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกรดแกมมา-แอมิโนบิวทิริก องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้และคุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 หุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ (EFFECTS OF TEMPERATURE ON GAMMA-AMINOBUTYRIC ACID CONTENT,VOLATILE COMPONENTS AND QUALITY OF COOKED GERMINATED BROWN RICE CHAI NAT 1 IN RETORT POUCH) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ, รศ. ดร.นินนาท ชินประหัษฐ์, 71 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแปรรูปด้วยความร้อน ต่อปริมาณกาบา องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ สมบัติทางเคมีกายภาพ และทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอก และการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกพร้อมบริโภคบรรจุในรีทอร์ตเพาช์ โดยแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อเป็น 115, 118 และ 121 $^{\circ}$C กำหนดค่า F_0 = 4 นาที พบว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ ที่อุณหภูมิฆ่าเชื้อ 121 $^{\circ}$C มีปริมาณกาบาสูงที่สุด เมื่อศึกษาคุณภาพข้าวกล้องงอกหุงสุก พบว่าการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 115 และ118 $^{\circ}$C ให้ข้าวกล้องงอกมีค่าสี ค่าดัชนีความขาว (WI) และค่าความแข็งของข้าวหุงสุกที่ใกล้เคียงกัน แต่จากการประเมินจากลักษณะปรากฏ พบว่าตัวอย่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 118 $^{\circ}$C มีลักษณะปรากฏที่ดีกว่าตัวอย่างอื่น คือ เมล็ดข้าวสุกอย่างทั่วถึง ไม่แข็ง หรือเละ จึงเลือกสภาวะการฆ่าเชื้อที่ 118 $^{\circ}$C ค่า F_0 = 4 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้องหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปริมาณกาบา และค่า WI ของข้าวกล้องงอกหุงสุกลดลง แต่ค่าความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของสารที่ระเหยได้ ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมทรี (GC-MS) พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปริมาณ hexanal (green, grass like odor) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งต่างจากปริมาณของ dimethyl sulfide (cooked corn odor) ที่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากการทดสอบทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าคะแนนด้านความเข้มของสี กลิ่นหืน และความแข็ง-นุ่ม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากคะแนนด้านกลิ่นธัญพืชที่มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....
ปีการศึกษา 2559	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....
	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

5672085123 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY
KEYWORDS: GABA / VOLATILE COMPONENTS / GERMINATED BROWN RICE / RETORT POUCH

WATTANA TAMMABANCHA: EFFECTS OF TEMPERATURE ON GAMMA-AMINOBUTYRIC ACID CONTENT,VOLATILE COMPONENTS AND QUALITY OF COOKED GERMINATED BROWN RICE CHAI NAT 1 IN RETORT POUCH. ADVISOR: INTHAWOOT SUPPAVORASATIT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SAIWARUN CHAIWANICHSIRI, Ph.D., ASSOC. PROF. NINNART CHINPRAHAST, Ph.D., 71 pp.

This research was aimed to study the effect of high-temperature on gamma-amino butyric acid (GABA) content, volatile components, physicochemical, and sensory properties of germinated brown rice (GBR), and to study the changes of cooked GBR in retort pouch during storage. The GBR was cooked and sterilized at 115, 118 and 121 $^{\circ}$C (F_0 = 4 minutes). It was found that the highest GABA content was observed in cooked GBR at 121 $^{\circ}$C. The results from cooking quality test showed that color, whiteness index (WI) and hardness of the cooked GBR at 115 and 118 $^{\circ}$C were not different. However, the cooked at 118 $^{\circ}$C GBR showed better appearance (thoroughly cooked, not hard or mushy) compared to other conditions. From the storage test of the GBR cooked at 118 $^{\circ}$C for 6 months, it was evident that the GABA content and WI decreased but the hardness increased ($p \leq 0.05$) with storage time. From the study of volatile components and their contents using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technique, it was found that hexanal (green, grass like odor) increased during storage, while dimethyl sulfide (cooked corn odor) decreased significantly ($p \leq 0.05$). The sensory study showed that the intensity of color, rancid odor and hardness–softness scores were increased, whereas the cereal-like odor was decreased ($p \leq 0.05$) during storage.

Department:	Food Technology	Student's Signature .....
Field of Study:	Food Technology	Advisor's Signature .....
Academic Year:	2016	Co-Advisor's Signature .....
		Co-Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อินทาวุธ สรรพวรสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สายวรุฬ ชัยวานิชศิริ และรองศาสตราจารย์ ดร.นินนาท ชินประหัษฐ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ทั้งสามท่านกรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์และเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาวิจัย ตลอดจนตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ รวมทั้งได้อบรมสั่งสอนให้มีความรอบคอบ รับผิดชอบต่อหน้าที่ และตั้งใจปฏิบัติงานทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกูล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภา คงเป็นสุข และศาสตราจารย์ ดร.วรรณา ตุลยธัญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร. สุมิตรา บุญบำรุง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่อนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ และ เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี-แมสสเปคสเปคโทรมิเตอร์ (GC-MS)

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าทั้งในด้านวิชาการและจริยธรรม

ขอขอบคุณทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 27 ครั้งที่ 2/2558 และทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (RES560530049) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัย

ขอบคุณพี่ น้องและเพื่อนๆ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดมา รวมถึงเจ้าหน้าที่ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านสำหรับการอำนวยความสะดวกในการวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ได้สั่งสอนให้ผู้วิจัยมีความอดทน มุ่งมั่น ให้กำลังใจและความห่วงใยพร้อมทั้งสนับสนุนในด้านทุนทรัพย์ให้แก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่1 บทนำ 1

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์ 3

บทที่ 3 วัตถุดิบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง 18

3.1 การเตรียมตัวอย่าง 20

3.2 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก 20

3.3 ศึกษาสภาวะในการหุงและการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เซชันทางการค้าของข้าวกล้องงอก 22

3.4 ศึกษาผลของการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เซชันทางการค้าต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุก และปริมาณกาบา 22

3.5 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ 25

3.6 การวางแผนการทดลองทางสถิติ 27

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 28

4.1 คุณภาพของข้าวกล้องงอก 28

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก 29

4.3 สภาวะในการหุงข้าวกล้องงอกในรีทอร์ตเพาช์ 30

4.4 คุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ 31

4.5 ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ 35

4.6 ผลของอายุการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ 37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.7 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้.....42
4.8 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....47
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....50
รายการอ้างอิง.....52
ภาคผนวก.....60
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ประเภทความเป็นกรดด่างในอาหาร....12

ตารางที่ 4.1 คุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1....29

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1....29

ตารางที่ 4.3 come-up time, holding time และ cooling time ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที....30

ตารางที่ 4.4 ค่าสีและดัชนีความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที....32

ตารางที่ 4.5 ความแข็งของข้าวกล้องงอกหุงสุก (cooked rice hardness) ในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที....33

ตารางที่ 4.6 elongation ratio (ER) และ elongation index (EI) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที....34

ตารางที่ 4.7 ปริมาณกาบาในข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที....35

ตารางที่ 4.8 ค่าสีและดัชนีความขาว (WI) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน....38

ตารางที่ 4. 9 ความแข็ง (hardness) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน....40

ตารางที่ 4.10 ปริมาณกาบาในของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน....41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 11 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ของข้าวกล้องงอกหุงสุก ในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน 45

ตารางที่ 4. 12 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความเข้มของสี กลิ่น และความแข็ง-นุ่ม ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน.....48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างที่สำคัญของเมล็ดข้าวกล้อง 5

รูปที่ 2 2 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและสารอาหารในระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ดข้าว..... 7

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ γ-aminobutyric acid (GABA)..... 9

รูปที่ 2.4 GABA shunt pathway..... 11

รูปที่ 4.1 ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ
ที่ (ก) 115 °C, (ข) 118 °C และ (ค) 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที..... 31

รูปที่ 4.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัด (elimination) โมเลกุลของน้ำออกจากโมเลกุลกาบา 37

รูปที่ ง. 1 Calibration curve of GABA..... 67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่1
บทนำ

ข้าวกล้องงอกเป็นอาหารเพื่อสุขภาพที่ได้รับความสนใจค่อนข้างมากในปัจจุบัน เนื่องจากในระหว่างที่ข้าวกำลังงอก จะเกิดการการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีขึ้น สารอาหารที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวจะถูกย่อยสลายให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง (Varanyanond และคณะ, 2005) รวมทั้งยังพบการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีสำคัญต่าง ๆ เช่น มีการเพิ่มขึ้นสาร γ-aminobutyric acid (GABA) วิตามินอี (α-tocopherol) ใยอาหารที่รับประทานได้ (dietary fiber) กรดเฟอรูลิก (ferulic acid) และแกมมาออไรซานอล (γ-oryzanol) (Moongngarm และ Saetung, 2010) นอกจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในข้าวแล้ว กระบวนการงอกยังช่วยทำให้ข้าวกล้องหุงสุกง่ายขึ้น และทำให้ข้าวกล้องที่หุงสุกแล้วมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการงอก จากการศึกษาพบว่าการรับประทานข้าวกล้องงอกอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลดีต่อร่างกายในด้านต่าง ๆ เช่น ช่วยป้องกันอาการปวดศีรษะ บรรเทาอาการท้องผูก ป้องกันมะเร็งในลำไส้ ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันโรคหัวใจ ลดความดันโลหิต และป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Kayahara และคณะ, 2000) จากประโยชน์ของการบริโภคข้าวกล้องงอกที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ความนิยมในการบริโภคข้าวกล้องงอกเพิ่มสูงขึ้นด้วย อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกเรื่อย ๆ ในอนาคต และเนื่องจากปัจจุบันนี้ ผู้คนในสังคมมีวิถีการดำรงชีวิตที่ต้องการความรวดเร็วมากขึ้น ทำให้มีความต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความสะดวก และรวดเร็วในการจัดเตรียม ดังนั้นอาหารประเภทพร้อมรับประทานจึงได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกพร้อมบริโภคจึงถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ เพราะนอกจากสะดวกในการบริโภคแล้ว ยังถือเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขภาพ และหากผลิตข้าวกล้องงอกหุงสุกพร้อมบริโภคอย่างเหมาะสม อาจจะทำให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานที่อุณหภูมิห้องโดยไม่ต้องแช่เย็นอีกด้วย อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตอาหารในลักษณะนี้ให้ปลอดภัย และเก็บรักษาไว้ได้ที่อุณหภูมิห้องจำเป็นต้องใช้ความร้อนและความดันสูง ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ปริมาณกาบา ลักษณะเนื้อสัมผัส และสารระเหยที่ให้กลิ่นในข้าวมีการเปลี่ยนแปลงไป (งามชื่น คงเสรี, 2539; ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก และคณะ, 2554; อนลลักษณ์ โอฬาริโกวิท, 2546) รวมถึงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของข้าวได้ เช่น มีสีเข้มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์และหมู่เอมีนที่เป็นองค์ประกอบภายในข้าว (Sirisoontaralak และ Noomhorm, 2007) อีกทั้งในระหว่างการเก็บรักษาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของข้าวหุงสุกทั้งทางเคมี และกายภาพ (เทวี คุ้มวงศ์ และ สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, 2553) นอกจากนี้ยังพบว่าในระหว่างการเก็บรักษาจะมีการเกิดสารประกอบในกลุ่มคาร์บอนิล โดยเฉพาะสารเฮกซานาล (hexanal) ซึ่ง

เป็นสารที่มีกลิ่นเขียว (green) หรือกลิ่นคล้ายหญ้า (grass-like) มักพบในข้าวเก่า ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Buttery และคณะ, 1983) ในข้าว

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการแปรรูปด้วยความร้อน และความดันสูงต่อปริมาณกาบา องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ สมบัติทางเคมีกายภาพ และทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอก และการเปลี่ยนแปลงของข้าวกล้องงอกพร้อมบริโภคบรรจุในรีทอร์ตเพาช์ระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานาน 6 เดือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
วารสารปริทัศน์

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นธัญพืชที่อยู่ในวงศ์ Gramineae และเป็นแหล่งอาหารหลักที่ให้คาร์โบไฮเดรตที่สำคัญในการดำรงชีวิตของประชากรมากกว่าร้อยละ 50 ในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก (บริสุทธิ์ สัมฤทธ, 2537; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ข้าวแบ่งออกตามถิ่นกำเนิดและความนิยมในการบริโภคได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima*) ซึ่งปลูกเฉพาะทางด้านทิศตะวันตกของทวีปแอฟริกาเท่านั้น และข้าวเอเชีย (*Oryza sativa*) ซึ่งปลูกทั่วไปในทวีปเอเชีย สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย ยุโรป และแอฟริกา ข้าวเอเชียยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดย่อย คือ indica, japonica และ javanica ซึ่งข้าวที่ปลูกในประเทศไทยเป็นข้าวชนิด indica (มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558) ซึ่งจากประวัติศาสตร์การเพาะปลูกข้าว พบว่ามีการคัดสรรและปรับปรุงพันธุ์ข้าวมาโดยตลอด ทำให้ข้าวในปัจจุบันมีความหลากหลาย ให้รสชาติที่ดี และมีคุณสมบัติที่ต่างกันไป

2.1.1 ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1

ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นข้าวเจ้าสายพันธุ์ CNTBR82075-43-2-1 ที่ได้จากการผสมข้าวพันธุ์ IR13146-158-1, IR15314-43-2-3-3 และ BKN6995-16-1-1-2 ที่สถานีทดลองข้าวชัยนาท เมื่อ พ.ศ. 2525 และมีการรับรองพันธุ์ข้าวในวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2536 โดยข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นข้าวชนิดไม่ไวต่อช่วงแสง มีลักษณะที่ดีหลายอย่าง ได้แก่ ให้ผลผลิตสูงถึงประมาณ 740 กิโลกรัมต่อไร่ การตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนดี มีความต้านทานต่อโรคใบหงิกและโรคใบไหม้ ต้านทานต่อเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลและเพลี้ยกระโดดหลังขาว นอกจากนี้ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 มีท้องไข่ หรือจุดขาวทึบแสงภายในเมล็ดอยู่น้อย มีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 121-130 วัน มีลำต้นสูงประมาณ 113 เซนติเมตร ใบมีสีเขียว โดยใบธงค่อนข้างยาวตั้งตรง ลักษณะคอรวงสั้น มีรวงที่ยาวและแน่น ระแง้หรือแขนงของรวงข้าวค่อนข้างถี่ ฟางแข็ง ส่วนเมล็ดของข้าวเปลือกมีสีฟาง เมื่อกะเทาะเปลือกออกจะได้เมล็ดข้าวกล้อง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 8 สัปดาห์ ให้ปริมาณแอมิโลสร้อยละ26-27 เมื่อหุงแล้วจะได้ข้าวสุกที่มีเนื้อสัมผัสที่ร่วนและแข็ง (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2558; อัจภัทร พหลโยธิน, 2552)

2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ข้าวสามารถแบ่งออกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ตามโครงสร้างของเมล็ดข้าวได้ดังนี้ (ชาญ มงคล, 2536)

2.1.2.1 เปลือกนอก (hull หรือ husk)

เป็นส่วนที่เรียกว่าแกลบ โดยแกลบเป็นส่วนใบประดับ (bract) ที่เปลี่ยนรูปไปเป็นแผ่น ใบประดับของแกลบประกอบด้วย 2 แผ่น แผ่นหนึ่งใหญ่และอีกแผ่นหนึ่งเล็ก เซลล์ของแกลบมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิกา

2.1.2.2 เปลือกเมล็ด (caryopsis)

เป็นส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ด ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ส่วน คือ เพอริคาร์พ (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) และชั้นของนูเซลลัส (nucellus) โดยเมื่อแกะเปลือกนอกของเมล็ดออก จะได้เมล็ดข้าวที่เรียกว่า “ข้าวกล้อง” ซึ่งสีของข้าวกล้องคือสีของเนื้อเยื่อชั้นเพอริคาร์พ ซึ่งมีสีขาวจนถึงน้ำตาลอ่อนแดง

2.1.2.3 เอ็นโดสเปิร์ม (endosperm) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- **ชั้นอะลูโรน (aleurone layer)**

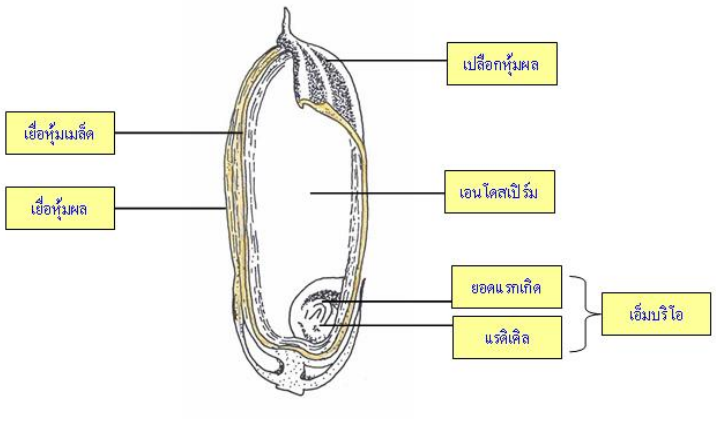
เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของส่วนที่เป็นแป้ง จำนวนชั้นของเนื้อเยื่ออะลูโรนขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจมีถึง 3 ชั้น ชั้นอะลูโรนมีธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโปแตสเซียมเป็นองค์ประกอบอยู่มาก

- **เอ็นโดสเปิร์มส่วนที่เป็นสตาร์ช (starchy endosperm)**

เป็นส่วนที่บริโภคเป็นอาหาร เอ็นโดสเปิร์มส่วนนี้ประกอบไปด้วยเซลล์เม็ดแป้งและโปรตีน โดยโปรตีนในเมล็ดข้าวจะอยู่รอบนอกใกล้กับชั้นในของอะลูโรน ส่วนเซลล์เม็ดสตาร์ชจะอยู่ด้านใน ดังนั้นในการสีข้าวจะขัดเอาชั้นอะลูโรนออกไป ทำให้สีน้ำตาลหรือสีแดงของข้าวกล้องถูกขัดออกไปหมด ซึ่งอาจทำให้แร่ธาตุต่าง ๆ และโปรตีนถูกขัดออกไปด้วย โดยทั่วไปข้าวกล้องมีโปรตีนประมาณร้อยละ 8 เมื่อขัดให้ขาวจนเป็นข้าวสารแล้วจะมีโปรตีนเหลือเพียงร้อยละ 6-7 เท่านั้น

2.1.2.4 คัพภะ (embryo)

คือส่วนที่เรียกว่าจมูกข้าวเป็นตำแหน่งรวมของส่วนที่จะงอกเป็นต้นข้าวต้นใหม่ คัพภะประกอบด้วยส่วนที่จะงอกเป็นยอดอ่อน (plumule) และส่วนที่จะงอกเป็นรากแรกกำเนิด (radicle) ทั้งสองส่วนนี้ยึดติดกันด้วยปล้องที่สั้นมากที่เรียกว่า มีโซคอททิล (mesocotyl) ยอดอ่อนจะห่อหุ้มด้วยส่วนที่มีลักษณะคล้ายใบเรียกว่า เยื่อหุ้มยอดอ่อน (coleoptile) ส่วนของคัพภะทั้งหมดจะอยู่ในชั้นเนื้อเยื่ออะลูโรน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างที่สำคัญของเมล็ดข้าวกล้อง
ที่มา : สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2551)

2.1.3 ข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอกคือ ข้าวเปลือก หรือข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการแช่น้ำเป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วบ่มให้เกิดกระบวนการงอก จากนั้นนำข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกแล้วไปทำแห้ง เพื่อหยุดกระบวนการงอก โดยกระบวนการงอกจะทำให้สารอาหารภายในเมล็ดเกิดการเปลี่ยนแปลงโดย พบว่าในระหว่างการงอกของข้าว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีขึ้น สารอาหารที่ถูกเก็บไว้จะถูกย่อยสลายให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง (Varanyanond และคณะ, 2005) รวมทั้งยังพบการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีสำคัญต่าง ๆ เช่น การเพิ่มขึ้นของปริมาณกาบา, α-tocopherol, dietary fiber, ferulic acid และ γ-oryzanol (Moongngarm และ Saetung, 2010) นอกจากนั้น กระบวนการงอกยังทำให้ข้าวกล้องสุกง่ายขึ้น และทำให้ข้าวสุกที่ได้นุ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการงอก (Ito และ Ishikawa, 2004)

2.1.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการงอกของข้าว

- **น้ำ**

น้ำเป็นปัจจัยแรกที่เมล็ดต้องการใช้สำหรับการงอก เพื่อให้เปลือกเมล็ดอ่อนลงและทำให้โปรโทพลาสซึมในเซลล์ได้รับน้ำ เมล็ดจึงบวมขึ้นและเปลือกเมล็ดแตกออก การดูดซึมออกซิเจนเข้าไปสู่ภายในเมล็ดจึงสะดวกขึ้น ส่งผลให้เมล็ดมีการหายใจเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกระตุ้นให้เกิดกิจกรรมของเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ เช่น การสลายสารอาหารที่สะสมในส่วนเนื้อเมล็ด โดยสารอาหารที่สะสมอยู่ในรูปไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตจะถูกย่อยให้เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงและไม่ซับซ้อน สารอาหารเหล่านั้นจะเคลื่อนย้ายไปที่จุดเจริญส่วนต่าง ๆ ของเอมบริโอ ซึ่งเซลล์ทั้ง

ระบบจะถูกกระตุ้นให้ทำงาน ระบบการสังเคราะห์โปรตีนทำหน้าที่ผลิตเอนไซม์ใหม่และสังเคราะห์สารใหม่ เมื่อคัพภะได้รับสารอาหารจะมีการแบ่งเซลล์ที่ปลายรากแรกเกิด จากนั้นโครงสร้างของต้นกล้าจึงขยายใหญ่ขึ้น (Bewly, 1997)

- **ออกซิเจน**

การงอกของเมล็ดข้าวเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ที่มีชีวิตซึ่งต้องการใช้ออกซิเจนสำหรับการหายใจ ทั้งนี้เพื่อย่อยสลายสารอาหารให้กลายเป็นพลังงานที่ใช้สำหรับการงอกและเจริญเติบโต โดยทั่วไปเมล็ดข้าวสามารถงอกได้ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนประมาณร้อยละ 20 ซึ่งในบรรยากาศโดยทั่วไปมีออกซิเจนอยู่ในปริมาณเพียงพอที่เมล็ดจะสามารถงอกได้ (Crawford และคณะ, 1994)

- **อุณหภูมิ**

มีความสำคัญมากต่อการควบคุมการงอก และอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมี ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของเมล็ดข้าว โดยปกติเมล็ดข้าวทั่วไปสามารถงอกได้ดีในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30-40 $^{\circ}$C (นงนุช วงศ์สินชวน, 2555)

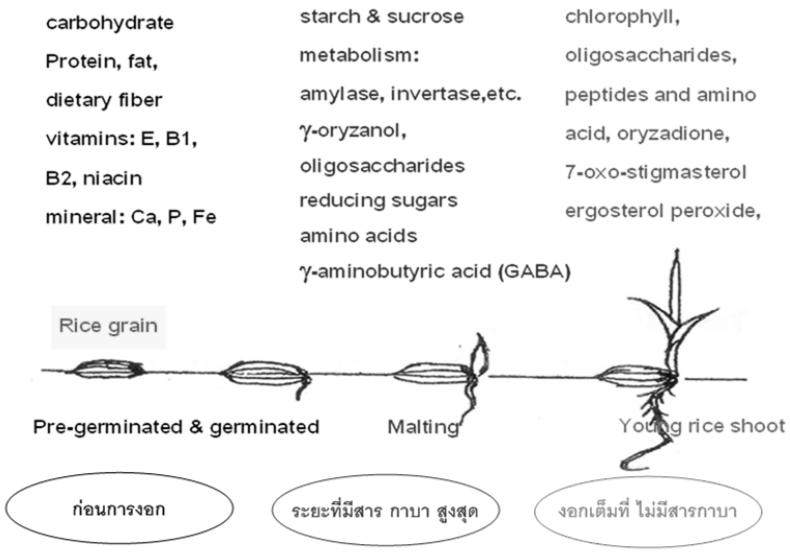
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะในการงอกของข้าวที่เหมาะสม Moongngarm และ Saetung (2010) นำข้าวกล้องของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 มาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (28-30 $^{\circ}$C) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยเปลี่ยนน้ำที่ใช้แช่ทุก 4 ชั่วโมง สะเด็ดน้ำ บ่มให้งอกที่อุณหภูมิ 28-30 $^{\circ}$C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 90-95 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำแห้งที่ 50 $^{\circ}$C พบว่าปริมาณโปรตีน น้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ กรดอะมิโนทั้งหมด สารประกอบฟินอลลิกทั้งหมด γ-oryzanol และกาบาเพิ่มมากขึ้น

Watchararparpaiboon และคณะ (2010) พบว่าสภาวะการแช่ที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องงอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และพันธุ์ชัยนาท 1 ได้แก่ การแช่น้ำที่ pH 6 อุณหภูมิ 35 $^{\circ}$C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บ่มที่อุณหภูมิห้องจนรากงอก 0.5-2.0 มิลลิเมตร และทำแห้งที่ 50 $^{\circ}$C ทำให้มีปริมาณกาบาสูงที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 4-5 เท่า และมีปริมาณโปรตีนและปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นมากที่สุด แต่มีปริมาณ thiamine เพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง และปริมาณ phytic acid ลดลงในระดับปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการแช่น้ำที่แปร pH ที่ 3, 4, และ 8 และอุณหภูมิที่ 25 และ 45 $^{\circ}$C และงานวิจัยของ Khwanchai (2011) ที่ได้ศึกษาปริมาณสารกาบา กรดกลูตามิก และกิจกรรมของเอมไซม์กลูตาเมตดีคาร์บอกซิเลสในข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกพันธุ์ไทย 5 พันธุ์ พบว่าข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 ที่แช่ในสารละลายกรดกลูตามิกเข้มข้น

600 mM ที่อุณหภูมิ 35 ^{o}C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง มีปริมาณกาบาที่สูงที่สุด โดยให้ปริมาณกาบาสูงถึง 3.5 เท่า

2.1.3.2 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีระหว่างกระบวนการงอก

เมื่อเมล็ดข้าวเริ่มเจริญเติบโต จะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี โดยเริ่มขึ้นเมื่อน้ำได้แทรกเข้าไปในเมล็ดข้าว แล้วกระตุ้นให้เอนไซม์ภายในเมล็ดข้าวเกิดการทำงาน เมื่อเมล็ดข้าวเริ่มงอกสารอาหารที่เก็บไว้ภายในเมล็ดข้าว จะถูกย่อยสลายไปตามกระบวนการทางชีวเคมี โดยสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่จะถูกย่อยสลายให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง เป็น โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) และน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugars) นอกจากนี้โปรตีนภายในเมล็ดข้าวก็จะถูกย่อยให้เกิดเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์ และยังทำให้เกิดการสะสมสารเคมีสำคัญต่างๆเช่น แกมมาออริซานอล (γ-oryzanol) โทโคฟีรอล (tocopherol) โทโคไตรอีนอล (tocotrienal) และสาร GABA (พัชรี ตั้งตระกูล และคณะ, 2549) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและสารอาหารในระยะต่าง ๆ ของข้าว แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2 2 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและสารอาหารในระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ดข้าว
ที่มา : วีระชัย อุ่นสากล (2553)

2.1.3.3 ประโยชน์ของข้าวกล้องงอก

เมื่อข้าวผ่านกระบวนการงอกแล้ว ภายในเมล็ดข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของใยอาหาร วิตามินอี บี1 บี2 บี6 เหล็ก แคลเซียม กรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ และ GABA ในระดับที่สูงกว่าเมล็ดข้าวที่ไม่ได้เพาะให้งอก ซึ่งประโยชน์ของข้าวกล้องงอกมีมากมาย เช่น ช่วยเพิ่มปริมาณของ Human Growth Hormone (HGH) ที่ช่วยให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อและเกิดสาร lipotropic ซึ่งเป็นสารป้องกันไขมัน ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความกระชับ และยังช่วยป้องกันริ้วรอย ป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (พัชรี ตั้งตระกูล และคณะ, 2549) และช่วยให้การนอนหลับดีขึ้น อาการวิตกกังวลลดลง (วนิดา โอฬารกิจอนันต์, 2558) ป้องกันอาการปวดศีรษะ บรรเทาอาการท้องผูก ป้องกันมะเร็งในลำไส้ ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันโรคหัวใจ และลดความดันโลหิต (Kayahara และคณะ, 2000)

2.1.4 ข้าวหุงสุก

ข้าวหุงสุกเกิดจากกระบวนการเจลาติไนซ์ (gelatinization) ของเม็ดสตาร์ช ในขณะหุงน้ำจะซึมเข้าไปในส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ช สายโซ่ของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินจะคลายตัวออก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพันธะไฮโดรเจนอ่อนแอลง น้ำสามารถซึมเข้าเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น เม็ดสตาร์ชพองตัวมากขึ้น (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิแป้งสุก (gelatinization temperature) ของข้าว (68 - 78 °C) (Institute of Brewing, 1993) ข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจนปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ ข้าวจะเริ่มสุกจากบริเวณรอบนอกของเมล็ดก่อนแล้วค่อยๆ สุกขึ้นเรื่อยๆ ตามอุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความร้อนจนถึงแกนด้านใน (core) ของเมล็ดข้าว (อนลลักษณ์ โอฬาริโกวิท, 2546)

2.1.5 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนในภาวะที่มีน้ำมากเกินพอ พันธะไฮโดรเจนในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) จะถูกทำลาย น้ำจะเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นน้ำจะเข้าไปและทำให้ส่วนอสัณฐานเกิดการพองตัวและโครงสร้างผลึกถูกทำลาย ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสูญเสียความเป็นระเบียบแบบผันกลับไม่ได้ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (BeMiller และ Whistler, 2009)

2.1.6 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งสุก (Retrogradation)

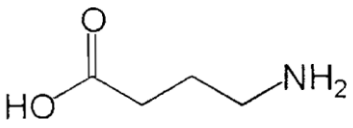
ขณะที่สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่และแตกออก ทำให้โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกตินไม่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่อยู่ใกล้กันจับตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดการเรียงตัวกันใหม่

และ เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบมากขึ้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช โดยการเกิดรีโทรเกเดชันของแอมิโลสจะใช้เวลาสั้นกว่าแอมิโลเพกติน (Gudmundsson และ Eliasson, 1990; กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ช่วงอุณหภูมิการหลอมผลึกของการเกิดรีโทรเกรเดชันของแอมิโลเพกตินและแอมิโลสเท่ากับ 40 – 100 และ 120 – 170 $^{\circ}$C ตามลำดับ โดยโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชที่เกิดรีโทรเกรเดชันนี้ มีลักษณะโครงร่างผลึกแบบบี (B-pattern) เมื่อวิเคราะห์โดยเทคนิค X-ray diffraction (Karim และคณะ, 2000) การเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น พันธุ์ข้าว สภาวะการเก็บรักษา ปริมาณแอมิโลส ระดับการขัดสี อัตราส่วนข้าวต่อน้ำ วิธีการทำให้สุก (cooking methods) วิธีการลดอุณหภูมิหลังทำให้สุก (cooling methods) เป็นต้น (Yu และคณะ, 2009)

เมยวดี แซ่เลี้ยว (2547) ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวสำเร็จรูปบรรจุกระป๋อง ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้ข้าวหอมมะลิที่มีแอมิโลสต่ำและข้าวขาวตาแห้งที่มีแอมิโลสสูงที่ระยะเวลาเก็บรักษา 8 เดือนที่อุณหภูมิห้องพบว่า ช่วงแรกของการเก็บรักษาข้าวหอมมะลิเกิดรีโทรเกรเดชันช้ากว่าข้าวขาวตาแห้ง แต่เมื่อเก็บรักษานานขึ้นข้าวทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชันที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

2.2 กรดแกมมาอะมิโนบิวทิริก (กาบา)

ชื่อ IUPAC ของกาบา คือ 4-aminobutyric acid ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม มีหมู่อะมิโนอยู่ที่บริเวณแกมมาคาร์บอน กาบาเป็นกรดอะมิโนไม่ใช่สารประเภทโปรตีน มีความสามารถในการละลายน้ำสูง สามารถเป็นได้ทั้งสารที่มีประจุบวกและลบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง pH โดยค่า pK เท่ากับ 4.03 และ 10.56 ที่ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 100 kPa กาบามีมวลโมเลกุล 103.12 g/mol จุดหลอมเหลว 203 $^{\circ}$C (Shelp และคณะ, 1999)

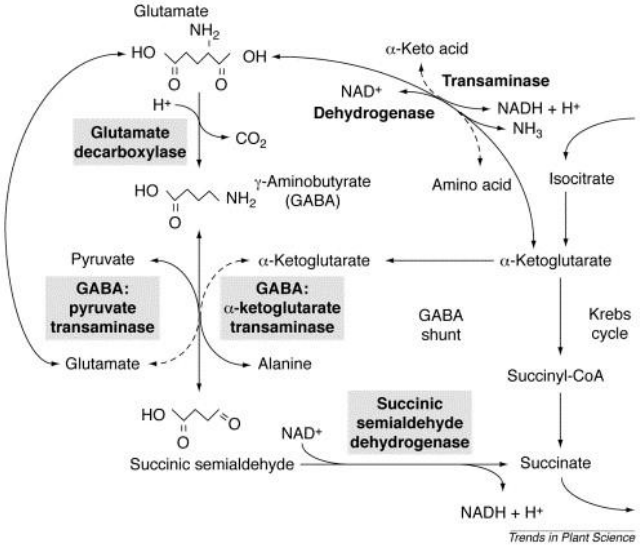


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ γ-aminobutyric acid (GABA)
ที่มา : http://www.i-supplements.com/gaba1.html

กาบาถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1883 พบในผลิตผลจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืชและแบคทีเรีย และต่อมามีการพบกาบาในระบบประสาทส่วนกลางของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Roth และคณะ, 2003) นอกจากนี้ Akama และคณะ (2001) รายงานว่าพบกาบาได้ทั้งสิ่งมีชีวิตจำพวกโปรคาริโอตที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสแท้จริง และยูคาริโอตที่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสแท้จริง ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม กาบาจะทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งสารสื่อประสาทในระบบประสาทส่วนกลาง (Best, 1990) มีผลช่วยทำให้สมองเกิดการผ่อนคลาย จึงสามารถนอนหลับสบาย และยังมีประโยชน์อื่นๆ อีกมากมาย เช่น มีส่วนช่วยป้องกันโรคอัลไซเมอร์ในกลุ่มผู้สูงอายุ (Ito และ Ishikawa, 2004) ช่วยลดความดันโลหิต (Osawa และคณะ, 2004) ช่วยลดไขมันประเภท LDL (low density lipoprotein) ช่วยลดน้ำหนัก และชะลอการเสื่อมสภาพของเซลล์ ทำให้ผิวพรรณมีสุขภาพดี เป็นต้น อีกทั้งมีรายงานว่ากาบาสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของ สตรอว์เบอร์รี่ แอปเปิ้ล และมะเขือเทศ (Deewatthanawong, 2006)

ปกติในเนื้อเยื่อของพืชจะพบกาบาในปริมาณที่ต่ำ (Rhodes และคณะ, 1986) แต่จะสามารถเพิ่มขึ้นได้ เมื่อได้รับการกระตุ้นจากสิ่งเร้าต่างๆ เช่น การกระตุ้นด้วยความร้อนหรือความเย็น การกระตุ้นเชิงกล การทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจน เป็นต้น (Bown และ Shelp, 1997) จากงานวิจัยของ Wallace และคณะ (1984) พบว่าหลังจากที่ให้ความเย็นกับใบถั่วเหลือง ภายใน 5 นาที ปริมาณกาบาเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 20 – 40 เท่า และ Reggiani (1988) พบว่าที่สภาวะขาดออกซิเจนในเมล็ดข้าว มีผลทำให้ปริมาณกาบาเพิ่มขึ้น

กาบามีความเกี่ยวข้องกับวัฏจักรเครป (krebs cycle) โดยเป็นสารมัธยันตร์ (intermediate) ในวัฏจักรการเปลี่ยนกรดกลูตามิกให้เป็นกรดซัคซินิค เรียกชื่อของวัฏจักรนี้ว่า GABA shunt (Chung และคณะ, 1992; Tuin และ Shelp, 1994) ซึ่งวัฏจักรนี้ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ โดยเริ่มต้นจากการเกิดปฏิกิริยา α-decarboxylation ของกรดกลูตามิก โดยใช้เอนไซม์ glutamate decarboxylase และมีวิตามินบี 6 และอนุพันธ์ เป็นโคเอนไซม์ในการสังเคราะห์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ (Messer, 2000)



รูปที่ 2.4 GABA shunt pathway
ที่มา : Shelp และคณะ (1999)

เอนไซม์ GAD มีความจำเพาะต่อ L-glutamate ซึ่งค่า pH ที่เหมาะสมของเอนไซม์ชนิดนี้มีค่าประมาณ 5.8 โดยสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ sulfhydryl จะสามารถระงับการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้ได้ (Turano และ Fang, 1998; Yu และ Oh, 1998) นอกจากนี้อุณหภูมิก็มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ชนิดนี้เช่นกัน ซึ่งหากมาจากแหล่งที่มาที่ต่างกัน จะใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์ที่ต่างกัน โดยเอนไซม์ GAD ในข้าว ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 35 – 45 $^{\circ}$C (Zhang และคณะ, 2002)

Crawford และคณะ (1994) พบว่าการเพิ่มความเป็นกรดในเซลล์พืช มีผลให้ปริมาณกาบาในเซลล์พืชสะสมมากขึ้น โดยปริมาณที่เพิ่มขึ้นนั้น เป็นกลไกการควบคุมปริมาณความเป็นกรดภายในเซลล์ เมื่อปริมาณของสารนี้เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดภายในเซลล์ของพืชลดลง (Carroll และคณะ, 1994) โดยหากสิ่งมีชีวิตเกิดความเครียดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดขึ้นภายในเซลล์หรือภายนอกเซลล์ก็ได้ ความเครียดจะไปกระตุ้นให้ปริมาณ Ca^{2+} กลูตาเมต และ H^{+} เพิ่มขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้จะไปกระตุ้นให้เกิดกระบวนการ decarboxylation รวมทั้งความเครียดยังมีผลต่อการลดลงของอัตราส่วนของ NAD:NADH ในไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ส่งผลให้เกิดการหยุดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารกาบาให้เป็น ซักซิเนตเซมิแอลดีไฮด์ ในขั้นตอนที่สองของวัฏจักรGABA shunt (อธิป บุญศิริวิทย์, 2553) ทำให้สารกาบาภายในเซลล์มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น

2.3 การฆ่าเชื้อในระดับการค้า (commercial sterilization)

การฆ่าเชื้อในระดับการค้าหมายถึงการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน (thermal processing) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค (pathogen) และจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย (food spoilage) การฆ่าเชื้อในระดับการค้าไม่ได้เป็นการทำให้ปลอดเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (sterilization) เพื่อคงรักษาคุณภาพของอาหารไว้ แต่ยังคงเหลือจุลินทรีย์บางชนิด เช่น แบคทีเรียที่ทนความร้อนสูง (thermophilic bacteria) รวมทั้งสปอร์ของแบคทีเรีย (bacterial spore) ที่ทนร้อน ซึ่งจุลินทรีย์ที่เหลือรอดนี้ จะไม่สามารถเจริญได้ภายใต้สภาวะการเก็บรักษาและขนส่งปกติ ทำให้อาหารเก็บรักษาได้นานที่อุณหภูมิห้อง และปลอดภัยต่อการบริโภค สำหรับอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำจะพิจารณา *Clostridium botulinum* ชนิด A เป็นหลัก (มัทนา แสงจินดาวงษ์, 2548)

การกำหนดอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ฆ่าเชื้อของอาหารแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความต้านทานความร้อนของจุลินทรีย์และสปอร์ที่มีอยู่ในอาหาร ลักษณะและคุณสมบัติของอาหาร เช่น ขนาดของชิ้นอาหาร ความหนืด เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอาหารบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (ผนังภาชนะบรรจุ) ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ (จุดที่ร้อนช้าที่สุด) โดยการเลือกสภาวะการฆ่าเชื้อนั้นจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัย การยอมรับในผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค และต้องมั่นใจว่าอาหารนั้นได้รับการฆ่าเชื้ออย่างเพียงพอ โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาดังนี้

2.3.1 สภาพความเป็นกรด-เบส (pH) ของอาหาร

โดยอาหารถูกแบ่งตามสภาพความเป็นกรดเบสได้ 3 ชนิด (มัทนา แสงจินดาวงษ์, 2548) แสดงในตารางที่ 2.1

Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 ประเภทความเป็นกรดด่างในอาหาร

ประเภทความเป็นกรดด่างในอาหาร	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	ตัวอย่างอาหาร
อาหารที่มีกรดสูง	< 3.7	อาหารหมักดอง น้ำผลไม้
อาหารที่มีกรดปานกลาง	3.7 – 4.6	มะเขือเทศ ลิ้นจี่ ลำไย
อาหารที่มีกรดต่ำ	> 4.6	เนื้อสัตว์ ผัก อาหารทะเล

ในอาหารที่มีกรดต่ำ (pH สูงกว่า 4.6) แบคทีเรียจะมีความต้านทานความร้อนได้ดีจึงต้องใช้ความร้อนสูงถึง 116 – 121 องศาเซลเซียสในการฆ่าเชื้ออาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทประเภทนี้ โดยเฉพาะ *Clostridium botulinum* เป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยในการบริโภคอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทเพราะสามารถสร้างสารพิษที่มีอันตรายถึงชีวิต โดยพิษที่สร้างขึ้นทำให้เกิดโรคที่เรียกว่าโรคโบทูลิซึม (botulism) นอกจากนี้ยังสามารถสร้างสปอร์ที่มีความทนทานต่อความร้อนได้ดี (Heldman และ Hartel, 1997)

2.3.2 การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท

การฆ่าเชื้ออาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทต่างชนิดกันจะใช้อุณหภูมิและเวลาต่างกันการถ่ายเทความร้อนในของเหลวจะเป็นแบบการพาความร้อน (convection) ซึ่งสามารถส่งผ่านความร้อนได้เร็วกว่าการนำความร้อน (conduction) ที่เป็นการถ่ายเทความร้อนในอาหารประเภทของแข็งและการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกภาชนะบรรจุปิดสนิทเข้าสู่อาหารจะเกิดได้ไม่เท่ากันทุกจุดดังนั้นการกำหนดระยะเวลาในการฆ่าเชื้อจะต้องนานเพียงพอที่จะฆ่าเชื้อในจุดที่ได้รับความร้อนช้าที่สุดของอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทด้วย (slowest heating point) (Heldman และ Hartel, 1997)

2.3.3 ขนาดของภาชนะบรรจุ

ขนาดของภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทจะมีผลต่อการฆ่าเชื้อ เพราะการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาหารภาชนะขนาดใหญ่จะใช้เวลานานกว่าภาชนะขนาดเล็ก (มัทนา แสงจินดาวงษ์, 2548)

2.3.4 คุณภาพของอาหารก่อนบรรจุภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท

การกำหนดเวลาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์เกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณและจุลินทรีย์เริ่มต้น ถ้าปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นมีจำนวนน้อย การกำหนดเวลาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ก็เชื่อได้ว่าเหมาะสมและฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มีปัญหาได้หมด แต่ถ้าปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นมีจำนวนมากเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้การกำหนดเวลาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์จะผิดพลาดและเกิดปัญหา under process เป็นผลทำให้อาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทเกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ได้ ดังนั้นคุณภาพวัตถุดิบจึงเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและมีผลทางอ้อมต่อการกำหนดเวลาในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (มัทนา แสงจินดาวงษ์, 2548)

2.3.5 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (Water activity, a_W)

ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เป็นตัวเลขที่บ่งชี้ถึงปริมาณน้ำในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้หรือเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ โดยอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิทส่วนใหญ่

มีค่า a_W มากกว่า 0.95 โดยทั่วไปจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย ยีสต์บางชนิด และแบคทีเรียก่อโรค (pathogen) เช่น *Eschericia coli*, *Clostridium perfringens* เจริญได้ดีที่ค่า a_W สูงกว่า 0.95 แต่ถ้า a_W น้อยกว่าก็จะช่วยยับยั้งทำให้ต้องการความร้อนในการฆ่าเชื้อน้อยลง (Heldman และ Hartel, 1997)

2.3.6 ความข้นหนืด (viscosity, consistency)

ความข้นหนืดของอาหารมีผลอย่างมากในแง่ของการถ่ายเทความร้อน อาหารที่มีความข้นหนืดสูงจะเคลื่อนที่ได้น้อยการถ่ายเทความร้อนจึงต่ำ ในขณะที่อาหารที่มีความหนืดต่ำการเคลื่อนที่เกิดได้ง่าย การถ่ายเทความร้อนเกิดได้ดี (Heldman และ Hartel, 1997)

2.3.7 ขนาดและรูปร่างของชิ้นอาหาร

รูปร่าง และขนาดของอาหารที่แตกต่างกันมีผลการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากเมื่อบรรจุลงในภาชนะปิดสนิทแล้วเกิดช่องว่างภายในที่ไม่เท่ากัน (Heldman และ Hartel, 1997)

2.3.8 สารเคมีที่ใช้ในอาหาร

สารเคมีบางตัวที่ใช้ในอาหาร เช่นไนไตรท์ (nitrite) ที่เติมในผลิตภัณฑ์เนื้อพบว่าเมื่อรวมกับเกลือจะมีผลช่วยยับยั้งการเจริญของสปอร์ได้ซึ่งทำให้สามารถลดเวลาในการฆ่าเชื้อ (Heldman และ Hartel, 1997)

2.3.9 ค่า F (F-value)

ค่า F หมายถึง ระยะเวลาเป็นนาทีที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งใช้ทำลายจุลินทรีย์ที่ทราบจำนวนในอาหารภายใต้สภาวะที่กำหนด การใช้ค่า F จำเป็นต้องระบุอุณหภูมิ (process temperature) ที่ใช้และค่า Z ของจุลินทรีย์เป้าหมายด้วย (จำนวนองศาเซลเซียสหรือองศาฟาเรนไฮท์ ที่ทำให้จุลินทรีย์เริ่มต้นลดลง 1 log cycle สัญลักษณ์ที่ใช้คือ F_t^z เช่น F_{121}^{10} จะใช้สัญลักษณ์ย่อเป็น F_0 ซึ่งจะหมายถึงเวลาเป็นนาทีที่ 121 $^{\circ}$C ที่ใช้ทำลายจุลินทรีย์ซึ่งมีค่า z = 10 $^{\circ}$C ลงจำนวนหนึ่ง โดยทั่วไปแบคทีเรียที่ใช้พิจารณาคือ C. *botulinum* type A (D_{121} = 0.10 – 0.20) (วิไล รังสาดทอง, 2552)

$$F = D \log (N_0/N)$$

$$= (0.20 \text{ min}) \log (1 \text{ spore}/10^{-12} \text{ spore})$$

$$F_0 = 0.20 (12) \text{ min}$$

$$= 2.4 \text{ min}$$

12-D process สำหรับ C. *botulinum* type A มีค่าเวลาในการฆ่าเชื้อเท่ากับ 2.4 นาที ที่ 121 °C

โดยตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 301) พ.ศ. 2549 เรื่องอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ฉบับที่ 4) ได้กำหนดว่า อาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิทชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำ คือมีค่า pH มากกว่า 4.6 หรือมีค่า a_W มากกว่า 0.85 จะต้องฆ่าเชื้อด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาที่กำหนดโดยให้ค่า F_0 ไม่ต่ำกว่า 3 นาที ซึ่งเพียงพอในการทำลายสปอร์ของเชื้อ C. *botulinum* (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2557)

2.4 สารที่สามารถระเหยได้ (volatile components) ในข้าว

กลิ่นรสของข้าวถือเป็นปัจจัยอันดับต้น ๆ ที่มีความสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ข้าวบางพันธุ์เป็นที่นิยมของผู้บริโภคเปนพิเศษเนื่องจากมีกลิ่นหอม เชน ข้าวพันธุขาวดอกมะลิ 105 กลิ่นหอมนี้ประกอบด้วยสารที่สามารถระเหยได้มากกวา 100 ชนิด โดย Buttery และคณะ (1983) รายงานวา สาร 2-acetyl-1-pyrroline (2AP) เปนสารใหกลิ่นหลักในขาวหอม สารตัวนี้ไวตอแสงและอุณหภูมิ เปนเหตุใหข้าวสารที่เก็บเปนเวลานานมีความหอมลดลงจนใกลเคียงกับข้าวพันธุไมหอม แต การเก็บรักษาข้าวกล่องที่อุณหภูมิประมาณ 4 °C นาน 12 เดือน ทำให้กลิ่นลดลงเพียงร้อยละ 35 (Mahatheeranont และคณะ, 2001) ในระหวางการเก็บรักษาข้าวพบวาจะมีการผลิตสารคารบอนิลโดยเฉพาะ hexanal เพิ่มขึ้น ซึ่งเปนสารที่ใหกลิ่นข้าวเกาโดยมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันไมอิ่มตัวนอกจาก hexanal ที่เพิ่มขึ้นในระหวางเก็บรักษาแล้ว ยังพบ (E,E)-2,4-decadienal, nonanal, (E)-2-nonenal, octanal, decanal, 4-vinyl-guaiacol และ 4-vinylphenol ซึ่งเปนสารที่ใหกลิ่นข้าวเกาในข้าวหุงสุก (Buttery และคณะ, 1983) โดยงานวิจัยของ Wongpornchai และคณะ (2004) ได้ศึกษาวิธีการทำแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาตอกลิ่นรสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบวาการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำไมเกิน 40°C มีความเข้มข้นของ 2AP มากกวา และมีปริมาณของ n-hexanal และ 2-pentylfuran ซึ่งเปนสารใหกลิ่นข้าวเกานอยกวาการทำแห้งที่อุณหภูมิสูง Widjaja และคณะ (1996) ได้รายงานวาสารใหกลิ่นที่สำคัญในข้าวทั้งพันธุ์ข้าวหอมและไม่หอมประกอบด้วย alkanals, alk-2-enals, alka-2,4-dienals, 2-pentylfuran และ 2-phenylethanol

2.5 ปจจัยที่มีผลตอการการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นรสในขาวระหวางเก็บรักษา

ข้าวที่ผ่านการเก็บรักษาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมี หรือชีวเคมี การเปลี่ยนแปลงของกลิ่นรสในข้าว ปริมาณกรดไขมันอิสระ และสารคาร์บอนิลเกิดจากปฏิกิริยาออโตออกซิเดชันของไขมันโดยปัจจัยที่เกี่ยวของมีดังนี้

2.5.1 ปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกที่เหมาะสมอยู่ที่ร้อยละ 14 โดยน้ำหนัก (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2545) ความชื้นในปริมาณที่สูงจะทำให้เกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic rancidity) เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำไปทำให้เกิดการสลายของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) โดยมีเอนไซม์ไลเพส (lipase) หรือไลพอกซิเดส (lipoxidase) ที่มีอยู่ในอาหาร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิสระที่ระเหยได้ เช่น short chain fatty acid ซึ่งให้กลิ่นหืน แต่ป้องกันได้โดยการใช้ความร้อน เช่น การลวก (blanching) เพื่อยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ดังกล่าว หรือลดปริมาณความชื้นลงให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม เพราะหากในเมล็ดข้าวมีปริมาณความชื้นที่ต่ำจนเกินไปก็อาจส่งผลให้เกิดกลิ่นหืนได้อีกเช่นกัน โดยงานวิจัยของ Ali และ Bhattachaary (1976) ทดลองเก็บข่าวสารในขวดปดสนิทในที่มืดที่อุณหภูมิ 60 °C นาน 2 ป โดยมีระดับความชื้นในข่าวเริ่มต่นแตกตางกัน คือ ที่ร่อยละ 14.6,11.8, 9.3, 5.2 และ 4.1 พบวาข่าวที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได่อยางรวดเร็ว และมีสารผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยามากกว่าข้าวที่มีความชื้นสูง โดยวัดจากปริมาณของสารเพอร์ออกไซด์ และสารคารบอนิลที่เกิดจากการสลายตัวของเพอรออกไซด โดยข่าวที่มีความชื้นร่อยละ 14.6 และ 11.8 มีปริมาณของเพอรออกไซดและคาร์บอนิลค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา ส่วนข้าวที่มีความชื้นร้อยละ 9.3, 5.2 และ 4.1 มีปริมาณสารเพอร์ออกไซด์และสารคาร์บอนิลมากขึ้น เนื่องจากน้ำในองค์ประกอบของเมล็ดข้าวจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นกลางระหว่างไขมัน และออกซิเจน เมื่อระดับความชื้นต่ำมีผลให้ไขมันบางส่วนสัมผัสกับออกซิเจน และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในการเก็บรักษาข้าวมีผลต่อการเกิดกลิ่นหืน โดยที่อุณหภูมิสูงจะเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำและเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดกลิ่นหืนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (oxidative rancidity) โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่างออกซิเจนกับลิพิด (lipid) ซึ่งหมายถึงไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) บริเวณตำแหน่งพันธะคู่ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) งานวิจัยของ Villareal และคณะ (1976) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของข้าวสารในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 29 °C พบว่าเกิดการเพิ่มของสารคาร์บอนิลอย่างรวดเร็วในระยะเวลา 2-4 สัปดาห์ โดยเฉพาะการเพิ่มของ hexanal ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นไม่พึงประสงค์ เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น ข้าวที่ขัดสีแล้วหรือยังไม่ขัดสีจะมี hexanal ประมาณ 148-254 ng/g และในสภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 40 °C ปรากฏกลิ่นหืนเกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ propanal, pentanal และ hexanal ที่เพิ่มสูงขึ้น

โดยแปรผันตรงกับปริมาณกรดลิโนเลอิกและลิโนเลนิกที่ลดลง เนื่องจากไขมันถูกไฮโดรไลซ์และออกซิไดซ์เป็นกรดไขมันอิสระส่งผลต่อค่ากรดที่เพิ่มสูงขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นเพอร์ออกไซด์ ทำให้รสชาติรวมทั้งปริมาณสารให้กลิ่นในข้าวลดลง การเกิดสารคาร์บอนิลนั้นมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัวและยังมีสารอื่นๆ เพิ่มขึ้นในระหว่างการเก็บรักษา ได้แก่ butanol, 2-methylpropanalและ 3-methylbutanal (Endo และคณะ, 1977)

Wongpornchai และคณะ (2004) ศึกษาวิธีการทำแห้งและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อกลิ่นรสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยใช้วิธีการทำแห้งแบบต่างๆได้แก่ การใช้ตู้อบชนิดควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิ 30 และ 40 °C การใช้ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40, 50 และ70 °C และการผึ่งแดด ให้ข้าวมีความชื้นเหลือร้อยละ 13-15 บรรจุกระสอบ แล้วเก็บที่อุณหภูมิห้องนาน 4 สัปดาห์ พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำมีปริมาณของ 2AP มากกว่า และมีปริมาณ n-hexanal และ 2-pentylfuran ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นหืนน้อยกว่าการทำแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูง

2.5.3 เอนไซม์

เอนไซม์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในการในการเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นรสในข้าว เช่น เอนไซม์ไลเพส (lipase) ซึ่งเป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ให้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ ซึ่งกรดไขมันอิสระเหล่านี้สามารถระเหยได้ และทำให้เกิดกลิ่นหืน เอนไซม์ไลพอกซีจิเนส (lipoxygenase) พบได้ในพืชทั่วไปหลายชนิด ได้แก่ ข้าว ข้าวสาลี ถั่วเหลือง มันฝรั่ง และข้าวโพด (ปราณี อ่านเปรื่อง, 2535) เป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยในงานวิจัยของ Gardner (1988) รายงานว่าไขมันฟอสโฟลิพิด และไกลโคลิพิดถูกไฮโดรไลซ์โดยเอนไซม์ไลเพส และไฮโดรเลสได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระ เช่น กรดลิโนเลอิก และกรดลิโนเลนิกที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์โดยเอนไซม์ไลพอกซีจิเนสได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารพวกไฮโดรเพอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารที่มีความเสถียรต่ำ และสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีกับองค์ประกอบอื่น ๆ ภายในข้าวได้ง่าย เช่น ทำปฏิกิริยาร่วมกับโปรตีนเกิดเป็นกลิ่นข้าวเก่าหรือกลิ่นหืนขึ้น (Ory และ Flick, 1992) หรือเกิดการสลายตัวต่อโดยมีการเร่งปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ hydroperoxidelyase ได้ผลิตภัณฑ์เป็น aldehydes เป็นต้น

บทที่ 3
วัตถุดิบ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

วัตถุดิบ

ข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งเก็บเกี่ยวในช่วงเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2557 จากศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท กรมการข้าว จังหวัดชัยนาท และเก็บไว้ในถุงอลูมินัมฟอยล์ ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4±1 °C จนกระทั่งนำมาทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

กรดกลูตามิก (L-glutamic acid) (Himedia, India) (Food grade)

กรดซิตริก (Citric acid) (Lobal Chemie, India) (A.R. grade)

ไตรโซเดียมซิเตรท (Tri-Sodium citrate) (Lobal Chemie, India) (A.R. grade)

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) (QRec, Malaysia) (A.R. grade)

เมทานอล (Methanol) (Fisher Chemical, UK) (A.R. grade)

เอทานอล (Ethanol) (Carlo Erba, France) (A.R. grade)

อะซีโตไนไตรล์ (Acetonitrile) (RCI Labscan, Thailand) (A.R. grade)

กรดบอริก (Boric Acid) (Q Rec, New Zealand) (A.R. grade)

กรดไตรฟลูออโรอะซิติก (Trifluoroacetic acid; TFA) (Sigma-Aldrich, USA) (A.R. grade)

Fluorenylmethyloxycarbonyl chloride (FMOC-Cl) (Sigma-Aldrich, China) (A.R. grade)

สารมาตรฐานกรดกาบา (standard GABA) (Sigma-Aldrich, China) (A.R. grade)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, MS1602/01, Switzerland)

เครื่องชั่งอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง (Mettler Toledo, MS304S/01, Switzerland)

เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) (Hermle babortechnik , Gmbit Z36K, Germany)

เครื่องบดละเอียด (warring blender) (Warring Commercial, 8010BU, USA)

เครื่องวัดสี (Minolata, CR400, Japan)

ตะแกรงร่อนขนาด 60 mesh (Retsch, test sieve, Germany)

เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dryer) (Labconco, freezone6, USA)

ตู้บ่ม (Memmert, Basic, Germany)

ตู้เย็น (Mallory, SES-3PT(NF), Thailand)

ตู้อบลมร้อน (Genlab, Prime, UK)

อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Julabo, SW23, Germany)

High Performance Liquid Chromatography (Agilent, 1100 series, UK)

Hot plate (Imarflex, IF404, Thailand)

pH meter (Mettler Toledo AG, 8603, Switezerland)

Texture Analyzer (Texture Technology Corp, Model TA-XT2, UK)

เครื่องเขย่าสาร (Vortex Mixer) (GENIE 2, G560E, USA)

หม้อฆ่าเชื้อ (Retort) (OFM, PP500, Thailand)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) (Agilent, 6890 series, UK)

แมสสเปกโทรมิเตอร์ (Mass Spectrometer) (Leco Inc., Pegasus III GC, Germany)

Solid Phase Microextraction (SPME) fiber (DVB/CAR/PDMS) (Supelco Analytical, 57328-U, USA)

เครื่องปิดผนึก (Seal machine) (SGS goldenpack, FRD1000LW, Thailand)

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.1.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอก

นำข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 มากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องสีข้าว จากนั้นคัดแยกสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ข้าวเมล็ดลีบ ข้าวเปลือก และเปลือกข้าว ออกจากข้าวกล้องเมล็ดสมบูรณ์ แล้วจึงนำข้าวกล้องที่ได้แช่ในสารละลายกรดกลูตามิกเข้มข้น 200 mM (วิธีการเตรียมแสดงในภาคผนวก ก.1) ในอัตราส่วนข้าวกล้อง 50 g ต่อสารละลาย 100 ml ที่ปรับสภาพความเป็นกรดด่างให้มี pH เท่ากับ 5.8 ด้วยซิเทรตบัฟเฟอร์ เข้มข้น 0.1 M (วิธีการเตรียมแสดงในภาคผนวก ก.2) ที่อุณหภูมิ 35 $^{\circ}$C นาน 12 ชั่วโมง จากนั้นล้างข้าวที่ผ่านการแช่ด้วยน้ำกลั่น สะเด็ดน้ำ แล้วนำไปบ่มเพื่อให้ข้าวงอกที่อุณหภูมิ 35 $^{\circ}$C นาน 24 ชั่วโมง เมื่อข้าวงอกตามต้องการแล้วนำไปอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 $^{\circ}$C จนมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 (dry basis) จึงบรรจุข้าวกล้องงอกที่เตรียมได้แบบสุญญากาศในถุงอลูมินัมฟอยล์ ชนิด Polyethylene terephthalate (PET) /aluminum foil (AL) /Low density polyethylene (LDPE) ขนาด 23 cm x 35.5 cm (บริษัท ราชวงศ์บรรจุภัณฑ์ จำกัด, ประเทศไทย) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 $^{\circ}$C จนกว่าจะนำมาทดลอง (ตามวิธีของ Khwanchai และคณะ, 2014)

3.1.2 การเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว

นำข้าวกล้องงอกมาซาวด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง เปลี่ยนน้ำจนกระทั่งข้าวสะอาด จากนั้นเติมน้ำลงในข้าวกล้องงอกในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 (w/w) แช่ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Panasonic รุ่น SR-G06, Thailand) จนกระทั่งหม้อหุงข้าวไฟฟ้าตัดไฟอัตโนมัติ ดงข้าวในหม้อเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเกลี่ยข้าว และดงข้าวต่อเป็นเวลา 5 นาที (ตามวิธีของ กรุณาพร ปานวรณ์ และ ชุติกา เกียรติเรืองไกร, 2555)

3.2 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก

นำข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกตามวิธีในข้อที่ 3.1 มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1. การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอก

3.2.1.1 อัตราการงอก (ดัดแปลงวิธีจาก ISTA, 2003) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.1)

3.2.1.2 อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้ม (water absorption during cooking) (ตามวิธีของ Juliano, 1985)

ใส่ตัวอย่างข้าวกล้องงอก 2 g ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 20 ml ปิดปากหลอดทดลองด้วยสำลี ก่อนนำไปหุงให้สุกในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 100 °C จากนั้นทำให้เย็นทันทีในอ่างน้ำแข็ง เทน้ำออกและวางเอียงหลอดทดลองเป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที จนน้ำออกหมด ชั่งน้ำหนักข้าวหลังการหุงต้ม และคำนวณอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มตามสมการ 3.1 โดยทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

$$\text{อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้ม} = \frac{B - A}{A} \qquad (3.1)$$

เมื่อ A คือ น้ำหนักข้าวก่อนการหุงต้ม

B คือ น้ำหนักข้าวหลังการหุงต้ม

3.2.1.3 ดัชนีความขาว (whiteness Index) (ตามวิธีของ Li และ Lee, 1996)

วัดค่าสีของข้าวกล้องงอกด้วยระบบ Hunter (L* a* b*) ด้วยเครื่องวัดสี (Model CR-400 Series, Minolta, Japan) โดยบรรจุข้าวกล้องลงใน Granular-materials attachment (CR-A50) วัดค่าสี 3 ซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย นำค่า L* a* และ b* มาคำนวณค่าดัชนีความขาว ดังแสดงในสมการ 3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\text{ดัชนีความขาว} = 100 - [(100-L)^{*2} + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \qquad (3.2)$$

3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก (proximate analysis) โดยวิเคราะห์อย่างละ 3 ซ้ำ

3.2.2.1 ความชื้น (ตามวิธีของ สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2545), 2545) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.2)

3.2.2.2 ไขมัน (ตามวิธีของ AOAC, 2012) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.3)

3.2.2.3 โปรตีน (ตามวิธีของ AOAC, 2010) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.4)

3.2.2.4 เถ้า (ตามวิธีของ Puwastien และคณะ, 2011) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.5)

3.2.2.5 คาร์โบไฮเดรต หาร้อยละของปริมาณคาร์โบไฮเดรตได้จากการคำนวณดังแสดงในสมการ 3.3

คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ) = 100 - (A + B + C + D) (3.3)

เมื่อ A คือ ร้อยละของความชื้น

B คือ ร้อยละของโปรตีน

C คือ ร้อยละของไขมัน

D คือ ร้อยละเถ้า

3.3 ศึกษาสภาวะในการหุงและการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เซชันทางการค้าของข้าวกล้องงอก

บรรจุข้าวกล้องงอกน้ำหนัก 50 g ลงในถุงรีทอร์ต ชนิด 12 μm polyethylene terephthalate/ 15 μm nylon/ 9 μm aluminum foil / 80 μm cast polypropylene ขนาด 14.5 cm x 17 cm (บริษัท รอแยล เมอิวะ แพ็คซ์ จำกัด, ประเทศไทย) จากนั้นเติมน้ำอุณหภูมิประมาณ 75-85 $^{\circ}$C ในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่คัดเลือกจากอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มในข้อที่ 3.2.1.2 ปิดผนึกด้วยเครื่องปิดปากถุง (SGS goldenpack, FRD1000LW, Thailand) ขณะร้อนแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ 115, 118 และ 121 $^{\circ}$C กำหนดค่า F_0 = 4 นาที (ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 301) พ.ศ. 2549 เรื่องอาหารในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท (ฉบับที่ 4) ได้กำหนดค่า F_0 ต้องไม่ต่ำกว่า 3 นาที) ด้วยหม้อฆ่าเชื้อภายใต้แรงดัน แบบ water spray retort จากการศึกษาการแทรกผ่านความร้อนเพื่อหาเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมอย่างน้อย 2 ซ้ำ ในทุกตัวอย่าง พบว่าการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 115 $^{\circ}$C มี come-up time = 12 นาที holding time = 23 นาที cooling time = 20 นาที ที่อุณหภูมิ 118 $^{\circ}$C มี come-up time = 12 นาที holding time = 12 นาที cooling time = 20 นาที และที่อุณหภูมิ 121 $^{\circ}$C มี come-up time = 12 นาที holding time = 6 นาที cooling time = 20 นาที จากนั้นนำข้าวหุงสุกที่มาวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุก และปริมาณกาบา เพื่อคัดเลือกสภาวะในการฆ่าเชื้อที่เหมาะสมต่อไป

3.4 ศึกษาผลของการฆ่าเชื้อระดับสเตอริไลซ์เซชันทางการค้าต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุก และปริมาณกาบา

นำข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการหุงสุกในรีทอร์ตที่สภาวะการค่าเชื้อที่อุณหภูมิ 115, 118 และ 121 $^{\circ}$C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที ตามข้อที่ 3.3 มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่

3.4.1 ดัชนีความขาว โดยใช้วิธีเช่นเดียวกับข้อที่ 3.2.1.3

3.4.2 ความแข็งของข้าวหุงสุก (cooked rice hardness) (ตามวิธีของสิริกาญจน์ เกียรติธนะไพบูลย์ และคณะ, 2551)

เตรียมตัวอย่างโดยอุ่นข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ให้มีอุณหภูมิที่ 70 ^{o}C ชั่งตัวอย่างข้าว 1 g เรียงบนฐานวัดเป็นชั้นเดียว กดตัวอย่าง 2 ครั้ง เพื่อศึกษาความแข็งของข้าวหุงสุกโดยวิธี Texture profile analysis (TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer, Model TA-XT2, Texture Technology Corp, UK) โดยใช้หัววัดชนิดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm. ระยะระหว่างหัววัดกับฐาน 8 mm. ระยะทางที่หัววัดกดตัวอย่าง 90% strain ความเร็วก่อนวัด ขณะวัด และหลังวัดเป็น 1 มม./วินาที วัดค่าทั้งหมด 3 ซ้ำ (โดยซ้ำของตัวอย่างคือข้าวกล้องงอกหุงสุก 1 ถุง)

3.4.3 อัตราส่วนการยืดตัวของเมล็ดข้าวหุงสุก (elongation ratio) และดัชนีการยืดตัวของเมล็ดข้าวหุงสุก (elongation index) (ตามวิธีของ Juliano และ Perez (1984), 1984)

สุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวกล้องงอกที่สมบูรณ์ ไม่แตกหักที่ไม่ผ่านและผ่านการหุงแล้วอย่างละ 10 เมล็ด วัดความกว้าง และความยาวของเมล็ดโดยใช้เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ (vernier caliper) คำนวณค่าอัตราส่วนการยืดตัวของเมล็ดข้าวหุงสุก และดัชนีการยืดตัวของเมล็ดข้าวหุงสุก ดังแสดงในสมการ 3.4 และ 3.5

$$\text{elongation ratio} = \frac{B}{A} \quad (3.4)$$

$$\text{elongation index} = \frac{D}{C} \quad (3.5)$$

เมื่อ A คือ ความยาวของเมล็ดข้าวก่อนหุงสุก

B คือ ความยาวของเมล็ดข้าวที่หุงสุก

C คือ อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของเมล็ดข้าวก่อนหุงสุก

D คือ อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของเมล็ดข้าวที่หุงสุก

3.4.4 <u>การวิเคราะห์ปริมาณกาบา</u> (ดัดแปลงวิธีจาก Khwanchai และคณะ, 2014; สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรอาหารแห่งชาติ, 2545)

3.4.4.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ปริมาณกาบา

นำข้าวกล้องงอกที่ผ่านการหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ –44 $^{\circ}$C ความดัน 67x10^{-3} mBar นาน 14 ชั่วโมง จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด (Waring blender) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 mesh จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกาบา

3.4.4.2 ขั้นตอนการสกัดกาบา

เตรียมตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.4.4.1 น้ำหนัก 200 mg ใส่ใน micro-centrifuge tube และเติมสารละลายเอทานอล 70% (v/v) ปริมาตร 800 µl และเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ที่ความเร็วรอบ 13000xg ที่อุณหภูมิ 4 $^{\circ}$C นาน 15 นาที แยกส่วนสกัดใสเก็บไว้ในขวด vial จากนั้นสกัดส่วนตะกอนที่อยู่ใน micro centrifuge tube ซ้ำอีกรอบโดยการเติมสารละลายเอทานอล 70% (v/v) ปริมาตร 800 µl ลงไปและปั่นเหวี่ยงเช่นเดิม จากนั้นแยกส่วนสกัดใสที่ได้มารวมกับส่วนสกัดใสส่วนแรก แล้วนำปั่นเหวี่ยงอีกครั้งเพื่อแยกเอาตะกอนที่อาจหลงเหลือออก เพื่อนำส่วนสกัดใสไปใช้ในการเตรียมอนุพันธ์ของกาบาในขั้นตอนถัดไป

3.4.4.3 ขั้นตอนการก่อให้เกิดสารอนุพันธ์ของกาบา (derivatization)

นำส่วนใสจากการสกัดในข้อ 3.4.4.2 ปริมาตร 1.0 ml และเติม FMOC-Cl (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3) ปริมาตร 2.0 ml ตามด้วยเติมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ 0.1M ปริมาตร 2.0 ml (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4) จากนั้นผสมสารละลายด้วยเครื่องเขย่าสาร (Vortex mixer) เป็นเวลา 30 วินาที ตั้งทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อให้เกิดสารอนุพันธ์ของกาบาอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปกรองผ่าน nylon syringe filter ที่มีขนาดรูเปิด 0.45 µm ลงขวด vial และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ต่อไป

3.4.4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณกาบาด้วยเครื่อง HPLC

วิเคราะห์ปริมาณกาบาด้วยเครื่อง HPLC (Agilent, 1100 series, USA) โดยใช้ reversed-phase HPLC column (Eclipse XDB-C 18 4.6 x 150 mm, 5 µm) ในการแยกสารอนุพันธ์ของกาบาใช้สารอะซิโตไนไตรล์ สารละลาย 0.05% กรดไตรฟลูออโรอะซิติก (TFA) และเมทานอล เป็น mobile phase การวิเคราะห์เริ่มจากนำสารละลายในข้อ 3.4.4.3 ปริมาตร 20 µl ฉีดเข้าเครื่อง HPLC แสดงผลเป็นโครมาโตแกรม (แสดงในรูปที่ ค.1 และ ค.2) คำนวณหาปริมาณกาบาโดยเทียบหาจากพื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน

3.5 การศึกษาอายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

เก็บข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เตรียมจากสภาวะที่ได้จากการคัดเลือกในข้อที่ 3.3 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน สุ่มตัวอย่างทุก 2 สัปดาห์ เพื่อวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.5.1 ดัชนีความขาว วัดค่าสี และคำนวณเช่นเดียวกับข้อที่ 3.2.1.3

3.5.2 ความแข็งของข้าวหุงสุก (cooked rice hardness) วัดค่าความแข็งเช่นเดียวกับข้อที่ 3.4.2

3.5.3 ปริมาณกาบาในข้าวกล้องงอกหุงสุก วิเคราะห์ปริมาณกาบาเช่นเดียวกับข้อที่ 3.4.4

3**.5.4 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้** (ดัดแปลงวิธีจาก กาญจนา มหัทธนทวี และคณะ, 2554)

3.5.4.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง และสกัดสารที่ระเหยได้จากตัวอย่าง

นำตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ น้ำหนัก 5 g ใส่ในขวด vial สีชา ขนาด 40 ml จากนั้นเติมสารละลาย 2-methyl-3-heptanone (1 ppm) ปริมาตร 1 µl เพื่อใช้เป็น internal standard (IS) ปิดด้วยฝาเกลียวปลายเปิดที่มีแผ่น Teflon-coated septum ปิดอยู่ด้านในของฝาเกลียว จากนั้นให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 30 °C นาน 15 นาที เพื่อให้สารที่ระเหยได้ภายในตัวอย่างข้าวกล้องหุงสุกระเหยอยู่เหนือตัวอย่างภายในหลอด vial และยังคงอุณหภูมิไว้ที่ 30 °C ขณะทำการสกัดด้วยเทคนิค Solid Phase Microextraction (SPME) โดยเลือกใช้ SPME fiber ชนิด Divinylbenzene/Carboxen/Polydimethylsiloxane เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำ fiber ที่ผ่านการดูดซับสารที่ระเหยจากตัวอย่างแล้วมาปลดปล่อย (desorp) ใน injection port (ที่ตั้งเป็นระบบ splitless injector) ของเครื่อง GC-MS ที่อุณหภูมิ 250 °C และให้ SPME fibers ค้างอยู่ภายใน glass liner เป็นเวลา 5 นาที เพื่อชะสารระเหยออกมาจาก fiber ก่อนดึงออก

3.5.4.2 สภาวะของเครื่อง GC-MS

วิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารระเหยด้วย GC-MS โดยชนิดของคอลัมน์ที่ใช้คือ RTX-5 capillary column (Agilent Technologies; column length = 30 m, inner diameter = 0.25 mm, film thickness = 0.25 µm) โดยมีก๊าซฮีเลียม (99.999%, TIG, Thailand) เป็น carrier gas ปรับให้มีอัตราการไหล 2.0 ml/min สภาวะในการแยกสาร โดยตั้งอุณหภูมิของ ion source เท่ากับ 230 °C อุณหภูมิของ transfer line เท่ากับ 260 °C และ

injection port ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 250 °C อุณหภูมิของ oven ที่ใช้เริ่มต้นที่ 60 เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 5 °C/min ถึง 280 °C ใช้ Electron impact ionization ใน positive ion mode (70 eV)

3.5.5 การประเมินสมบัติทางประสาทสัมผัส

ในการประเมินสมบัติทางประสาทสัมผัสใช้ผู้ทดสอบคือ นิสิตระดับปริญญาโทหรือปริญญาเอก ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ผ่านการคัดเลือกโดยการทำแบบสำรวจข้อมูลเพื่อคัดกรองกลุ่มผู้ทดสอบ (แสดงในภาคผนวก จ.1) และผ่านการอบรมการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยมีผู้ทำการวิจัยเป็นผู้นำเนินการจัดอบรม ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยทางอาหาร ระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเทคโนโลยีทางหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เวลาในการอบรม 1 วัน

จากนั้นเตรียมข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยวิธีรีทอร์ตตามสภาวะที่ผ่านการคัดเลือกพร้อมกับตัวอย่างอ้างอิงจำนวน 3 ตัวอย่าง คือ ข้าวกล้องหอมมะลิ ตราอีซี่โก (ตัวอย่างอ้างอิงของเกณฑ์ด้านความนุ่ม-แข็งของข้าว) ข้าวกล้องหอมมะลิเก่าที่เก็บรักษาจนเกิดกลิ่นหืนหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว (ตัวอย่างอ้างอิงของเกณฑ์กลิ่นหืน) ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อแรงดันไอน้ำ (Autoclave) (ตัวอย่างอ้างอิงของเกณฑ์ด้านลักษณะกลิ่นของธัญพืช) และ Munsell book of color 2.5Y (ตัวอ้างอิงของเกณฑ์ด้านความเข้มของสี) โดยตัวอย่างข้าวทั้งหมดนั้นต้องควบคุณอุณหภูมิให้อยู่ที่ 70 °C เสิร์ฟในถ้วยพลาสติกที่มีฝาปิด ปริมาณ 2 ช้อนโต๊ะ ทดสอบตัวอย่างก่อนที่อุณหภูมิจะต่ำกว่า 60 °C ให้ผู้ทดสอบพิจารณาตัวอย่างอ้างอิงควบคู่กับตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์เพื่อเป็นการ calibrate ความรู้สึกของผู้ทดสอบ โดยผู้ทดสอบจะให้คะแนน (0-15) ลงบนเส้นคะแนนในแบบประเมินทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพ้าช์ (แสดงในภาคผนวก จ.2) ตรงกับจุดที่ผู้ทดสอบรู้สึก ด้วยมีเกณฑ์คะแนนของตัวอย่างอ้างอิงที่ได้ตกลงกันไว้เป็นตัวควบคุม โดยผู้ทดสอบทั้ง 10 คนทำการทดสอบพร้อมกันภายในห้องปฏิบัติการวิจัยทางอาหาร ระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเทคโนโลยีทางหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ควบคุมบรรยากาศภายในห้องให้สงบ ปราศจากการรบกวน และไม่ให้ผู้ทดสอบพูดคุยปรึกษากัน โดยใช้เวลาในการทำทดสอบประมาณ 30 นาทีรวมทั้งสิ้น 13 ครั้ง คือ ในอายุการเก็บรักษาสัปดาห์ที่ 0 และทุกๆ 2 สัปดาห์ เป็นเวลานาน 6 เดือน โดยวิธีการประเมินสมบัติทางประสาทสัมผัสในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาจริยธรรมการวิจัย จากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในคนกลุ่มสหสถาบัน ชุดที่ 1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงการวิจัยที่ 108.1/59

เกณฑ์การคัดเข้าร่วมการวิจัย

- ผู้ทดสอบเพศชายหรือหญิง ที่มีอายุตั้งแต่ 20-35 ปี
- เป็นนิสิตระดับปริญญาโทหรือเอก ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สามารถรับประทานข้าวกล้องได้
- มีสุขภาพดี และไม่มีโรคประจำตัวร้ายแรง
- มีความยินดีที่จะเข้าร่วมในการวิจัยครั้งนี้
- ผ่านการอบรมการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อหาจุดคะแนนของตัวอย่างอ้างอิงในด้านสี กลิ่นรส และเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาซ์ โดยมีผู้ทำการวิจัยเป็นผู้นำเนินการจัดอบรม ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยทางอาหาร ระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเทคโนโลยีทางหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้เวลาในการอบรม 1 วัน

เกณฑ์การคัดออกจากการวิจัย

- ผู้ที่ไม่สามารถยอมรับเกณฑ์การตกลงร่วมกันในคะแนนของตัวอย่างอ้างอิงในด้านสี กลิ่นรส และเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาซ์
- ผู้ที่ไม่สามารถเข้าร่วมการทดสอบทางประสาทสัมผัสได้ครบทุกครั้ง (13 ครั้ง)

เกณฑ์การยุติการเข้าร่วมวิจัย

- ผู้มีส่วนร่วมในการวิจัยมีอาการข้างเคียง ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าไม่สามารถเข้าร่วมการวิจัยต่อไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6 การวางแผนการทดลองทางสถิติ

สำหรับการวัด/วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี วางแผนการทดลองทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (CRD) ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัส วางแผนการทดลองทางสถิติแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย วิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ใช้โปรแกรม SPSS Version 22

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณภาพของข้าวกล้องงอก

เมื่อนำข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ผ่านการงอก โดยแช่ในสารละลายกรดกลูตามิกมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาอัตราการงอกพบว่าข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 มีอัตราการงอกเท่ากับร้อยละ 96.92 (ตารางที่ 4.1) ซึ่งถือว่าข้าวกล้องที่นำมาใช้ในการทดลองมีอัตราการงอกที่สูงเหมาะสำหรับนำมาเพาะเป็นข้าวกล้องงอกได้ ทั้งนี้หากการทดสอบอัตราการงอกได้ค่าออกมาน้อยกว่าร้อยละ 80 จะถือว่าเป็นข้าวที่ไม่เหมาะที่จะนำมางอกเป็นข้าวกล้องงอก เนื่องจากมีโอกาสที่จะเกิดกลิ่นบูดระหว่างการเพาะจากเมล็ดที่ไม่สามารถงอก (เมล็ดที่ไม่มีชีวิต) ได้ (นงนุช วงศ์สินชวน, 2555) และค่าอัตราการงอกในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Khwanchai (2011) ที่ศึกษาอัตราการงอกของข้าวชนิดต่าง ๆ จำนวน 5 สายพันธุ์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 มีค่าอัตราการงอกที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับข้าวอีก 4 สายพันธุ์ (ขาวดอกมะลิ 105, ปทุมธานี 1, สุพรรณบุรี 1 และพิษณุโลก 2) โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.67

เมื่อศึกษาอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มของข้าวกล้องงอก (รายละเอียดแสดงใน 3.2.1.2) พบว่าตัวอย่างข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใช้ในการทดลองมีอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มเท่ากับ 2.55 g (น้ำ) ต่อข้าวกล้องงอก 1 g (ตารางที่ 4.1) ซึ่งค่าที่ได้ดังกล่าวจะใช้เป็นปริมาณน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการหุงข้าวกล้องงอกในรีทอร์ตเพาช์ต่อไป ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ กรุณาพร ปานวรณ์ และ ชุติกา เกียรติเรืองไกร (2555) ที่พบว่า การหุงข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 ด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบมีการซาว และการหุงแบบไม่เช็ดน้ำ มีอัตราส่วนการดูดซับน้ำระหว่างหุงต้มสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าประมาณ 2.43 g (น้ำ) ต่อข้าวกล้องงอก 1 g

เมื่อศึกษาค่าดัชนีความขาวของข้าวกล้องงอกพบว่า ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 มีค่าดัชนีความขาว (WI) เท่ากับ 45.21 (ตารางที่ 4.1) ซึ่งลดลงเมื่อเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก (WI = 47.72) เนื่องจากภายหลังกระบวนการงอกแล้วต้องผ่านการอบแห้งเพื่อไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน จนมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 (dry basis) ซึ่งความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งนี้เป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) และปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล (caramelization) เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 คุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1

คุณภาพของข้าวกล้องงอก	ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน*
อัตราการงอก (ร้อยละ)	96.92±1.15
อัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้ม (g/g)	2.55±0.16
ดัชนีความขาว (WI)	45.21±0.93

หมายเหตุ *ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 10 ซ้ำ

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ได้ผ่านการงอก พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของข้าวทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1

ตัวอย่าง	ความชื้น (g/100g)	เถ้า^{NS} (g/100g)	ไขมัน^{NS} (g/100g)	โปรตีน (g/100g)	คาร์โบไฮเดรต (g/100g)
ข้าวกล้อง	10.85^{b} ± 0.04	1.45 ± 0.01	3.35 ± 0.04	7.16^{b} ± 0.01	77.19^{a} ± 0.07
ข้าวกล้องงอก	11.41^{a} ± 0.03	1.42 ± 0.00	3.36 ± 0.15	7.38^{a} ± 0.03	76.44^{b} ± 0.10

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a, b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

NS ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าข้าวกล้องงอก มีปริมาณความชื้นและโปรตีนสูงกว่าข้าวกล้องที่ยังไม่ผ่านการงอก โดยหลังจากผ่านกระบวนการงอกความชื้นของข้าวกล้องเพิ่มขึ้นจาก 10.85 g/100g (dry basis) เป็น 11.41 g/100g (dry basis) เนื่องจากในขั้นตอนการงอกนั้นเป็นการให้ความชื้นแก่เมล็ดข้าวเพื่อให้เมล็ดข้าวเกิดการงอกแล้วจึงนำไปทำให้แห้งในขั้นถัดไป นอกจากนั้นการงอกยังสามารถทำให้ปริมาณของโปรตีนสูงขึ้นจาก 7.16 g/100g (dry basis)

เป็น 7.38g/100g (dry basis) ทั้งนี้เนื่องจากข้าวกล้องมีส่วนของจมูกข้าวหรือคัพภะ ซึ่งเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยโปรตีน เมื่อเกิดการงอกจะมีการเจริญของส่วนดังกล่าวโดยเอนไซม์ในเมล็ดข้าวกระตุ้นให้เร่งปฏิกิริยาการสร้างโปรตีนโดยอาศัยพลังงานในเซลล์ (Kaushik และคณะ, 2010) ทำให้ข้าวกล้องที่ผ่านการงอกแล้วมีปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลจากการงอกนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Vongsudin และคณะ (2012) ที่รายงานว่าการงอกสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนในข้าวหอมนิลจากร้อยละ 7.99 เป็นร้อยละ 11.80 ข้าวเหนียวดำจากร้อยละ 7.54 เป็นร้อยละ 11.16 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากร้อยละ 8.16 เป็นร้อยละ 9.74 เมื่อพิจารณาปริมาณคาร์โบไฮเดรต พบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงหลังจากการงอก โดยลดลงจาก 77.19 g/100g (dry basis) เป็น 76.44 g/100g (dry basis) ทั้งนี้การลดลงของคาร์โบไฮเดรตเกิดจากการถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์กลุ่ม hydrolase เช่น amylase และ phosphorylase โดยเปลี่ยนน้ำตาลที่ละลายไม่ได้ให้อยู่ในรูปของน้ำตาลที่ละลายได้ ซึ่งเป็นรูปที่สามารถลำเลียงให้เคลื่อนย้ายไปยังเอ็มบริโอเพื่อสร้างพลังงาน รวมถึงสร้างเอนไซม์เพื่อการเจริญเติบโตของต้นอ่อน และส่งผลให้ข้าวที่ผ่านการงอกมีปริมาณน้ำตาลเพิ่มขึ้น (Saman และคณะ, 2008) ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moongngarm และ Saetung (2010) ซึ่งพบว่าข้าวงอกมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงแต่มีปริมาณโปรตีน วิตามินอี วิตามินบี 1 สารฟินอลิค และ GABA เพิ่มขึ้น

4.3 สภาวะในการหุงข้าวกล้องงอกในรีทอร์ตเพาช์

จากการศึกษาการแทรกผ่านความร้อนของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ด้วยเครื่อง water-spray retort พบว่ากระบวนการฆ่าเชื้อผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิ 115, 118, และ 121 °C มี come-up time, holding time, และ cooling time ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และลักษณะของลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 come-up time, holding time และ cooling time ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที

อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ (°C)	come-up time (นาที)	holding time (นาที)	cooling time (นาที)
115	12	23	22
118	12	12	33
121	12	6	38

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4.1 ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อที่ (ก) 115 °C, (ข) 118 °C และ (ค) 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที

4.4 คุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

4.4.1 ค่าดัชนีความขาว

เมื่อนำข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวและข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 115, 118 และ 121 °C มาวัดค่าสี ซึ่งประกอบด้วยค่า L* (ค่าความสว่าง) , a* [(-)ค่าความเป็นสีเขียว ถึง (+) ค่าความเป็นสีแดง] และ b* [(-) ค่าความเป็นสีน้ำเงินถึง (+) ค่าความเป็นสีเหลือง] แล้วคำนวณค่าดัชนีความขาว (WI) ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ากระบวนการหุงสุกด้วยรีทอร์ตทำให้ค่าความสว่างลดลง และค่าสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว ซึ่งส่งผลให้ค่า WI ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากขั้นตอนการหุงข้าวให้สุกด้วยรีทอร์ตนั้น ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าการหุงด้วยหม้อหุงข้าว (100 °C) และเมื่อพิจารณาข้าวกล้องงอกเฉพาะที่ผ่านกระบวนการหุงสุกด้วยรีทอร์ต พบว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C มีสีเข้มกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกอีกสองอุณหภูมิ เนื่องจากข้าวกล้องงอกมีองค์ประกอบของน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น ฟรักโทส และกลูโคส เป็นต้น ที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนจากโปรตีน และเกิดสารเมลานอยดิน (melanoidins) ซึ่งมีสีน้ำตาลขึ้น (Sirisoontaralak และ Noomhorm, 2007) ซึ่งเรียกปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ดังกล่าวนี้ว่าปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงส่งผลให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกที่อุณหภูมิสูงมีค่าดัชนีความขาวน้อยกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leelayuthsoontorn

และ Thipayarat (2006) ที่รายงานว่าข้าวหอมมะลิที่ผ่านการหุงสุกที่อุณหภูมิ 80, 100, 120 และ 140 °C ที่ความดัน 0.3 MPa มีค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 69.22 ± 0.11, 66.06 ± 0.47, 65.30 ± 0.14 และ 64.92 ± 0.12 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในการหุงต้มที่มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ข้าวค่าดัชนีความขาวลดต่ำลง

ตารางที่ 4.4 ค่าสีและดัชนีความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า และข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที

ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยวิธี	L*	a*	b*^{NS}	WI
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	48.46^{a} ± 0.81	-0.49^{b} ± 0.03	7.68 ± 0.25	47.89^{a} ± 0.80
รีทอร์ตที่ 115 °C	40.45^{b} ± 0.21	-0.15^{a} ± 0.05	7.81 ± 0.09	39.54^{b} ± 0.21
รีทอร์ตที่ 118 °C	39.88^{b} ± 0.12	-0.16^{a} ± 0.05	7.75 ± 0.28	39.38^{b} ± 0.11
รีทอร์ตที่ 121 °C	38.46^{c} ±0.82	-0.16^{a}±0.04	7.68 ± 0.25	37.98^{c} ± 0.80

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a-c ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

NS ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2 ความแข็งของข้าวกล้องงอกหุงสุก

เมื่อนำข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวและข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 115, 118 และ 121 °C มาวิเคราะห์ความแข็ง (hardness) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยค่า hardness ถือเป็นปัจจัยด้านคุณภาพที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในผลิตภัณฑ์ข้าวหุงสุก (Sumrerath และคณะ, 2008) โดยค่า hardness เทียบได้กับแรงของการเคี้ยวครั้งแรก จากการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุก ได้แก่ ปริมาณแอมิโลส (amylose) แอมิโลเพคติน (amylopectin) โปรตีน ไขมัน และความชื้น (Ong และ Blanshard, 1995) แต่จากการทดลองนี้ใช้ข้าวชนิดเดียวกัน ปริมาณองค์ประกอบภายในจึงไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.5 พบว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 121 °C มีค่า hardness เท่ากับ 10.20±1.51 kg_F ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (100 °C) และข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์อีกสองอุณหภูมิ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเกิดจาก

อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อที่สูง ส่งผลให้พันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวถูกทำลาย และแตกออกเป็นสายที่สั้นลง สายโซ่ที่สั้นลงนี้จึงเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวใหม่ เกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีความแข็งแรงและจัดเรียงตัวกันแน่นในระหว่างกระบวนรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) (Shelp และคณะ, 1999; Thompson, 2000) จึงทำให้ตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อสูงมีค่า hardness เพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชลลดา รุ่งอิทธิวงศ์ (2556) ที่รายงานผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 121 °C ก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กที่ได้มีค่าแรงกดสูงสุดมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อสัมผัสของก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 115 และ 118 °C

ตารางที่ 4.5 ความแข็งของข้าวกล้องงอกหุงสุก (cooked rice hardness) ในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที

ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วย	hardness (kg_F)
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	$1.40^{c} \pm 0.04$
รีทอร์ตที่ 115 °C	$8.68^{b} \pm 0.62$
รีทอร์ตที่ 118 °C	$7.73^{b} \pm 0.42$
รีทอร์ตที่ 121 °C	$10.02^{a} \pm 1.51$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a, c ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.4.3 Elongation ratio (ER) และ elongation index (EI) ของข้าวกล้องงอกหุงสุก

เมื่อนำข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวและข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ 115, 118 และ 121 °C มาวิเคราะห์ค่า ER และ EI ของข้าวกล้องงอกหุงสุก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 elongation ratio (ER) และ elongation index (EI) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C กำหนดค่า F_0 = 4 นาที

ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วย	elongation ratio	elongation index
หม้อหุงข้าวไฟฟ้า	$1.13^{b} \pm 0.03$	$0.42^{b} \pm 0.15$
รีทอร์ตที่ 115 °C	$1.63^{a} \pm 0.20$	$0.52^{a,b} \pm 0.13$
รีทอร์ตที่ 118 °C	$1.48^{a} \pm 0.19$	$0.62^{a} \pm 0.17$
รีทอร์ตที่ 121 °C	$1.52^{a} \pm 0.24$	$0.62^{a} \pm 0.17$

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 10 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a,b ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ค่า ER เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าวที่หุงสุกแล้วซึ่งเกิดขึ้นจากการพองตัวของเม็ดแป้งหลังจากการดูดซับน้ำเข้าไปในเมล็ด (Juliano, 1979) สำหรับค่า EI เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการขยายตัวหรือพองตัวของข้าวสุก ถ้ามีค่ามากแสดงว่าตัวอย่างมีการพองตัวได้ดี (Hossain และคณะ, 2009) สำหรับการหุงข้าวนั้น ข้าวที่หุงขึ้นหม้อดีเกิดจากปรากฏการณ์ที่เม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของข้าวได้รับความร้อนและมีน้ำในปริมาณที่เพียงพอเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวซึ่งเรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ส่งผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวนุ่มลง จากการพิจารณาค่า ER และ EI (ตารางที่ 4.6) พบว่าค่า ER และ EI ของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ทั้งสามอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าน้อยกว่าการหุงด้วยรีทอร์ต และเมื่อพิจารณาข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิต่างกันค่า ER และ EI ไม่มีความแตกต่างกัน ($p>0.05$) เนื่องจากน้ำที่ใช้ในการหุงมีปริมาณเท่ากัน และเป็นปริมาณที่ได้จากการทดลองเพื่อหาปริมาณน้ำที่เพียงพอที่ทำให้ข้าวหุงสุก (จากข้อ 4.1) ซึ่งผลในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก และคณะ (2554) ที่ได้ศึกษา ER และ EI ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกพันธุ์ช่อลุงสำเร็จรูปที่บรรจุในกระป๋อง ที่พบว่า อัตราส่วนของน้ำที่ใช้ในการผลิตข้าวกล้องงอกสำเร็จรูปที่บรรจุในกระป๋องที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า ER ของตัวอย่าง มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.5 ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

เมื่อนำข้าวกล้องงอกที่ผ่านกระบวนการหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อุณหภูมิการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที มาวิเคราะห์ปริมาณกาบาด้วยเครื่อง HPLC (ตามวิธีที่แสดงในข้อ 3.4.4) คำนวณปริมาณกาบาโดยการเปรียบเทียบกับกราฟของสารละลายกาบามาตรฐาน (รูปที่ ง.1 ในภาคผนวก ง.) ปริมาณกาบาในตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์เปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณกาบาในข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที

ตัวอย่าง	ปริมาณกาบา (mg/100g)
ข้าวกล้องงอก	$26.25^{c} \pm 0.64$
ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า	$24.73^{d} \pm 0.37$
ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยรีทอร์ตที่ 115 °C	$24.80^{d} \pm 0.31$
ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยรีทอร์ตที่ 118 °C	$30.96^{b} \pm 0.70$
ข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยรีทอร์ตที่ 121 °C	$37.62^{a} \pm 0.35$

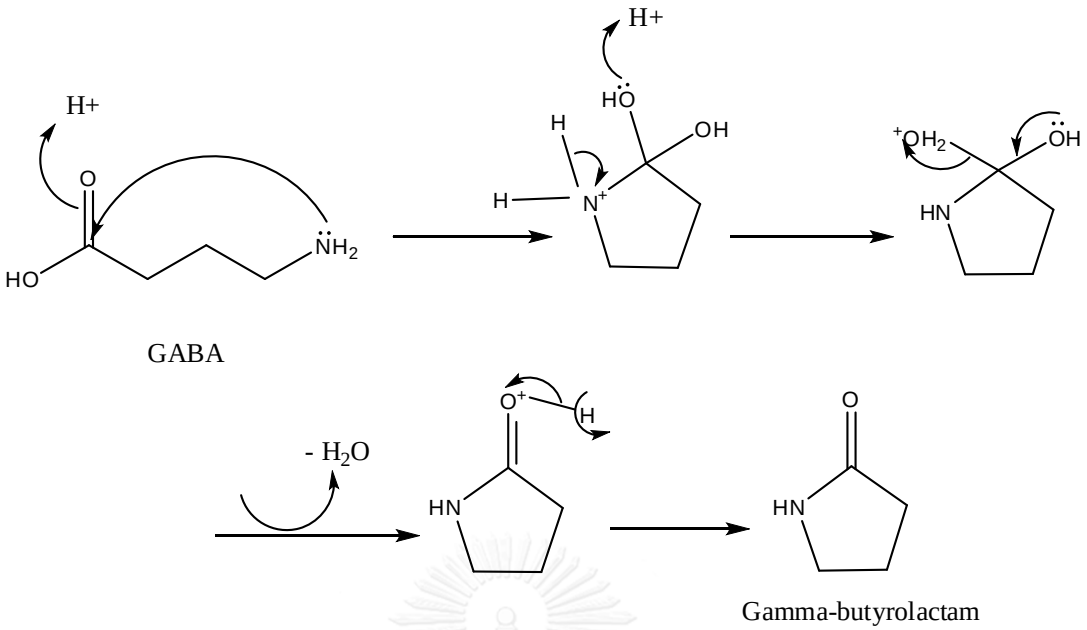
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a-d ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.7 ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ ที่สภาวะการฆ่าเชื้อ 121 °C มีปริมาณกาบาสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) คือ 37.62 mg/100 g ถัดมาคือ สภาวะการฆ่าเชื้อ 118, 115 °C และข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณกาบา 30.96, 24.80 และ 24.73 mg/100 g ตามลำดับ โดยพบว่าปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกมีค่าสูงกว่าข้าวกล้องงอกที่ยังไม่ได้หุง ยกเว้นที่สภาวะฆ่าเชื้อ 115 °C และหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เนื่องจากในข้าวกล้องงอกมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากข้าวขาวที่ผ่านการขัดสี คือ ยังมีส่วนของเปลือกเมล็ดจนถึงคัพภะอยู่ โดยบริเวณดังกล่าวเป็นส่วนที่สำคัญ เนื่องจากมีการสะสมของสารอาหารต่าง ๆ เช่น แร่ธาตุ วิตามิน เอนไซม์ รวมถึงกาบา อยู่ในปริมาณที่สูง โดยโครงสร้างหลักของบริเวณดังกล่าว คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (รัชพล พะวงศ์รัตน์, 2558) เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุก ความร้อน และน้ำจะทำลาย

โครงสร้างผนังเซลล์ของเปลือกหุ้มเมล็ดข้าว ทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการบวม และพองตัว โดยความร้อนสูงยังสามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ ทำให้ลดความเป็นโครงสร้างผลึก ลดขนาดของสายพอลิเมอร์เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสให้เล็กลง (อธิป บุญศิริวิทย์, 2553) ดังนั้นในขั้นตอนของการสกัดสารกาบาด้วยสารละลาย 70% เอทานอล ความสามารถในการสกัด (extractability) กาบาจากตัวอย่างที่ผ่านการหุงสุกแล้วจะดีกว่าข้าวกล้องงอก (ไม่ผ่านกระบวนการหุง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กรุณาพร ปานวรณ์ และ ชุติกา เกียรติเรืองไกร (2555) ที่ศึกษากรรมวิธีการหุงแบบต่าง ๆ เช่น การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบมีการซาวน้ำ หุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่มีการซาวน้ำ หุงด้วยไมโครเวฟ หุงแบบเช็ดน้ำ และหุงแบบไม่เช็ดน้ำ ต่อปริมาณกาบา ซึ่งพบว่า ข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 ที่หุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าแบบไม่มีการซาวน้ำ มีปริมาณกาบาสูงที่สุด (78.43 mg/100g) รองลงมาคือ หุงด้วยไมโครเวฟ (74.92 mg/100g) และหุงแบบไม่เช็ดน้ำ (74.2 mg/100g) โดยวิธีการหุงดังที่กล่าวมานั้นมีปริมาณกาบาสูงกว่าข้าวกล้องงอก (67.94 mg/100g) ซึ่งเป็นตัวอย่างอ้างอิง และในงานวิจัยของ Tananuwong และ Tangsrianugul (2012) ที่ศึกษาผลของสภาวะในการเก็บรักษา และการหุงสุกต่อสีและปริมาณของสารประกอบกลุ่มฟีนอล (phenolic compounds) และฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากข้าวหอมมะลิแดง ที่พบว่าปริมาณแอนโทไซยานิน มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อผ่านกระบวนการหุงสุก โดยผู้วิจัยได้อธิบายว่า ความร้อนและน้ำที่ใช้ในการหุงอาจทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ในชั้นเปลือกหุ้มของเมล็ดข้าว ทำให้ความสามารถในการสกัดแอนโทไซยานินด้วยเมทานอลจากตัวอย่างที่ผ่านการหุงสุกแล้วสูงขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการหุงสุกจะมีความสามารถในการสกัดของกาบาได้เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบข้าวกล้องงอกหุงสุกที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณกาบาในข้าวกล้องงอกหุงสุกเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากในสภาวะฆ่าเชื้อ 118 และ 121 °C ใช้เวลาฆ่าเชื้อเพียง 12 และ 6 นาที (ตารางที่ 4.3) ทำให้ปรากฏการณ์ดังกล่าวเอาชนะผลกระทบจากการสลายตัวของกาบาเนื่องจากความร้อนได้ ต่างจากสภาวะฆ่าเชื้อ 115 °C ที่ใช้เวลาฆ่าเชื้อนานถึง 23 นาที จึงเกิดการสลายตัวของกาบาเนื่องจากความร้อนมากกว่าที่สภาวะฆ่าเชื้อ 118 และ 121 °C ส่งผลให้ มีปริมาณกาบาน้อยกว่าข้าวกล้องงอก โดยงานวิจัยของ Khan และคณะ (2015) ที่ศึกษา degradation kinetics ของกาบาในอังคัก (monascus fermented rice) ที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเวลาที่ให้ความร้อนมากขึ้น ปริมาณกาบาจะลดลง เนื่องจากความร้อนจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวของกาบาโดยเกิดการปิดวงแหวนเนื่องจากปฏิกิริยาการกำจัด (elimination) โมเลกุลของน้ำออกจากโมเลกุลกาบา ได้ผลิตภัณฑ์เป็น γ-butyrolactam โดยมีกลไกดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการกำจัด (elimination) โมเลกุลของน้ำออกจากโมเลกุลกาบา

เมื่อพิจารณาข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าว พบว่ามีปริมาณกาบาต่ำที่สุด (24.73 mg/100g) ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการหุงด้วยหม้อหุงข้าวที่ผู้วิจัยมีการซาวน้ำทิ้ง ส่งผลให้กาบา ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง (Shelp และคณะ, 1999) สูญเสียไปพร้อมกับน้ำในขั้นตอนการซาวน้ำนี้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กรุณาพร ปานวรณ์ และ ชุติกา เกียรติเรืองไกร (2555) ที่พบว่ากระบวนการหุงที่มีการซาวน้ำหรือการเช็ดน้ำ มีปริมาณกาบาที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการหุงสุกและผ่านกระบวนการหุงสุกที่ไม่มีการซาวน้ำหรือการเช็ดน้ำ

4.6 ผลของอายุการเก็บรักษาต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

จากการศึกษาสภาวะในการหุงข้าวกล้องงอกในรีทอร์ตเพาช์ เพื่อคัดเลือกสภาวะการฆ่าเชื้อที่เหมาะสม โดยแปรอุณหภูมิเป็น 115, 118 และ 121 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาทีนั้น เมื่อวิเคราะห์คุณภาพในด้านต่าง ๆ ปริมาณกาบา ร่วมกับการพิจารณาลักษณะปรากฏของตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุก (รูปที่ 4.1) พบว่าตัวอย่างที่สภาวะการฆ่าเชื้อที่ 118 °C มีคุณภาพในด้านต่าง ๆ และมีปริมาณกาบาที่เหมาะสม รวมทั้งมีลักษณะปรากฏที่ดีกว่าตัวอย่างอื่น เนื่องจากเมล็ดข้าวสุกอย่างทั่วถึง ไม่แข็งหรือเละ จึงเลือกสภาวะการฆ่าเชื้อ 118 °C โดยกำหนดค่า F_0 = 4 นาที เป็นสภาวะที่ใช้

ในการผลิตตัวอย่างเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ โดยเก็บรักษาตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน และสุ่มตัวอย่างทุก 2 สัปดาห์ เพื่อตรวจสอบคุณภาพ วิเคราะห์ผล และศึกษาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษาดังต่อไปนี้

4.6.1 ดัชนีความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

เมื่อนำตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่เวลาต่าง ๆ กัน มาวัดสีและคำนวณค่าดัชนีความขาว ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าสีและดัชนีความขาว (WI) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

อายุการเก็บรักษา (สัปดาห์)	L*	a*	b*	WI
0	52.45^{a} ±0.26	-0.94^{e} ±0.31	9.53^{a} ±0.67	51.49^{a} ±0.32
2	52.28^{a} ±0.35	-0.92^{e} ±0.30	$9.26^{a,b}$ ±0.50	51.38^{a} ±0.34
4	50.84^{b} ±0.85	-0.76^{d} ±0.21	$9.20^{a,b,c}$ ±0.63	49.98^{b} ±0.78
6	49.01^{c} ±0.27	-0.75^{d} ±0.02	$9.14^{a,b,c}$ ±0.66	48.19^{c} ±0.33
8	48.50^{d} ±0.32	-0.75^{d} ±0.18	$8.91^{b,c}$ ±0.54	47.73^{d} ±0.34
10	48.40^{d} ±0.60	-0.74^{d} ±0.07	$8.78^{b,c}$ ±1.04	47.64^{d} ±0.44
12	47.07^{e} ±0.54	-0.72^{d} ±0.20	8.72^{c} ±0.44	46.35^{e} ±0.52
14	47.05^{e} ±0.46	-0.43^{c} ±0.12	7.26^{d} ±0.79	46.55^{e} ±0.36
16	$46.87^{e,f}$ ±0.43	-0.32^{c} ±0.16	6.34^{e} ±0.27	46.49^{e} ±0.44
18	$46.75^{e,f,g}$ ±0.58	0.44^{b} ±0.15	4.88^{f} ±0.54	46.53^{e} ±0.57
20	$46.68^{e,f,g}$ ±0.59	0.49^{b} ±0.07	3.91^{g} ±0.37	46.53^{e} ±0.58
22	$46.58^{f,g}$ ±0.58	0.76^{a} ±0.11	3.82^{g} ±0.54	46.44^{e} ±0.60
24	46.44^{g} ±0.61	0.83^{a} ±0.06	3.48^{g} ±0.64	46.32^{e} ±0.61

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a-g ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พบว่าเมื่ออายุการเก็บเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความขาวมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากในขั้นตอนการหุงสุก เม็ดสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวจะเกิดการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ โมเลกุลของแอมิโลส และแอมิโลเพกตินที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดสตาร์ช จะคลายตัวและหลุดออกมารวมกับน้ำที่ล้อมรอบ เมื่อปล่อยตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกให้เย็นตัวลง หรือที่ระยะการเก็บรักษาที่นานขึ้นโมเลกุลของแอมิโลส และแอมิโลเพกตินที่เคยรวมตัวกับน้ำ จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันแล้วเกิดการเชื่อมต่อกันเองใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน และขับน้ำที่เคยจับอยู่ออกจากโมเลกุล (syneresis) และเกิดเป็นผลึกใหม่ หรือเรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งจะทำให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวจัดเรียงกันแน่นหนาขึ้น ลักษณะปรากฏของข้าวจึงมีลักษณะทึบแสงมากขึ้น (Yu และคณะ, 2010) ค่า L* จึงมีค่าลดลง และเมื่อคำนวณค่า WI จึงมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน การลดลงของค่า WI นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ สวนีย์ หอรังสิวัฒน์ และ นันทวัน เทอดไทย (2558) ที่รายงานค่าดัชนีความขาวของข้าวที่ผ่านการหุงด้วยไมโครเวฟและข้าวที่ผ่านการหุงด้วยหม้อความดันและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 8 ºC พบว่า ค่า L* และ b* มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดรีโทรเดชัน ส่งผลให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกที่แข็งแรงขึ้น ทำให้ลักษณะปรากฏของข้าวมีความทึบแสง แต่อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาข้าวหุงสุกในช่วง 3 – 6 วัน ยังไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีความขาวอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ข้าวกล้องงอกหุงสุกที่ผ่านเก็บรักษานานขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารสีน้ำตาล ส่งผลให้ค่าความขาวมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ศิโรรัตน์ กาญจนสำราญวงศ์ (2556) ที่ศึกษาผลของน้ำมันพืชต่อรีโทรเกรเดชันและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งพบว่าข้าวหุงสุกที่เติมน้ำมันจากเมล็ดปาล์ม น้ำมันมะกอกและน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน ปริมาณร้อยละ 3 และ 6 หลังการเก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ทุกตัวอย่างมีค่าความขาวลดลงที่ทุกอุณหภูมิการเก็บรักษา เนื่องจากการเสื่อมสภาพของคุณภาพของข้าวหรืออาจเป็นเพราะปฏิกิริยาเมลลาร์ด

4.6.2 ความแข็งของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

เมื่อนำตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่เวลาต่าง ๆ มาวัดค่าความแข็ง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9 ซึ่งพบว่าเมื่อเก็บรักษาข้าวกล้องงอกหุงสุกนานขึ้นค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษาจะเกิดรีโทรเกรเดชัน (Hoover, 1995) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกที่แข็งแรงขึ้น (Shelp และคณะ, 1999; Thompson, 2000; Yu และคณะ, 2010) แล้วเกิดการขับน้ำออกทำให้ข้าวมีความแข็งมากขึ้น ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันนี้ ทำให้ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่ผ่านการเก็บรักษามีเนื้อสัมผัสที่แข็งและร่วนขึ้น โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เมย

วดี แซ่เลี้ยว (2547) ที่ศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวสำเร็จรูปบรรจุกระป๋องด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยใช้ข้าวหอมมะลิ และข้าวขาวตาแห้งที่ระยะเวลาเก็บรักษานาน 8 เดือนที่อุณหภูมิห้องพบว่า เมื่อเก็บรักษานานขึ้นข้าวทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มการเกิดรีโทรเกรเดชัน และความแข็งของข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ เทวี คุ้มวงศ์ และ สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ (2553) ศึกษาผลเอนไซม์แอลฟาแอมิเลส ซอร์บิทอล ทรีฮาโลส ซูโครส และน้ำต่อการชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันในข้าวสำเร็จรูปพร้อมรับประทานบรรจุกระป๋อง นาน 6 เดือน พบว่าเมื่ออายุเก็บรักษานานขึ้น ค่าเอนทาลปีของการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าอายุการเก็บรักษาของข้าวที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน และความแข็งของข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4. 9 ความแข็ง (hardness) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

อายุการเก็บรักษา (สัปดาห์)	hardness (kg_F)		
0	8.73^{e}	±	0.73
2	$9.02^{d,e}$	±	0.85
4	$9.33^{d,e}$	±	0.88
6	$9.58^{c,d}$	±	0.82
8	$10.14^{b,c}$	±	0.53
10	10.28^{b}	±	0.76
12	$10.54^{a,b}$	±	0.98
14	$10.54^{a,b}$	±	0.67
16	$10.71^{a,b}$	±	0.99
18	$10.65^{a,b}$	±	0.81
20	$10.76^{a,b}$	±	0.89
22	11.02^{a}	±	0.99
24	11.11^{a}	±	0.72

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a-e ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.6.3 ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

เมื่อนำตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่เวลาต่าง ๆ มาวิเคราะห์หาปริมาณกาบา (ตารางที่ 4.10)

ตารางที่ 4.10 ปริมาณกาบาในของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

อายุการเก็บรักษา (สัปดาห์)	ปริมาณกาบา (mg/100g) dry basis
0	43.87^{a} ± 0.62
2	$42.20^{a,b}$ ± 0.88
4	$39.53^{b,c}$ ± 1.04
6	38.15^{c} ± 1.88
8	36.91^{c} ± 1.54
10	30.13^{d} ± 2.78
12	$27.49^{d,e}$ ± 1.57
14	$23.98^{e,f}$ ± 1.08
16	$21.00^{f,g}$ ± 0.28
18	$20.98^{f,g}$ ± 1.06
20	19.41^{g} ± 0.79
22	13.78^{h} ± 1.32
24	12.31^{h} ± 2.05

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a-h ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีค่าลดลงจาก 43.87 mg/100g (dry basis) เป็น 12.31 mg/100g (dry basis) เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 24 สัปดาห์ ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากกาบาถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยหมู่แอมิโน ($-NH_3$) บริเวณแกมมาคาร์บอนในโมเลกุลของกาบา (รูปที่ 2.3) (Shelp และคณะ, 1999) ทำปฏิกิริยากับน้ำตาลรีดิวส์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมลานอยดิน (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2551) จึงทำให้ปริมาณกาบาลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าสีและดัชนีความขาว (WI) ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 4.8) ที่พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น ค่า L* และ WI ลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเพิ่มมากขึ้น

4.7 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้

เมื่อนำข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ มาศึกษาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ด้วยเทคนิค HS-SPME/GC-MS ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.11 จากการศึกษา พบสารระเหยที่ให้กลิ่นของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีจำนวน 21 ชนิด โดยสามารถแบ่งตามกลุ่มตามโครงสร้างทางเคมีได้เป็น 7 กลุ่ม ได้แก่ แอลกอฮอล์ (alcohols), อัลดีไฮด์ (aldehydes), กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids), เอสเทอร์ (esters), สารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic compounds), คีโตน (ketones) และสารประกอบซัลเฟอร์ (sulfur compounds)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.11 ผลของอายุการเก็บรักษาต่อปริมาณของสารระเหยที่ให้กลิ่นในข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่แยกตามกลุ่มโครงสร้างทางเคมี พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณดังนี้

สารกลุ่มแอลกอฮอล์ พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์เพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทแอลกอฮอล์มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในระหว่างการเก็บรักษา โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (primary alcohols) จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทอัลดีไฮด์ (aldehydes) หรือกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) เช่น 1-hexanol เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจะเปลี่ยนเป็น hexanal แต่หากเป็นแอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary alcohols) เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วจะเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบประเภทคีโตน (ketones) (Tojo และ Fernández, 2006)

สารประเภทอัลดีไฮด์ พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นปริมาณของสารประกอบประเภทอัลดีไฮด์ เช่น hexanal, nonanal และ decanal มีแนวโน้มพิ่มสูงขึ้น อาจเนื่องจาก

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลดีไฮด์ ดังที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอัลดีไฮด์นี้สอดคล้องกับปริมาณ alcohols ที่ลดลง อีกทั้งอาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation) ระหว่างออกซิเจนกับลิพิด เช่น ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) โดยสามารถแบ่งกลไกการเกิดได้ 3 ขั้นดังนี้

- ขั้นเริ่มต้น (initiation) ขั้นตอนการเริ่มเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) โดยเริ่มจากคาร์บอนที่ตำแหน่งพันธะคู่ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เกิดการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอม ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง รังสี โลหะ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ไฮโดรคาร์บอน (R•) ซึ่งอะตอมอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นเป็น unpair electron ที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูง
- ขั้นลุกลาม (propagation) เกิดจากออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่เกิดเป็น peroxy radical (ROO•) ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากมาย โดย peroxy radical ทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวใหม่ ได้ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (ROOH)
- ขั้นสุดท้าย (termination) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะมารวมตัวกันเองเกิดเป็นสารใหม่ (secondary product) ประเภทแอลดีไฮด์ เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดสีกลิ่น และรส ที่ผิดปกติ เรียกว่า การหืน (rancidity) เช่น hexanal, nonanal และ decanal ซึ่งมีการรายงานว่าสารดังกล่าวเป็นสารให้กลิ่นข้าวเก่าในข้าวหอมหุงสุก (Buttery และคณะ, 1983)

โดยสารประกอบประเภทอัลดีไฮด์จะให้ลักษณะกลิ่นเขียวเล็กน้อย หรือกลิ่นคล้ายหญ้า (slightly green or grassy odor) และสารประกอบประเภทอัลดีไฮด์อิ่มตัวจะให้กลิ่นคล้ายไขมันหรือแว็กซ์ (fatty or waxy aroma) และเมื่อตัวอย่างข้าวมีสารประกอบอัลดีไฮด์ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ผู้บริโภครับรู้ได้ถึงกลิ่นหืน โดยจัดเป็นกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในข้าว (Zeng และคณะ, 2007)

สารประกอบประเภทกรดคาร์บอกซิลิก เช่น nonanoic acid และ decanoic acid ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นหืน (rancid odor) และกลิ่นไขมัน (fatty oder) ตามลำดับ (O'Neil, 2006; Wu และคณะ, 2011) พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์เพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทกรดคาร์บอกซิลิกลดลง อาจเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน

(esterification) ซึ่งเกิดจากกรดคาร์บอกซิลิกทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบประเภทเอสเทอร์ (Heinze และคณะ, 2006)

สารประกอบประเภทเฮเทอโรไซคลิก พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบประเภทเฮเทอโรไซคลิก เช่น furfural และ benzothiazole ซึ่งให้กลิ่นลักษณะหอมหวานคล้ายคาราเมล (sweet, caramel like) มีแนวโน้มลดลง ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณของสาร 2-pentyl-furan ซึ่งมีลักษณะกลิ่นคล้ายถั่ว (nutty,beany) ที่มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ โดย สาร 2-pentyl-furan สามารถเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันและไขมัน (lipid oxidation) ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารให้กลิ่นที่สำคัญ และเป็นสารให้กลิ่นพึงประสงค์ในข้าวทั้งพันธุ์ข้าวหอม และไม่หอม (Zeng และคณะ, 2007)

สารประกอบประเภทคีโตน พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบประเภทคีโตน เช่น 2-heptanone, 2-nonanone และ 6-methyl-5-hepten-2-one ซึ่งให้กลิ่นลักษณะกลิ่นหอมคล้ายผลไม้ เฮิร์บ และดอกไม้ (sweet,fruity, herbaceous, floral) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีการรายงานว่าการเก็บรักษาข่าวในบรรยากาศปกติจะมีการเพิ่มปริมาณสารระเหยที่เปนองคประกอบของกลิ่นมากกวาข้าวที่เก็บไว้ในภาวะสุญญากาศ โดยเฉพาะปริมาณสารกลุมอัลดีไฮด์ และคีโตนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเปนผลมาจากการเกิดออกซิเดชันของไขมัน (Widjaja และคณะ, 1996)

สารประกอบประเภทซัลเฟอร์ พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบซัลเฟอร์ เช่น dimethyl sulfide และ dimethyl disulfide ซึ่งให้กลิ่นหอมหวานคล้ายข้าวโพดต้ม (cooked corn) หรือครีมข้าวโพด (creamed corn) และกลิ่นกะหล่ำปลีต้มสุก (cooked cabbage) ตามลำดับ มีแนวโน้มลดลง โดย dimethyl sulfide อาจเป็นสารที่ให้กลิ่นคล้ายธัญพืช ซึ่งจากการศึกษาพบว่า dimethyl sulfide ถูกระบุว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสารระเหยที่ปล่อยออกมาจากข้าวโพดหวานที่ปรุงสุก (Buttery และคณะ, 1994)

ตารางที่ 4. 11 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

No	Retention Index	Compound	Ordor Description	Relative concentration (ng/g) at week													Identification method [A]
				0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
alcohols																	
1	772	1-Pentanol	fusel oil - like	0.13± 0.01	0.11± 0.00	0.12± 0.00	0.13± 0.01	0.84± 0.00	0.88± 0.01	0.66± 0.01	0.11± 0.01	0.12± 0.01	0.097 ±0.01	0.16± 0.00	0.092 ±0.00	0.921± 0.00	RI, MS
2	867	1-Hexanol	green	0.21± 0.00	0.21± 0.03	0.23± 0.03	0.24± 0.01	0.24± 0.01	0.33± 0.01	0.15± 0.01	0.25± 0.01	0.24± 0.02	0.22± 0.01	0.22± 0.01	0.25± 0.00	0.25±0 .00	RI, MS
3	1032	Benzyl alcohol	floral	0.035 ±0.00	0.024 ±0.00	0.033 ±0.02	-	0.037 ±0.00	0.035 ±0.00	-	-	-	-	-	-	-	RI, MS
4	1068	1-Octanol	fatty,metallic	-	-	-	-	0.086 ±0.11	-	0.077 ±0.01	0.006 ±0.01	-	-	-	-	-	RI, MS
5	1313	2-Methoxy-4-vinylphenol	spicy clove - like	0.037 ±0.00	0.025 ±0.00	0.025 ±0.00	0.035 ±0.02	0.037 ±0.02	0.028 ±0.00	0.043 ±0.00	0.050 ±0.01	0.036 ±0.00	0.042 ±0.01	0.10± 0.02	0.16± 0.08	0.16±0 .08	RI, MS
aldehydes																	
6	675	Pentanal	woody,friuty	0.91± 0.08	0.79± 0.08	0.58± 0.24	0.76± 0.04	0.71± 0.02	0.74± 0.05	0.45± 0.05	0.77± 0.15	0.71± 0.07	0.77± 0.13	0.79± 0.07	0.48± 0.03	0.48±0 .03	RI, MS
7	798	Hexanal	green,grass - like	2.00± 0.06	2.65± 0.35	3.12± 0.06	3.58± 0.20	3.37± 0.10	3.47± 0.10	3.58± 0.20	3.42± 0.17	4.09± 0.15	4.25± 0.72	4.72± 0.03	6.11± 0.03	8.48±0 .43	RI, MS
8	899	Heptanal	fatty,fruity	0.26± 0.01	0.21± 0.01	0.27± 0.01	0.29± 0.03	0.25± 0.01	0.23± 0.02	0.18± 0.02	0.25± 0.01	0.22± 0.00	0.25± 0.01	0.24± 0.00	0.22± 0.00	0.22±0 .00	RI, MS
9	1103	Nonanal	soapy, citrus - like	0.11± 0.00	0.98± 0.01	0.31± 0.15	0.084 ±0.00	0.094 ±0.00	0.091 ±0.00	0.12± 0.00	0.15± 0.03	0.094 ±0.00	0.14± 0.01	0.13± 0.01	0.14± 0.01	0.14±0 .01	RI, MS
10	1204	Decanal	green,soapy	0.011 ±0.00	0.034 ±0.01	0.01± 0.00	0.02± 0.01	0.034 ±0.01	0.029 ±0.00	0.015 ±0.00	0.017 ±0.01	0.035 ±0.00	0.013 ±0.00	0.06± 0.00	0.039 ±0.03	0.039± 0.03	RI, MS

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

[A] Identification methods: retention index (RI) and mass spectra (MS).

ตารางที่ 4.11 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน (ต่อ)

No	Retention Index	Compound	Ordor Description	Relative concentration (ng/g) at week													Identification method [A]
				0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
carboxylic acid																	
11	1274	Nonanoic acid	fatty	0.035 ±0.03	0.023 ±0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	RI, MS
12	1375	Decanoic acid	fatty	0.030 ±0.03	0.032 ±0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	RI, MS
esters																	
13	606	Ethyl Acetate	sweet	18.7± 0.85	22.4± 1.69	26.9± 2.61	24.4± 2.65	28.5± 1.25	19.9± 5.78	24.2± 5.78	17.3± 1.49	25.6± 3.46	26.1± 3.86	21.4± 0.38	14.6± 0.20	14.6±0 .20	RI, MS
heterocyclic compounds																	
14	992	2-pentyl-furan	nutty,beany	2.02± 0.17	1.74± 0.12	2.06± 0.21	1.57± 1.36	1.89± 0.18	1.67± 0.10	2.02± 0.10	2.26± 0.10	2.15± 0.08	2.74± 0.18	2.72± 0.01	1.96± 0.31	1.96±0 .31	RI, MS
15	836	Furfural	sweet,caramel - like	0.13± 0.03	0.067 ±0.01	0.081 ±0.01	-	-	-	-	-	0.73± 0.00	-	-	-	-	RI, MS
16	1224	Benzothiazole	caramel,rubber	0.03± 0.00	0.022 ±0.00	0.019 ±0.00	0.028 ±0.01	0.027 ±0.00	0.024 ±0.00	0.02± 0.00	0.024 ±0.00	0.025 ±0.00	-	-	-	-	RI, MS
ketones																	
17	898	2-Heptanone	fruity,floral	1.05± 0.03	0.98± 0.01	1.16± 0.02	1.20± 0.16	0.94± 0.02	0.98± 0.04	1.21± 0.04	1.14± 0.03	0.87± 0.04	1.20± 0.12	1.20± 0.01	1.59± 0.09	1.59±0 .09	RI, MS
18	986	6-methyl-5-hepten-2-one	Banana - like	-	-	-	0.02± 0.01	0.023 ±0.00	0.021 ±0.01	0.034 ±0.01	0.029 ±0.00	0.021 ±0.00	0.025 ±0.02	0.033 ±0.00	0.027 ±0.00	0.027± 0.00	RI, MS
19	1090	2-Nonanone	fruity, herbaceous	-	0.202 ±0.05	-	-	-	-	0.354 ±0.10	0.273 ±0.10	0.261 ±0.04	-	-	0.332 ±0.18	0.332± 0.18	RI, MS
sulfur compounds																	
20	727	Dimethyl sulfide	cooked corn, creamed corn	5.91± 0.60	5.48± 1.03	4.32± 3.31	3.89± 0.26	3.69± 0.42	2.07± 0.08	4.02± 0.08	5.83± 0.15	4.90± 0.75	2.14± 0.21	5.25± 0.44	1.96± 0.24	1.96±0 .24	RI, MS
21	968	Dimethyl disulfide	cooked cabbage	0.019 ±0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	RI, MS

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

[A] Identification methods: retention index (RI) and mass spectra (MS).

4.8 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

เมื่อนำตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่เวลาต่าง ๆ มาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของสี กลิ่นหืน กลิ่นคล้ายธัญพืช และความแข็ง-นุ่ม ของข้าวกล้องงอกหุงสุกเมื่ออายุการเก็บเพิ่มมากขึ้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12

จากผลการประเมินสมบัติทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ตลอดการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานาน 24 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นระดับคะแนนด้านการเปลี่ยนแปลงของความเข้มสีมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลของการศึกษาอายุการเก็บรักษาต่อค่าดัชนีความขาว (ตารางที่ 4.8) ที่พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาที่นานขึ้นส่งผลให้ตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีค่าดัชนีความขาวลดลง

ด้านกลิ่นคล้ายธัญพืชพบว่าที่ระยะเวลาในการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้นระดับคะแนนมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 4.11) ที่พบว่า dimethyl sulfide มีปริมาณลดลง โดยสารดังกล่าวให้ลักษณะกลิ่นหอมหวานคล้ายข้าวโพดต้ม ตรงข้ามกับระดับคะแนนของกลิ่นหืนที่พบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาที่นานขึ้นระดับคะแนนมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับปริมาณสาร hexanal, nonanal และ decanal ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสารดังกล่าวเป็นสารที่มีการรายงานว่าพบในข้าวเก่าที่มีกลิ่นหืน (Buttery และคณะ, 1983) ที่พบว่ามีแนวโน้มพิ่มสูงขึ้น

สำหรับความแข็ง-นุ่ม พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นระดับคะแนนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอายุการเก็บที่นานขึ้นตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดค่าความแข็ง (ตารางที่ 4.9) ที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษาจะเกิดการกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวจัดเรียงตัวกันเป็นผลึกที่แข็งแรงขึ้น

ตารางที่ 4. 12 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความเข้มของสี กลิ่น และความแข็ง-นุ่ม ของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

อายุการเก็บรักษา (สัปดาห์)	color	cereals like odor	rancid odor	hardness-softness
0	$5.7^{f} \pm 0.3$	$7.5^{a} \pm 0.3$	$0.0^{g} \pm 0.0$	$7.3^{g} \pm 0.3$
2	$6.^{2e} \pm 0.3$	$7.6^{a} \pm 0.3$	$0.0^{g} \pm 0.0$	$7.6^{g} \pm 0.3$
4	$6.3^{d,e} \pm 0.3$	$7.6^{a} \pm 0.2$	$0.0^{g} \pm 0.0$	$8.2^{f} \pm 0.2$
6	$6.4^{c,d,e} \pm 0.3$	$7.5^{a} \pm 0.2$	$0.7^{f} \pm 0.2$	$8.5^{e} \pm 0.12$
8	$6.7^{c,d} \pm 0.2$	$7.4^{a,b} \pm 0.3$	$0.7^{e,f} \pm 0.1$	$8.7^{e} \pm 0.3$
10	$6.6^{c,d} \pm 0.2$	$7.4^{a,b} \pm 0.3$	$0.8^{e,f} \pm 0.1$	$9.3^{d} \pm 0.2$
12	$6.6^{c} \pm 0.2$	$7.1^{b,c} \pm 0.2$	$0.9^{e} \pm 0.2$	$9.5^{d} \pm 0.2$
14	$6.7^{c} \pm 0.2$	$7.0^{c} \pm 0.4$	$1.0^{d} \pm 0.3$	$10.0^{c} \pm 0.2$
16	$7.2^{b} \pm 0.3$	$6.5^{d,e} \pm 0.4$	$1.3^{c} \pm 0.2$	$10.0^{c} \pm 0.3$
18	$7.5^{a} \pm 0.2$	$6.6^{d} \pm 0.2$	$1.5^{b} \pm 0.2$	$10.6^{b} \pm 0.3$
20	$7.7^{a} \pm 0.6$	$6.4^{d,e} \pm 0.3$	$1.7^{b} \pm 0.1$	$11.1^{a} \pm 0.3$
22	$7.7^{a} \pm 0.2$	$6.3^{f} \pm 0.2$	$1.6^{b} \pm 0.1$	$11.3^{a} \pm 0.3$
24	$7.8^{a} \pm 0.4$	$6.4^{f} \pm 0.1$	$2.0^{a} \pm 0.2$	$11.3^{a} \pm 0.4$

หมายเหตุ ผลคะแนนในการประเมินคุณลักษณะด้านต่าง ๆ ของตัวอย่าง เฉลี่ยจากการทดลอง 10 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

a-g ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันที่มีอักษรต่างกันกำกับไว้ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการศึกษาผลของการแปรรูปด้วยความร้อนด้วยรีทอร์ตต่อปริมาณกาบา องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ และคุณภาพของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในสภาวะฆ่าเชื้อที่สูงขึ้น ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกาบาและความแข็งของข้าวกล้องงอกหุงสุก โดยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ต่างจากค่าดัชนีความขาวที่มีค่าลดลง และ ค่า elongation ratio และ elongation index ที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา

องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ และประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน พบว่า ที่อายุการเก็บรักษาที่นานขึ้น ปริมาณกาบาและค่าดัชนีความขาวมีค่าลดลง ต่างจากค่าความแข็งของข้าวกล้องงอกที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ พบว่าสารประเภทอัลดีไฮด์ คีโตน ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เช่น hexanal, nonanal และ decanal ที่มีการรายงานว่าเป็นสารให้กลิ่นข้าวเก่าในข้าวหอมหุงสุก (Buttery และคณะ, 1983) และผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอกหุงสุก พบว่าผู้ทดสอบสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวอย่างที่อายุการเก็บรักษาต่างกันได้โดยมีตัวอย่างอ้างอิงเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ และพบว่าเมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นผู้ทดสอบให้คะแนนตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในด้านความแข็ง-นุ่ม ความเข้มสี และกลิ่นหืนเพิ่มขึ้น ต่างจากค่าคะแนนกลิ่นคล้ายธัญพืชที่ลดลง เมื่อพิจารณาปริมาณในการบริโภคของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เหมาะสำหรับวัยรุ่นชาย-หญิง อายุ 14-25 ปี วัยทำงานอายุ 25-60 ปี ให้ได้คุณประโยชน์ของกาบา พบว่าปริมาณกาบาที่แนะนำต่อวันที่เพียงพอต่อการผ่อนคลายความเครียดมีค่าประมาณ 20-30 mg (สุขภาพน่ารู้, 2557) โดยต้องพิจารณาควบคู่กับปริมาณข้าว-แป้งที่แนะนำต่อวัน คือ ข้าว-แป้งไม่ควรเกิน 600 g (10 ทัพพี) (กระทรวงสาธารณสุขแห่งประเทศไทย, 2559) ซึ่งเมื่อแบ่งออกเป็น 3 มื้อ มื้อละไม่ควรเกิน 200 g ซึ่งตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ 1 ถุง (น้ำหนักข้าวสุกประมาณ 175 g) มีปริมาณกาบาอยู่ในช่วง 19.58-5.50 mg (ตามวิธีที่แสดงในข้อ ง.2 ภาคผนวก ง.) ซึ่งถือว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอรต์เพาช์ 1 ถุง มีปริมาณเหมาะสมต่อหน่วยบริโภคในหนึ่งมื้อ และการบริโภคข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาในสัปดาห์ที่ 0-20 จำนวน 3 ถุงต่อวัน ผู้บริโภคจะได้รับปริมาณกาบาที่เพียงพอ และเมื่อใช้ปริมาณในการบริโภคข้าวกล้องงอกหุงในรีทอร์ตเพาช์เพื่อให้ได้คุณประโยชน์ของกาบาที่เพียงพอต่อการผ่อนคลายความเครียดเป็นเกณฑ์ในการกำหนดอายุการเก็บรักษา พบว่าตัวอย่างมีอายุการเก็บรักษาอยู่ที่ 20 สัปดาห์ เนื่องจากเมื่อผู้บริโภครับประทานข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่อายุการเก็บรักษาที่ 22 สัปดาห์เป็นต้นไป จำนวน 3 ถุงต่อวัน ผู้บริโภคจะได้รับปริมาณกาบาที่ไม่เพียงต่อคำแนะนำ ซึ่งผลจากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกสภาวะที่จะใช้ในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ในระดับอุตสาหกรรมจริง และกำหนดอายุในการเก็บรักษา เนื่องจากคุณภาพของข้าวหุงสุก เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลของการยอมรับของผู้บริโภค โดยงานวิจัยนี้เป็นการสร้างองค์ความรู้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์จริง ถือเป็นการเพิ่มความหลากหลายของผลิตภัณฑ์จากข้าวให้แก่ผู้บริโภคได้เลือก และนับเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับข้าว และเป็นงานวิจัยที่รองรับความต้องการในเรื่องอาหารเพื่อสุขภาพ และอาหารพร้อมบริโภค ของผู้บริโภคในยุคปัจจุบัน จึงถือเป็นงานวิจัยที่มีประโยชน์ที่จะใช้ในการต่อยอดในระดับอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

1. ข้าวกล้องที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้มีอัตราการงอกที่สูงถึงร้อยละ 96.92 มีอัตราการดูดซับน้ำระหว่างการหุงต้มเท่ากับ 2.55 g (น้ำ) ต่อ ข้าวกล้องงอก 1 g และมีค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 45.21

2. องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1 มีปริมาณความชื้นและโปรตีนเพิ่มขึ้นต่างจากปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่ลดลงเมื่อเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการงอก

3. ค่าดัชนีความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือข้าวกล้องงอกหุงสุกที่สภาวะการฆ่าเชื้อ 115, 118 และ121 $^{\circ}$C ตามลำดับ

4. ข้าวกล้องงอกหุงสุกที่สภาวะการฆ่าเชื้อ 121 $^{\circ}$C มีค่าความแข็งสูงที่สุด เมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกหุงสุกที่สภาวะการฆ่าเชื้อ 115, 118 $^{\circ}$C และข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า

5. ค่า ER และ EI ของข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ทั้ง 3 สภาวะ แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์พบว่าการฆ่าเชื้อที่ 115, 118 และ 121 $^{\circ}$C กำหนดค่า F_0 = 4 นาที ค่า elongation ratio (ER) และ elongation index (EI) ไม่ต่างกัน

6. ข้าวกล้องหุงสุกที่สภาวะการฆ่าเชื้อ 121 $^{\circ}$C มีปริมาณกาบามากที่สุด รองลงมาคือที่สภาวะการฆ่าเชื้อ 118, 115 $^{\circ}$C และข้าวกล้องงอกหุงสุกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า ตามลำดับ

7. สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างเพื่อศึกษาอายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ คือสภาวะการฆ่าเชื้อ 118 $^{\circ}$C กำหนดค่า F_0 = 4 นาที

8. เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความขาวของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีค่าลดลง
9. เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

10. เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีแนวโน้มลดลง

11. องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ในตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์สามารถแบ่งตามกลุ่มโครงสร้างทางเคมี (chemical classes) ได้เป็น 7 กลุ่ม ได้แก่ แอลกอฮอล์(alcohols), อัลดีไฮด์ (aldehydes), กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid), เอสเทอร์ (esters), สารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (heterocyclic compounds), คีโตน (ketones) และสารประกอบซัลเฟอร์ (sulfurs compounds)

12. เมื่ออายุการเก็บรักษาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์เพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทแอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก เฮเทอโรไซคลิก และซัลเฟอร์มีแนวโน้มลดลง ซึ่งต่างจากปริมาณของสารประกอบประเภทประเภทอัลดีไฮด์และคีโตน ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

13. เมื่ออายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ผลคะแนนของการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความเข้มสี กลิ่นหืน และความแข็ง-นุ่ม มีค่าสูงขึ้น ซึ่งต่างจากระดับคะแนนด้านกลิ่นคล้ายธัญพืชมีค่าลดลง

14. ปริมาณในการบริโภคของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เหมาะสำหรับวัยรุ่นชาย-หญิง อายุ 14-25 ปี วัยทำงานอายุ 25-60 ปี ให้ได้คุณประโยชน์ของกาบาที่เพียงพอต่อการผ่อนคลายความเครียด คือจำนวน 3 ถุงต่อวัน

15. ตัวอย่างข้าวกล้องงกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์มีอายุการเก็บรักษาอยู่ที่ 20 สัปดาห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

เอกสารอ้างอิงภาษาไทย

กรุณาพร ปานวรณ์, ชุติกา เกียรติเรืองไกร. ผลของกรรมวิธีการหุงต่อปริมานกรดแกมมาอะมิโนบิวทิริก (กาบา) สมบัติทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัสของข้าวกล้องงอก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, **2555**.

กล้าณรงค์ ศรีรอต, เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, เทคโนโลยีของแป้ง. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร, **2550**.

กาญจนา มหัทธนทวี, Rouseff, R. L., วรพจน์ สุนทรสุข โครงการการวิเคราะห์ชนิด และปริมาณของสารใหม่ที่ให้ลักษณะเฉพาะของกลิ่นหอมในข้าวหอมดอกมะลิ 105 โดยวิธีก๊าซโครมาโตรกราฟฟี-โอแฟคโตมิเตอร์ ก๊าซโครมาโตรกราฟฟี-พีเอฟพีดี และก๊าซโครมาโตกราฟฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์; กรุงเทพมหานคร, **2554**.

งามชื่น คงเสรี. คุณภาพข้าวและผลิตภัณฑ์. การสัมมนาวิชาการครบรอบ 80 ปีศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, กรุงเทพมหานคร, **2539**; 241-259.

ชลลดา รุ่งอิทธิวงศ์. การพัฒนาก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กปรุงรสพร้อมบริโภคในรีทอร์ตเพาช์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, **2556**.

ชาญ มงคล, ข้าว. โรงพิมพ์การศาสนา กรมการศาสนา: กรุงเทพมหานคร, **2536**.

เทวี คุ้มวงศ์, สิริชัย ส่งเสริมพงษ์. ผลของสารชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันในข้าวสำเร็จรูปพร้อมรับประทานบรรจุกระป๋อง, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 48, กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร, **2553**.

นงนุช วงศ์สินชวน. การเพาะข้าวกล้องงอก. *รูสมิแล* **2555,** *33 (2)*, 57-62.

นิธิยา รัตนาปนนท์. เคมีอาหาร (Food Chemistry). โอเดียนสโตร์: กรุงเทพมหานคร, **2551**.

บริสุทธิ์ สัมฤทธ. ข้าวญี่ปุ่นในประเทศไทย. ข่าวสารเกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร **2537,** *39 (4)*, 1-5.

ปราณี อ่านเปรื่อง, เอนไซม์ทางอาหาร โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร, **2535**.

พัชรี ตั้งตระกูล, วารุณี วารัญญานนท์, วิภา สุโรจนะเมธากุล, ลัดดา วัฒนศิริธรรม. การใช้ประโยชน์จากคัพภะข้าวและข้าวกล้องงอกเป็นอาหารสุขภาพเพื่อเพิ่มมูลค่า. กรุงเทพมหานคร, **2549**.

ไพบูลย์ ธรรมรัตน์วาสิก, บัญชา อุไรกุล, นงพร โตวัฒนะ, อโนชา ตั้งโพธิธรรม, ฉัตรชัย วัฒนาภิรมย์สกุล, ก่องกาญจน์ กิจรุ่งโรจน์, เอกสิทธิ์ จงเจริญรักษ์. โครงการการศึกษาคุณค่าทาง

โภชนาการและทางยาของข้าวงอกเพื่อเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและอาหารเพื่อสุขภาพ. **2554**.

มัทนา แสงจินดาวงษ์. ผลิตภัณฑ์ประมงของไทย. กรุงเทพมหานคร, **2548**.

มูลนิธิข้าวไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. จุดกำเนิดและประวัติข้าวไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.thairice.org [เมษายน 2558]. **2558**.

เมยวดี แซ่เลี้ยว. การเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวสำเร็จรูปบรรจุกระป๋องระหว่างการเก็บรักษา. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, **2547**.

รัชพล พะวงศ์รัตน์, กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. *Science and Technology Silpakorn University.* **2558,** *2*, 143-157.

วนิดา โอฬารกิจอนันต์. ประโยชน์ของข้าวกล้องงอก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.uniserv.buu.ac.th [ตุลาคม 2558] **2558**.

วิไล รังสาดทอง. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด: กรุงเทพมหานคร, **2552**.

วีระชัย อุ่นสากล. นวัตกรรมข้าวกล้องงอก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.patomsit.net [ตุลาคม 2558]. **2553**.

ศิโรรัตน์ กาญจนสำราญวงศ์. ผลของน้ำมันพืชต่อรีโทรเกรเดชันและเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ระหว่างการเก็บรักษา. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, **2556**.

สวนีย์ หอรังสิวัฒน์, นันทวัน เทอดไทย. ผลของวิธีการหุงสุกต่อคุณภาพของข้าวหอมมะลิ. *Proceedings of 53rd Kasetsart University Annual Conference* **2558**.

สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. คู่มือสำหรับผู้ควบคุมการผลิตอาหารในภาชนะบรรจุปิดสนิทชนิดที่มีความเป็นกรดต่ำและชนิดที่ปรับกรด (*retort supervisor).* สำนักงานกิจการโรงพิมพ์สงเคราะห์องค์การทหารผ่านศึก: กรุงเทพมหานคร, **2557**.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. *Thai Agricultural Standard Tas* 4004 - 2012 โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด: กรุงเทพมหานคร, **2545**.

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. ชัยนาท 1. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.brrd.in.th [กันยายน 2558]. **2558**.

สิริกาญจน์ เกียรติธนะไพบูลย์, จินตนา อุปดิสสกุล, ธงชัย สุวรรณสิชณน์. ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวไทยจากการประเมินทางประสาทสัมผัสและการวัดด้วยเครื่องมือ. การประชุมทาง

วิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร, **2551**, 65-72.

อธิป บุญศิริวิทย์. การเพิ่มกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก(กาบา) ในข้าวกล้องเพาะงอกด้วยกรดกลตูามิก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, **2553**.

อนลลักษณ์ โอฬาริโกวิท. การผลิตข้าวพร้อมบริโภคในรีทอร์ตเพาช์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

อรอนงค์ นัยวิกุล. ข้าว: วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร, **2547**.

อัจภัทร พหลโยธิน. การพัฒนาศูนย์รวมความรู้สำหรับศูนย์ความเป็นเลิศแห่งนวัตกรรมข้าวแนวทางการออกแบบฐานข้อมูล. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร, **2552**.

เอกสารอ้างอิงภาษาอังกฤษ

Akama, K., Akihiro, T., Kitagawa, M., Takaiwa, F., Rice (*Oryza sativa*) contains a novel isoform of glutamate decarboxylase that lacks an authentic calmodulin-binding domain at the C-terminus 1. *Biochimica et Biophysica Acta* **2001,** *1522 (3)*, 143-150.

Ali, S. Z., Bhattachaary, K. R., Comparative properties of beaten rice and parboiled rice *Food Science and Technology* **1976,** *9*, 11-13.

AOAC, *Official methods of analysis of the association of official analytical chemist*. A.O.A.C.: Washington D.C, USA., **2010**.

AOAC, *Official methods of analysis of the association of official analytical chemist*. A.O.A.C.: Washington D.C, USA., **2012**.

BeMiller, J. N., Whistler, R. L., *Starch: Chemistry and Technology*. Academic Press: **2009**.

Best, B., Brain neurotransmitters. [online]. Available From: http://www.benbest.com/science/anatmind/anatd10.html [2016, Febuary]. **1990**.

Bewly, J. D., Seed germination and dormancy. *The Plant Cell* **1997,** *9*, 1055-1066.

Bown, A. W., Shelp, B. J., The metabolism and functions of gamma-aminobutyric acid. *Plant Physiology* **1997,** *115*, 1-5.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Buttery, R. G., Ling, L. C., Juliano, B. O., Turnbaugh, J. G., Cooked rice aroma and 2-acetyl-1-pyrroline. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **1983,** *31 (4)*, 823–826.

Buttery, R. G., Stern, D. J., Ling, L. C., Studies on Flavor Volatiles of Some Sweet Corn Products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **1994,** *42 (3)*, 791–795.

Carroll, A. D., Fox, G. G., Laurie, S., Phillips, R., Ratcliffe, R. G., Stewart, G. R., Ammonium assimilation and the role of Gamma-aminobutyric acid in pH homeostasis in carrot cell suspensions. *Plant Physiology* **1994,** *106*, 513–520.

Chung, I., Bown, A. W., Shelp, B. J., The production and efflux of gamma-aminobutyrate in isolated mesophyll cells. *Plant Physiology* **1992,** *99*, 659-664.

Crawford, L., Bown, A. W., Breitkreuz, K. E., Guinel, F. C., The synthesis of gamma-aminobutyric acidin response to treatments reducing cytosolic pH. *Plant Physiology* **1994,** *104*, 865-871.

Deewatthanawong, R., Possible roles of gamma aminobutyric acid. [online]. Available From:
http:/ / www.oeade.org/scholars/thesis_abstracts/agriculture/plonearticle. [2016, Febuary]. **2006**.

Endo, I., Chikubu, S., Tani, T., Measurement of volatile carbonyl compounds in the vapour of cooked rice. *Food Science and Technology* **1977,** *24*, 142-144.

Gardner, H. W., *Lipoxygenase pathways in cereals*. American Association of Cereal Chemists: St.Paul. Minnesota, **1988**.

Gudmundsson, M., Eliasson, A. C., Retrogradation of amylopectin and the effects of amylose and added surfactants/emulsifiers. *Carbohydrate Polymers* **1990,** *13*, 295-315.

Heinze, T., Liebert, T., Koschella, A., *Esterification of Polysaccharides*. Springer Berlin Heidelberg, **2006**.

Heldman, D. R., Hartel, R. W., *Principles of Food Processing*. Aspen Publishers, Inc: USA, **1997**.

Hoover, R., Starch retrogradation. *Food Reviews International* **1995,** *11 (2)*, 331-346

Hossain, M. S., Singh, A. K., Fasih-uz-Zaman, Cooking and eating characteristics of some newly identified inter sub-specific (indica/japonica) rice hybrids. *ScienceAsia* **2009,** *35 (4)*, 320-325.

i-Supplements, GABA (Gamma-Aminobutyric Acid) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา :http://www.i-supplements.com/gaba1.html [ตุลาคม 2558].

Institute of Brewing, *An Introduction to Brewing Science & Technology*. Institute of Brewing Great Britain, **1993**.

ISTA, *International Rules for Seed Testing*. International Seed Testing Association: Bassersdorf, **2003**.

Ito, S., Ishikawa, Y. In *Marketing of value-added rice products in Japan: Germinated brown rice and rice bread*, The FAO Rice Conference 2004, Rome, Italy, Rome, Italy, **2004**.

Juliano, B. O., *The chemical basis of rice grain quality*. philippines, **1979**.

Juliano, B. O., Perez, G. M., Results of a collaborative test on the measurement of grain elongation of milled rice during cooking.C*ereal Science* **1984,** *2*, 281-292

Karaim, A. A., Norziah, M. H., Seow, C. C., Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry* **2000,** *71 (1)*, 9-36.

Kaushik, G., Satya, S., Naik, S., Effect of domestic processing techniques on the nutritional quality of the soybean. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism* **2010,** *3 (1)*, 39-46.

Kayahara, H., Tsukahara, K., Tatai, T., Flavor, Health and Nutritional Quality of Pre-Germinated Brown Rice. In *International Flavor Conference*, Spanier, A. M., Ed. Royal Society of Chemistry: Paros, Greece, **2000**.

Khan, W., Bhatt, P. C., Panda, B. P., DEGRADATION KINETICS OF GAMMA AMINO BUTYRIC ACID IN MONASCUS-FERMENTED RICE. *Food Quality* **2015,** *38*, 123–129.

Khwanchai, P. Stimulants for enhancing gamma-aminobutyric acid accumulation in germinated brown rice. Chulalongkorn University, **2011**.

Leelayuthsoontorn, P., Thipayarat, A., Textural and morphological changes of Jasmine rice under various elevated cooking conditions. *Food Chemistry* **2006,** *96 (4)*, 606-613.

Li, M., Lee, T. C., Effect of cysteine on the functional properties and microstructure of wheat flour extrudates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **1996,** *44*, 1871-1880.

Mahatheeranont, S., Keawsa-ard, S., Dumri, K., Quantification of the rice aroma compound, 2-acetyl-1-pyrroline, in uncooked Khao Dawk Mali 105 brown rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **2001,** *49*, 773–779.

Messer, W. S. MBC 3320 GABA systems. [online]. Available From: http://www.neurosci.pharm.utoledo.edu/MBC [2016, March]. **2000**.

Moongngarm, A., Saetung, N., Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. *Food Chemistry* **2010,** *122 (3)*, 782-788.

O'Neil, M. J., *The Merck Index - An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals*. Merck and Co., Inc: Whitehouse Station, NJ, **2006**.

Ong, M. H., Blanshard, J. M. V., Texture determinants in cooked, parboiled rice. I: Rice starch amylose and the fine stucture of amylopectin. *Journal of Cereal Science* **1995,** *21 (3)*, 251-260.

Ory, R. L., Flick, G. J., *Off-flavors on rice and rice products*. Elsevier Science Publishers BV: Amsterdam, **1992**.

Osawa, M. Z., Goto K., Tsukahara, K., In *World rice Research Conference*, Japan, **2004**.

Puwastien, P., Siong, T. E., Kantasubrata, J., Craven, G., Feliciano, R. F., Judprasong, K., *ASEAN Manual of Food Analysis*. Institute of Nutrition, Mahidol University Bangkok, Thailand, **2011**.

Reggiani, R., Accumulation and interconversion of amino acids in rice roots under anoxia. *Plant Cell Physiology* **1988,** *29*, 981-987.

Rhodes, D., Handa, S., Bressan, R. A., Metabolic changes associated with adaptation of plant cells to water stress. *Plant Physiology* **1986,** *82*, 890-930.

Roth, R. J., Cooper, J. R., Bloom, F. E., *The biochemical basis of neuropharmacology*. Oxford University Press: Oxford, England, **2003**.

Saman, P., Vázquez, J. A., Pandiella, S. S., Controlled germination to enhance the functional properties of rice. *Process Biochemistry* **2008,** *43 (12)*, 1377-1382.

Shelp, B. J., Bown, A. W., McLean, M. D., Metabolism and functions of gamma-aminobutyric acid. *Trends in Plant Science* **1999,** *4 (11)*, 446-452.

Sirisoontaralak, P., Noomhorm, A., Changes in physicochemical and sensory-properties of irradiated rice during storage. *Journal of Stored Products Research* **2007,** 43 (3), 282-289.

Sumrerath, P., Thanapornpoonpong, S., Vearasilp, S., Modifying Cooking Quality of Khao Dawk Mali 105 Rice by Radio Frequency *Agricultural Science Journal* **2008**, *39 (3 (*Suppl.)), 354-358.

Tananuwong, K., Tangsrianugul, N., Effects of storage conditions and cooking on colour and antioxidant activities of organic pigmented rice. *Food Science and Technology* **2012,** *48*, 67–73.

Thompson, D., On the non-random nature of amylopectin branching. *Carbohydrate Polymers* **2000,** *43 (3)*, 223-239.

Tojo, G., Fernández, M., *Oxidation of Alcohols to Aldehydes and Ketones*. Springer: New York, USA, **2006**.

Tuin, L. G., Shelp, B. J., In situ [14C] glutamate metabolism by developing soybean cotyledons. I. Metabolic routes. *Plant Physiology* **1994,** *117*, 1411-1421.

Turano, F. J., Fang, T. K., Characterization of two glutamate decarboxylase cDNA clones from Arabidopsis. *Plant Physiology* **1998,** *117*, 1424-1432.

Varanyanond, W., Tungtrakul, P., Surojanametakul, V., Wattanasiritham, L., Luxiang, W., Effects of water soaking on gammaaminobutyric acid (GABA) in germ if different Thai rice varieties. *Kasetsart Journal (Natural Science)* **2005,** *39*, 411-415.

Villareal, R. M., Resurreccion, A. P., Suzuki, L. B., Juliano, B. O., Changes in Physicochemical Properties of Rice during Storage. *Starch* **1976,** *28*, 88–94.

Vongsudin, W., Ratthanatham, P., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., Change of Bioactive Compounds in Germinated Rice. *Thai Journal of Agricultural Science* **2012,** *43 (2)*, 553-556.

Wallace, W., Secor, J., Schrader, L., Rapid accumulation of -aminobutyric acid and alanine in soybean leaves in response to an abrupt transfer to lower temperature, darkness, or mechanical manipulation. *Plant Physiology* **1984,** *75*, 170-175.

Watchararparpaiboon, W., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., An improved process for high quality and nutrition of brown rice production. *Food Science and Technology International* **2010,** *16 (2)*, 147-158.

Widjaja, R., Craske, J. D., Wootton, M., Comparative Studies on Volatile Components of Non-Fragrant and Fragrant Rices. *science of food and agriculture* **1996,** *70 (2)*, 151–161.

Wongpornchai, S., Dumri, K., Jongkaewwattana, S., Siri, B., Effects of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of rice (Oryza sativa L.) cv. Khao Dawk Mali 105. *Food Chemistry* **2004,** *87 (3)*, 407-414.

Wu, F., Yang, N., Chen, H., Jin, Z., Xu, X., Effect of Germination on Flavor Volatiles of Cooked Brown Rice. *Cereal Chemistry Journal* **2011,** *88 (5)*, 497–503.

Yu, S., Ma, Y., Sun, D.-W., Effects of freezing rates on starch retrogradation and textural properties of cooked rice during storage. *LWT - Food Science and Technology* **2010,** *43 (7)*, 1138-1143.

Yu, S., Ma, Y., Sun, D.-W., Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. *Journal of Cereal Science* **2009,** *50 (2)*, 139-144.

Yu, S. J., Oh, S.-H., Cloning and characterization of a tobacco cDNA encoding calcium/calmodulin-dependent glutamate decarboxylase. *Molecular Cell Biology* **1998,** *8*, 125-129.

Zeng, Z., Zhang, H., Chen, J. Y., Zhang, T., Matsunaga, R., Direct extraction of volatiles of rice during cooking using solid-phase microextraction. *Cereal Chemistry Journal* **2007,** *84 (5)*, 423-427.

Zhang, X., Baker, D. A., Shen, H., Carson, D. S., Kalivas, P. W., Group II metabotropic glutamate receptors modulate extracellular glutamate in the nucleus accumbens. *Pharmacology and Experimental Therapeutics* **2002,** *300*, 162-171.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

การเตรียมสารละลาย

ก.1 <u>การเตรียมสารละลายกรดกลูตามิก</u>

เตรียมสารละลายกรดกลูตามิก (200 mM) โดยละลายกรดกลูตามิก 29.426 g ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 ml

ก.2 <u>การเตรียมสารละลายซิเตรทบัฟเฟอร์</u>

สารละลาย A : เตรียมสารละลายไตรโซเดียมซิเตรท (0.1 M) โดยละลายสารไตรโซเดียมซิเตรท 1.47g ในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้ได้ 50 ml

สารละลาย B : เตรียมสารละลายกรดซิตริก (0.1 M) โดยละลายกรดซิตริก 1.05 g ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ได้ 50 ml

จากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายไตรโซเดียมซิเตรทด้วยสารละลายกรดซิตริก จนได้ pH เท่ากับ 5.8

ก.3 <u>การเตรียมสาร FMOC-Cl</u>

เตรียมสารละลายมาตรฐาน FMOC-Cl (1000 µg/mL) โดยละลายสารมาตรฐาน FMOC-Cl 0.0250 g ในสารอะซิโตไนไตรล์ 25 ml

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ก.4 <u>การเตรียมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์</u>

สารละลาย A : เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (5 M) โดยละลายสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 g ในน้ำ deionized (DI) 100 ml

สารละลาย B : เตรียมสารละลายบอเรตบัฟเฟอร์ (0.1 M) โดยละลายกรดบอริก 1.24 g ในน้ำ DI 200 ml และปรับ pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (5 M) จนได้ pH เท่ากับ 10

ภาคผนวก ข.
การวิเคราะห์คุณภาพและสมบัติทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าว

ข.1 <u>อัตราการงอก</u> (ดัดแปลงวิธีจาก ISTA, 2003)

สุ่มข้าวกล้องที่ผ่านการแช่สารละลายกรดกลูตามิกเข้มข้น 200 mM ที่ปรับสภาพความเป็นกรดด่างให้มี pH เท่ากับ 5.8 ด้วยซิเทรตบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.01 M ที่อุณหภูมิ 35 °C นาน 12 ชั่วโมง จำนวน 100 เมล็ดเพื่อเพาะงอก โดยบ่มที่อุณหภูมิ 35 °C นาน 24 ชั่วโมง แล้วนับจำนวนเมล็ดที่งอก หาค่าเฉลี่ยอัตราการงอกจากการเพาะงอก โดยทดลองทั้งหมด 4 ซ้ำ

ข.2 <u>วิเคราะห์ปริมาณความชื้น</u> (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2012)

บดตัวอย่าง และชั่งตัวอย่างที่บดแล้วด้วยเครื่องชั่งบรรจุในถ้วยอลูมิเนียม แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ130±3 °C เป็นเวลา 120±5 นาทีเมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้วจึงปิดฝาถ้วยอบภายในตู้อบแล้วนำไปทิ้งไว้ให้เย็นใน desiccator ประมาณ 30 นาที ชั่งตัวอย่างที่อบแล้ว และคำนวณปริมาณความชื้นของตัวอย่างจากสมการ ข.2

$$w = \frac{100 \times (m_b - m_c)}{(m_b - m_a)} \qquad \text{(ข.2)}$$

เมื่อ w คือปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้แต่ละถ้วย (%)

m_a คือน้ำหนักของถ้วยอบ (g)

m_b คือน้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบและถ้วยอบ (g)

m_c คือน้ำหนักของตัวอย่างหลังอบและถ้วยอบ (g)

ข.3 <u>วิเคราะห์ปริมาณไขมัน</u> (AOAC, 2012 section 922.06)

บดตัวอย่างให้ละเอียดด้วยเครื่องบด (Warring Commercial, 8010BU, USA) อบบีกเกอร์ที่อุณหภูมิ 100 °C นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก (A) และบันทึกน้ำหนักชั่งตัวอย่าง 2.0000 g โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในหลอดแก้ว Mojonnier บันทึกน้ำหนัก, (B) เติม เอทานอล 2 ml เติมสารละลายเจือจางไฮโดรคลอริค 10 ml ปิดปากหลอดแก้ว Mojonnier

ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-80 °C ในอ่างน้ำควบคุมอุณภูมิ (Water bath) เป็นเวลา 30-40 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงเติมเอทานอลเพื่อล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ข้างหลอดแก้ว โดยเติมให้ถึงคอด้านล่างของหลอด เติมไดเอทิลอีเทอร์ 25 ml ปิดฝาแล้วเขย่าเป็นเวลา 1 นาที จึงเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ 25 ml ปิดฝาแล้วเขย่าเป็นเวลา 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น เทชั้นของสารละลายอีเทอร์-ไขมัน (ส่วนใสด้านบน) ลงในบีกเกอร์ที่ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักแล้วสกัดซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยลดปริมาตรของ ไดเอทิลอีเทอร์ และปิโตรเลียมอีเทอร์เหลืออย่างละ15 ml ตามลำดับ เทชั้นสารละลายของ อีเทอร์-ไขมัน ลงในบีกเกอร์เดิม ระเหยสารละลายจนแห้งโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ นำบีกเกอร์ไปอบที่ อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นใน desiccator เป็นเวลา 45 นาที ชั่งน้ำหนักบีกเกอร์, (C) ลงในแบบบันทึกไขมัน อบบีกเกอร์ซ้ำจนน้ำหนักคงที่ ค่าความต่างไม่เกิน ± 0.002 g คำนวณหาปริมาณไขมันจากสูตร

$$\% \text{ total fat} = \frac{(C - A - \text{blank}) \times 100}{B} \qquad \text{(ข.3)}$$

เมื่อ A = น้ำหนักบีกเกอร์ (g)

B = น้ำหนักตัวอย่าง(g)

C = น้ำหนักบีกเกอร์ พร้อมไขมันที่สกัดได้ (g)

blank = น้ำหนักบีกเกอร์ที่ผ่านการสกัดไขมันโดยวิธีข้างต้น แต่ปราศจากตัวอย่างข้าว

ข.4 <u>วิเคราะห์ปริมาณโปรตีน</u> (AOAC, 2010 section 991.20)

เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 0.5-1 g ในหลอดย่อย จากนั้นเติมสารเร่งปฏิกิริยา 2 เม็ด (1000 Kjeltabs Cu/3.5) แล้วเติม Conc.H_2SO_4 10 mlนำไปย่อยที่ 420 °Cนาน 1 ชั่วโมง ยกลงมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 20 นาที จากนั้นนำไปกลั่นด้วยเครื่อง Kjeltec 2200 ด้วย

NaOH 40%	50 ml
Boric acid 10%	50 ml
RO water	70 ml

นำสารละลายที่ได้จากการกลั่น เติม indicator (methyl red + bromocresol green) 2-3 หยด นำไปไทเทรตด้วย HCl 0.1M แล้วบันทึกปริมาตร HCl ที่ใช้เพื่อคำนวณหาปริมาณโปรตีนด้วยสมการ

$$\% \text{ nitrogen} = \frac{1.4007 \text{ X (B) X (C)}}{\text{(A)}} \quad \text{(ข.4.1)}$$

$$\% \text{ crude Protein} = \% \text{ Nitrogen x (D)} \quad \text{(ข.4.2)}$$

$$\% \text{ recovery} = \frac{\% \text{ Nitrogen x 100}}{21.09} \quad \text{(ข.4.3)}$$

เมื่อ (A) = น้ำหนักตัวอย่าง

(B) = ปริมาณHClที่ใช้ไทเทรต

(C) = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน HCl

(D) = nitrogen conversion factor ของข้าว = 5.95

ข.5 <u>วิเคราะห์ปริมาณเถ้า</u> (Puwastien และคณะ, 2011)

อบถ้วยกระเบื้องเคลือบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 °Cเป็นเวลา 5-6 ชั่วโมงแล้วนำมาใส่ desiccator ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นชั่งน้ำหนักและจดบันทึกไว้ชั่งตัวอย่าง 2 g ใส่ถ้วยกระเบื้องเคลือบที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำไปเผาในตู้ดูดควันจนหมดควัน นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจนเถ้าเป็นสีขาวใส่ตัวอย่างไว้ใน desiccator ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นแล้วจึงนำออกมาชั่งและบันทึกผล

$$\% \text{ เถ้า} = \frac{\text{(B - A) X 100}}{\text{W}} \quad \text{(ข.5)}$$

A = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องเคลือบ

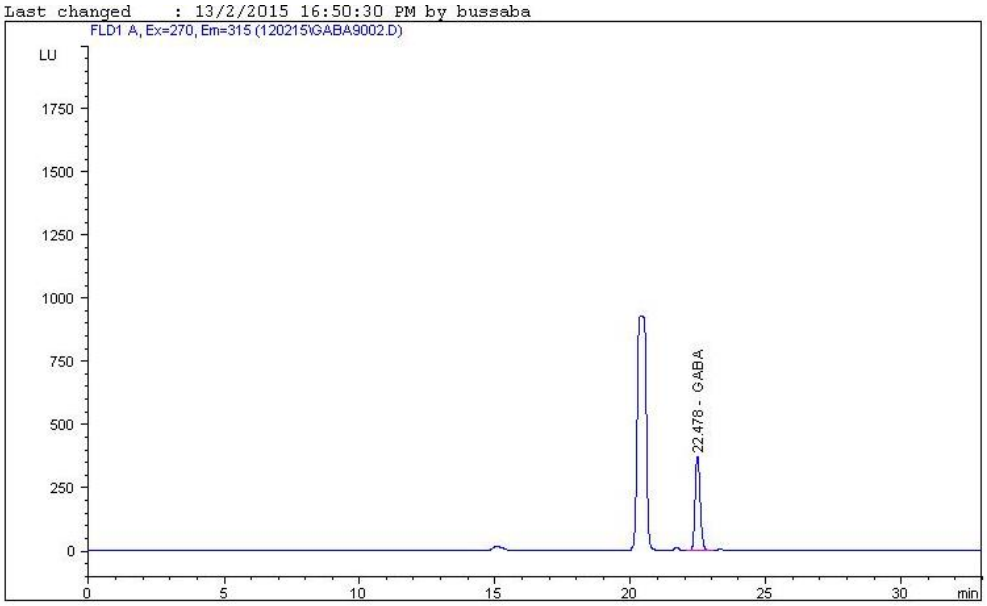
B = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องเคลือบกับน้ำหนักของเถ้าภายหลังการเผา

W = น้ำหนักของอาหารก่อนเผา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

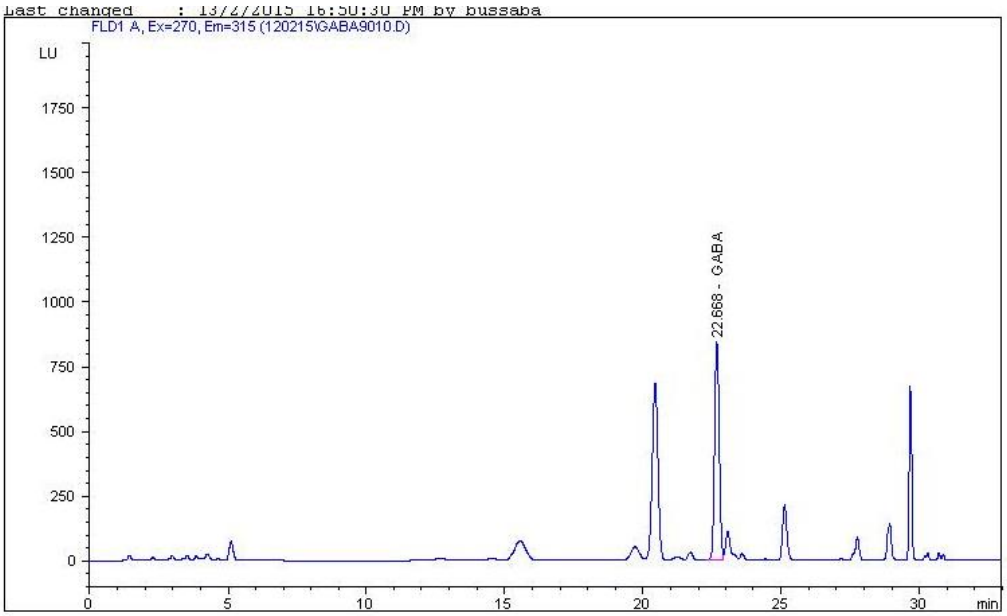
ภาคผนวก ค.
การวิเคราะห์ปริมาณกาบา

ค.1 <u>High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Chromatogram ของสารกาบามาตรฐาน ที่ความเข้มเข้มข้น 15 µg/mL</u>



รูปที่ ค. 1 High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Chromatogram ของสารกาบามาตรฐาน ที่ความเข้มเข้มข้น 15 µg/mL

ค.2 <u>High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Chromatogram ของตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์</u>



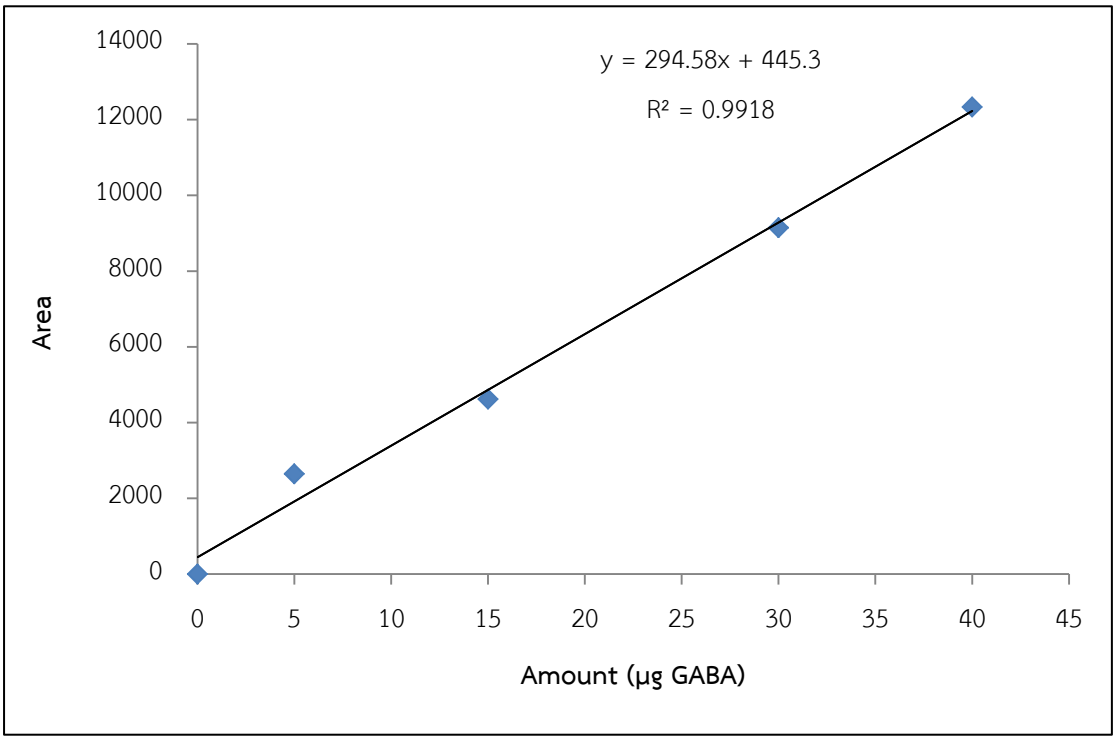
รูปที่ ค. 2 High Performance Liquid Chromatography (HPLC) Chromatogram ของตัวอย่างข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง.
วิธีการคำนวณ

ง.1 การคำนวณปริมาณกาบาด้วยกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายกาบามาตรฐานที่ความเข้มข้น 4 ระดับ คือ 5, 15, 30 และ 40 µg/mL แล้วนำสารละลายแต่ละความเข้มข้นฉีดเข้าเครื่อง HPLC เพื่อคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ จากนั้นสร้างกราฟมาตรฐานโดยพลอตระหว่างความเข้มข้นของกาบา และพื้นที่ใต้กราฟที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ ง.1



รูปที่ ง. 1 Calibration curve of GABA

จากกราฟจะได้สมการ คือ $y = 294.58x + 445.3$

$R^2 = 0.9918$

กำหนด y : peak area

x : amount (µg/mL)

ง.2 <u>การคำนวณปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ต่อหนึ่งหน่วยบริโภค</u>

ข้าวกล้องงอกที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นร้อยละ 12 dry basis หมายความว่า

ข้าวกล้องงอก (solid + water)	112 g	มีความชื้นอยู่	12 g
ข้าวกล้องงอก (solid + water)	50 g	มีความชื้นอยู่	$\frac{12 \times 50}{112}$ g
			5.36 g

โดยในหนึ่งหน่วยบริโภคบรรจุข้าวกล้องงอกก่อนหุงสุก 50 g ลงในถุงรีทอร์ต ซึ่งจะมีน้ำหนักของของแข็งเท่ากับ

$$50 - 5.36 = 44.64 \text{ g solid}$$

ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ที่เก็บรักษาที่สัปดาห์ที่ 0 ในหน่วย dry basis เท่ากับ 43.87 mg/100g

ของแข็ง(ในข้าวกล้องงอก) 100	g	มี GABA	43.87 mg
ของแข็ง(ในข้าวกล้องงอก) 44.64	g	มี GABA	$\frac{43.87 \times 44.64}{100}$ mg
			19.58 mg

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก จ.
ตัวอย่างแบบสอบถาม

จ.1 แบบสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มประชากร

รหัสผู้ทดสอบ.....
วันที่ทดสอบ.....

แบบสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มประชากร

แบบสอบถามนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่องผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกรดแกมมา-แอมิโนบิวทิริก องค์ประกอบของสารที่ระเหยได้ และคุณภาพของข้าวกล้องงอกพันธุ์ชัยนาท 1หุงสุกในรีทอร์ตเพาช์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบบสอบถามนี้ใช้ในการคัดกรองกลุ่มผู้ทดสอบ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่กรุณาให้ความร่วมมือตอบแบบสอบถามมา ณ โอกาสนี้

คำชี้แจง โปรดทำเครื่องหมาย ✓ลงในช่อง ☐ ที่ท่านเห็นว่าเหมาะสมและตรงกับความคิดเห็นของท่าน หรือกรอกข้อมูลตามความเป็นจริงลงในช่องว่าง

ท่านมีความยินดีที่จะเข้าร่วมเป็นอาสาสมัครในโครงการวิจัยนี้หรือไม่

☐ ยินดี ☐ ไม่ยินดี

1. อายุ: ..... ปี

2. ท่านมีโรคประจำตัวหรือไม่
   ☐ ไม่มี ☐ มี โปรดระบุ .....

3. ท่านสามารถรับประทาน **ข้าวกล้อง** ได้หรือไม่ (แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ให้รับประทาน)
   ☐ ไม่ได้ ☐ ได้

4. ท่านสามารถเข้าร่วม **การอบรมการทดสอบทางประสาทสัมผัสเพื่อหาจุดคะแนนของตัวอย่างอ้างอิงในด้านสี กลิ่นรส และเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพ้าช์** ได้หรือไม่ หากท่านได้ผ่านการคัดกรอง
   ☐ ไม่ได้ ☐ ได้

รหัสโครงการวิจัย 108-1/59
วันที่รับรอง 31 ต.ค. 2559
วันหมดอายุ 30 ต.ค. 2560

จ.2 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพาช์

วันที่ทดสอบ.....ชื่อผู้ทดสอบ.....อายุ.....เพศ.....รหัสตัวอย่าง.....

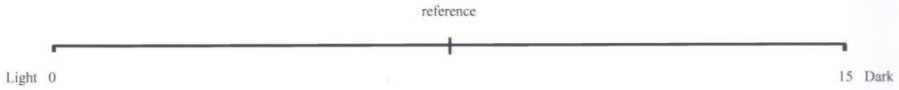
แบบทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกในรีทอร์ตเพ้าช์

คำแนะนำ

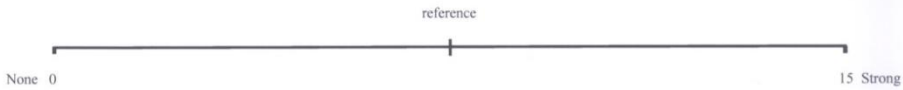
1. กรุณากรอก วันที่ทดสอบ ชื่อผู้ทดสอบ อายุ เพศ และรหัสตัวอย่างด้านบนของแบบสอบถาม
2. ท่านจะได้รับตัวอย่าง **ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องกล้องหุงสุกในรีทอร์ตเพ้าช์** กรุณาอ่านแบบสอบถามให้ถี่ถ้วนก่อนทำการทดสอบ
3. กรุณาทำเครื่องหมาย (X) ลงบนสเกลเส้นบอกระดับคะแนน (line scale) โดยให้คะแนนเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง

---

1. **ความเข้มของสี**



2. **ลักษณะกลิ่นของธัญพืช**



3. **กลิ่นหืน**

4. **ความนุ่ม - แข็งของข้าว**

ข้อเสนอแนะ

.....

.....

เลขที่โครงการวิจัย 108.1 / 59
วันที่รับรอง 31 ต.ค. 2559
วันหมดอายุ 30 ต.ค. 2560

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวัฒนา ธรรมบัญชา เกิดวันที่ 13 สิงหาคม 2534 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จาก ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

การนำเสนอผลงานทางวิชาการ

Wattana Tammabancha, Saiwarun Chaiwanichsiri, Ninnart Chinprahast, Inthawoot Suppavorasatit 2016. Changes in Gamma-Aminobutyric Acid Content and Physical Properties of Cooked Germinated Brown Rice (Chai Nat 1) as Affected by Various Cooking Methods. Pure and Applied Chemistry International Conference 2016 (poster). 9-11 February, 2016. BITEC, Bangkok, Thailand.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University