

การเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอกโดยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้
สภาวะความดันไฮโดรสแตติก



นางสาวณัฐพร ชัชวาลธাত্রี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2564

QUALITY ENHANCEMENT OF GERMINATED BROWN RICE BY
SOAKING OF PADDY UNDER HYDROSTATIC PRESSURE CONDITION



NATTHAPORN CHATCHAVANTHATRI

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Doctoral of Engineering Program in Mechanical and Process System Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2021


การเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอกโดยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้
สภาวะความดันไฮโดรสแตติก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิชาเกษตรศาสตร์


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


_____ (ผศ. ดร.ศุกกิตต์ สายสุนทร)

ประธานกรรมการ


_____ (ผศ. ดร.ธีราพร จุลยุเสณ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


_____ (ผศ. ดร.วีรชัย อางหาญ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


_____ (ผศ. ดร.พยุงค์กิต์ จุลยุเสณ)

กรรมการ


_____ (ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

กรรมการ


_____ (ผศ. ดร.พรรษา ลิบลับ)

กรรมการ


_____ (รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติชูช่างกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


_____ (รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพร ชัชวาลธাত্রี : การเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอกโดยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติก (QUALITY ENHANCEMENT OF GERMINATED BROWN RICE BY SOAKING OF PADDY UNDER HYDROSTATIC PRESSURE CONDITION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดาพร จุลยุเสนา, 172 หน้า.

คำสำคัญ : ข้าวเปลือกงอก การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ความดันไฮโดรสแตติก สมบัติทางกายภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอกเพื่อเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยแบ่งการศึกษาวีธีการผลิตข้าวเปลือกงอกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก และ (2) ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก พบว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกมีผลทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา การนึ่งข้าวเปลือกงอกทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ค่าความสว่างและความเป็นสีขาวของข้าวกล้องงอกลดลง เนื่องจากสีของเปลือกข้าวซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวและการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดระหว่างการนึ่ง อย่างไรก็ตามโครงสร้างของเมล็ดสตรังซ์มีลักษณะหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้น และลดการเกิดรอยร้าวของเมล็ดข้าว การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดข้าวเปลือกงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งช่วยทำให้ปริมาณสารกาบา, α -Tocopherol และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณ γ -Oryzanol และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเพิ่มรูพรุนภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวกล้องงอกสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม สอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM และ FE-SEM จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้น และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกสุกให้มีความนุ่มมากขึ้น

การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 1.5 – 3 h สามารถกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกหลังจากเพาะงอกนาน 24 h และ 36 h เมื่อเทียบกับการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) อย่างไรก็ตามการเพิ่มระดับความดันมีผลทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือกลดลง การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bar ในการแช่ข้าวเปลือกก่อนการเพาะงอกนาน 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) ทำให้เพิ่มปริมาณข้าวต้น ปริมาณสาร γ -Oryzanol และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ รวมทั้งลดค่าความแข็งของข้าวกล้องงอก

สูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ (AP8h) ($p < 0.05$) การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตทั้งหมด ปริมาณข้าวต้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณสารกาบา และ γ -Oryzanol รวมทั้งลดปริมาณรอยร้าวของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับ HP2b2h ($p < 0.05$) จากผลการวิเคราะห์ SR-FTIR แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกและการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชและโปรตีนของข้าวกล้องงอก จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกและการทำแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟราเรดช่วยลดระยะเวลาในผลิตข้าวเปลือกงอก รวมทั้งช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้น ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกสุก



สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ช. รัตนกุล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ก.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. ก.

NATTHAPORN CHATCHAVANTHATRI : QUALITY ENHANCEMENT OF GERMINATED BROWN RICE BY SOAKING OF PADDY UNDER HYDROSTATIC PRESSURE CONDITION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TIRAPORN JUNYUSEN, Ph.D., 172 PP.

Keyword : GERMINATED PADDY INFRARED RADIATION DRYING HYDROSTATIC PRESSURE PHYSICAL PROPERTIES BIOACTIVE COMPOUNDS

This research aimed to develop the germination methods of paddy production for enhancing the quality of germinated brown rice (GBR). The study was divided into two parts. The first part investigated effects of parboiling and drying methods on the quality of GBR and the second part established the effects of hydrostatic pressure on the germination rate of paddy and GBR quality. The results showed that germination of paddy enhanced the bioactive compounds of GBR in comparison with brown rice. Parboiling of germinated paddy (GP) significantly reduced the bioactive compounds, lightness, and whiteness values of parboiled germinated brown rice (PGBR), suggesting the dispersion of husk color into endosperm and occurrence of the Maillard reaction during parboiling. However, parboiling affected the fusing granular structure of PGBR, which subsequently decreased the voids in the granules and resulted in improving head rice yield (HRY) and reducing rice fissures. Infrared radiation (IR) drying of GP enhanced the GABA, α -tocopherol, and total phenolic compounds (TPC), but γ -oryzanol and antioxidant activity were similar to BR. In addition, SR-XTM and FE-SEM images revealed that IR drying changed the internal structure of rice grains, leading to abundant intercellular voids and resulting in the soft texture of cooked rice. In conclusion, the IR drying was an effective drying method to increase the HRY and bioactive compounds of GBR and improved the textural quality of cooked GBR.

Soaking of paddy under hydrostatic pressure (HP) at 2 and 4 bar for 2 and 4 h prior to germinating for 24 and 36 h significantly stimulated the paddy germination, compared to soaking of paddy under an atmospheric pressure (AP8h). However, increased pressure level resulted in decreased germination rate of paddy. Soaking of paddy under HP at 2 bar for 2 h followed by 36-h germination and sun drying of GP

(HP2b2h) significantly enhanced the HRY, γ -oryzanol, and antioxidant activity of GBR, and reduced the hardness of cooked GBR, when compared with the AP8h ($p < 0.05$). Meanwhile, IR drying of GP (HP2b2h-I) significantly enhanced the total rice yield, HRY, protein, GABA, and γ -oryzanol content of GBR, compared to HP2b2h ($p < 0.05$). SR-FTIR spectra revealed that the HP treatment of paddy soaking and IR drying of GP altered the structure of starch and protein of GBR. Specifically, the HP and IR drying significantly enhanced the HRY and bioactive compounds, improved the textural quality of cooked GBR, and reduced the germinated paddy processing time.



School of Agricultural Engineering

Academic year 2021

Student's Signature Ch. Sirinonchai

Advisor's Signature Dr. T.

Co-advisor's Signature Dr.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอกโดยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติกฉบับนี้เริ่มต้นและสำเร็จได้ เนื่องจากความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีราพร จุลยุเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรชัย อัจฉาญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่เมตตาให้โอกาสทางการศึกษาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณท่านกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบโอกาสในการศึกษาในระดับดุษฎีบัณฑิต รวมถึงคุณภรณ์กานต์ ประเสริฐสังข์ที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในด้านเอกสารตลอดการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สาขาวิชาที่สังกัดและครอบครัวซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนคณาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา สำหรับข้อผิดพลาดใดที่อาจเกิดขึ้นนั้นผู้วิจัยขอน้อมรับไว้และยินดีรับฟังคำแนะนำจากท่านที่ได้เข้ามาศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ณัฐพร ชัชวาลฮาตรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย.....	3
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ข้าว (Rice).....	8
2.1.1 ความหมายของข้าว.....	8
2.1.2 การจำแนกประเภทของข้าว.....	9
2.1.3 ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของข้าว.....	9
2.1.4 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าว.....	12
2.1.5 สายพันธุ์และประเภทของข้าวในประเทศไทย.....	15
2.1.6 กระบวนการสีข้าว.....	15
2.2 ข้าวกล้อง (Brown rice).....	16
2.3 ข้าวกล้องงอก (Germinated Brown rice).....	17
2.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีระหว่างการงอก.....	18
2.3.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds).....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	กระบวนการผลิตข้าวงอก (Germination brown rice process).....	23
2.4.1	อุณหภูมิ ระยะเวลา และสภาวะความเครียดในการเพาะงอกที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวกล้องงอก.....	23
2.4.2	วิธีการทำแห้งที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก.....	25
2.4.3	การใช้ความดันร่วมกับการเพาะงอกที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก	29
2.5	การทดสอบทางเนื้อสัมผัส (Texture analysis).....	32
2.5.1	การทดสอบเนื้อสัมผัสเชิงวัตถุ (Objective test)	32
2.5.2	การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory test).....	33
2.6	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis).....	34
2.6.1	ข้อดีและข้อเสียของการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์	34
3	วิธีดำเนินการวิจัย	35
3.1	วัตถุดิบ (Raw material).....	35
3.2	การศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	36
3.2.1	การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก.....	36
3.2.2	การศึกษาผลของการนึ่งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	37
3.2.3	การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	38
3.3	การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก.....	44
3.3.1	การศึกษาสภาวะการแช่และการเพาะงอกที่มีผลต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก	44
3.3.2	การศึกษาผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก	44
3.3.3	การศึกษาผลของการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก	50
3.4.1	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอก	50
3.4.2	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก.....	52
3.4.3	การวิเคราะห์ค่าสี (Color analysis)	60
3.4.4	การวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัส (Texture analysis)	61
3.4.5	การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructural analysis)	63
3.4.6	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกด้วย SR-FTIR.....	65
3.4.7	การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)	67
4	ผลการดำเนินการวิจัย	68
4.1	ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	68
4.1.1	ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ปริมาณข้าวต้น และรอยร้าวของข้าวกล้องงอก.....	69
4.1.2	สมบัติทางเคมีและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก	72
4.1.3	สมบัติทางด้านสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอก	80
4.1.4	โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	83
4.1.5	สรุปผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	87
4.2	ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	88
4.2.1	ผลของสภาวะการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก.....	88
4.2.2	ผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก	92
4.2.3	ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	100
4.2.4	สรุปผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	145

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	148
5.1	สรุปผลการทดลอง	148
5.1.1	ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	148
5.1.2	ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	149
5.2	ข้อเสนอแนะ	150
	รายการอ้างอิง.....	151
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ผลของการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ	162
	ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	170
	ประวัติผู้เขียน	172

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง	19
2.2 คำจำกัดความของเนื้อข้าวสุก	33
3.1 สภาวะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส	62
3.2 แถบการดูดกลืนแสง FTIR ส่วนบริเวณโครงสร้างทางเคมีและอัญฐานของสตาร์ช	66
3.3 แถบการดูดกลืนแสง FTIR ส่วนบริเวณโครงสร้างระดับทุติยภูมิ (Secondary structure) ของโปรตีน (Amide I).....	67
4.1 รหัสชื่อตัวอย่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด.....	69
4.2 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ปริมาณข้าวต้น (Head rice yield, HRY) และรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอก.....	70
4.3 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	73
4.4 ปริมาณสารกาบา (GABA) และปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	74
4.5 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	78
4.6 ค่าความสว่าง (Lightness, L*) ความเป็นสีขาว (Whiteness, W) และความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	81
4.7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสุก.....	83
4.8 สรุปผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	88
4.9 รหัสชื่อตัวอย่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด.....	94
4.10 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) และรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอก.....	101
4.11 ปริมาณข้าวต้น (Head rice yield, HRY) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	102
4.12 ปริมาณสารกาบา (GABA) และปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	104
4.13 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	105

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	108
4.15 การเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ปริมาณข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้งแต่ละวิธี	111
4.16 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	112
4.17 ปริมาณสารกาบา (GABA) และปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol) ของข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอก	114
4.18 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าว กล้องและข้าวกล้องงอก.....	115
4.19 ค่าความสว่าง (Lightness, L*) ความเป็นสีขาว (Whiteness, W) และความแตกต่างของสี ทั้งหมด (ΔE) ของข้าวกล้องงอก	117
4.20 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสุก.....	118
4.21 สรุปผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	147

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างทางเคมีของกรดแกมมา-อะมิโนบิวทริก หรือ กาบา..... 4
1.2	แผนภาพของการศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก 6
1.3	แผนภาพการศึกษาการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก 7
2.1	แสดงลักษณะของข้าวชนิดต่างๆ 8
2.2	แสดงโครงสร้างของข้าว 10
2.3	แสดงโครงสร้างสามมิติของโปรตีนทั้ง 4 ระดับ..... 11
2.4	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช 13
2.5	โครงสร้างของ : ก คือ อะมิโลส; ข คือ อะมิโลเพกติน..... 13
2.6	แสดงลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าว..... 14
2.7	ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช..... 15
2.8	แสดงลักษณะขนาดข้าวหักและส่วนข้าวหัก 16
2.9	ลักษณะของข้าวกล้อง..... 17
2.10	ลักษณะของข้าวกล้องงอก 18
2.11	แสดงลักษณะโครงสร้างของกาบา..... 20
2.12	แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระ 21
2.13	แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างสารประกอบฟีนอลิก 22
2.14	แสดงลักษณะโครงสร้างของ γ -oryzanol..... 22
2.15	องค์ประกอบพื้นฐานของตูบลมร้อน 26
2.16	แสดงลักษณะความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด..... 27
2.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA 33
3.1	ลักษณะข้าวเปลือกหอมมะลิและการเก็บรักษาระหว่างการทำวิจัย 36
3.2	แสดงวิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวก่อนขั้นตอนเพาะงอก 37
3.3	แผนภาพขั้นตอนการผลิตข้าวเปลือกงอก..... 38
3.4	แสดงภาพการเตรียมข้าวและการเพาะงอกข้าวเปลือก..... 40
3.5	แสดงภาพการนึ่งข้าวเปลือกงอก การทำแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ และเครื่องกะเทาะเปลือก..... 41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แสดงแผนภาพของเครื่องทำแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี.....	42
3.7 แผนภาพของการศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	43
3.8 แผนภาพการศึกษาสภาวะในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก.....	45
3.9 แสดงส่วนประกอบของชุดถังความดันแบบที่ทำงานภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติก	46
3.10 ภาพการดำเนินงานวิจัยในการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก	46
3.11 แผนภาพการศึกษาการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก.....	47
3.12 แผนภาพการศึกษาผลของสภาวะในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก	48
3.13 ภาพการศึกษาสภาวะในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก.....	48
3.14 แผนภาพการศึกษาผลของการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก	49
3.15 ภาพการวิเคราะห์สมบัติกายภาพของข้าวกล้องงอก.....	52
3.16 ภาพการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก.....	53
3.17 ภาพการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา (GABA) ของข้าวกล้องงอก.....	56
3.18 ภาพการสกัดตัวอย่างข้าวสำหรับวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ.....	57
3.19 ภาพการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง.....	58
3.20 การวิเคราะห์ค่าสี (Color value).....	61
3.21 ภาพการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสุก	62
3.22 ภาพการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย SR-XTM.....	63
3.23 ภาพการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ FE-SEM	64
3.24 ภาพการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR	65
4.1 ภาพถ่าย SR-XTM ข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	85
4.2 ภาพถ่าย FESEM ข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก.....	86
4.3 ผลของสภาวะการแช่ข้าวต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกที่ระยะเวลา (Soaking time) และอุณหภูมิ (Soaking temperature) ในการแช่ข้าวเปลือก	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลของระยะเวลาการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกโดยใช้อุณหภูมิในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ 30°C	91
4.5 ผลของอุณหภูมิการแช่และระยะเวลาการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการเพาะงอกที่ 30°C และระยะเวลาการแช่ข้าวนาน 8 h	91
4.6 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกที่ระดับความดัน 2 bars (HP2b) และ 4 bars (HP4b) ต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยใช้อุณหภูมิการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ 30°C ระยะเวลาแช่ข้าวเวลานาน 0 – 3 h และเพาะงอกข้าวเวลานาน 24 – 60 h .	95
4.7 เปรียบเทียบผลของสภาวะในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยใช้อุณหภูมิการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ 30°C	96
4.8 ผลของระยะเวลาในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำ (Bars) และความชื้น (Lines) ของข้าวเปลือก โดยอุณหภูมิการแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C นาน 2 – 24 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ	97
4.9 ผลของระยะเวลาในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำ (Bars) และความชื้น (Lines) ของข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดัน 2 และ 4 bars โดยอุณหภูมิการแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C นาน 1, 2 และ 3 h.....	99
4.10 การลดความชื้นของข้าวเปลือกหลังการเพาะงอกโดยการใช้รังสีอินฟราเรด	110
4.11 สเปกตร้า SR-FTIR ของข้าวกล้องธรรมดาและข้าวกล้องงอก ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm ⁻¹	122
4.12 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): BR-HP4b2h-AP6h	127
4.13 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): BR, AP8h, HP2b2hand HP4b2h	128
4.14 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): AP8h, HP2b2h and HP2b2h-l	130
4.15 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): HP2b2h and HP2b2h-l.....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): HP2b2h and HP2b2h-AP6h	132
4.17 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): HP4b2h and HP4b2h-AP6h	133
4.18 พื้นที่ใต้กราฟ (Integral area) ของ Second derivative SR-FTIR ในช่วง 1700-1500 cm^{-1} ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	134
4.19 พื้นที่ใต้กราฟ (Integral area) โครงสร้างระดับทุติยภูมิ (Secondary structure) ของโปรตีน ในช่วงของ Amide I (1700-1600 cm^{-1}) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก	136
4.20 สเปกตรัมของ Second derivative SR-FTIR ของ Deconvoluted Amide I ของข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (AP8h; HP2b2h; HP2b2h-I; HP4b4h; HP2b2h-AP6h and HP4b4h-AP6h).....	137
4.21 ภาพถ่าย FE-SEM ของข้าวบดละเอียด	140
4.22 ภาพถ่าย FE-SEM แนวขวางของเมล็ดข้าวและเมล็ดสตาร์ช: (AP8h).....	141
4.23 ภาพถ่าย FESEM แนวขวางของเมล็ดข้าวและเมล็ดสตาร์ช: (HP2b2h).....	142
4.24 ภาพถ่าย FE-SEM แนวขวางของเมล็ดข้าวและเมล็ดสตาร์ช: HP2b2h-I	143
4.25 ภาพถ่าย SRXTM: AP8h, HP2b2h, HP4b2h and HP2b2h-AP6h.....	145

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันนี้ผู้บริโภคให้ความสำคัญในการเลือกบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ โดยมี ปริมาณไขมันอิ่มตัว (Saturated fat) โซเดียม (Sodium) แป้ง (Starch) และน้ำตาล (Sugars) ต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการบริโภคอาหารเหล่านี้ในสัดส่วนที่สูงอาจส่งผลทำให้เกิดโรคประจำตัว เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน และโรคหัวใจ เป็นต้น ข้าวเป็นอาหารหลักประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั่วโลกโดยเฉพาะประเทศในทวีปเอเชีย คนไทยบริโภคข้าวเฉลี่ยสูงถึง 100 – 104 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) เป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง รวมทั้งมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) สูงกว่าข้าวกล้อง และข้าวขาวที่ผ่านการขัดสี เช่น กรดแกมมา-อะมิโนบิวทีริก (กาบา) (Gamma-aminobutyric acid, GABA), วิตามินอี (Tocols), แกมมา-โอริซานอล (γ -oryzanol) สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) และสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เป็นต้น ประโยชน์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น กาบาคือเป็นสารช่วยลดความดันโลหิต ช่วยทำให้สมองผ่อนคลาย ป้องกันโรคอัลไซเมอร์ ป้องกันโรคเบาหวาน และยับยั้งการสร้างเซลล์มะเร็ง (กรกฎ และคณะ, 2561) จากรายงานวิจัยของ นงนุช วงศ์สินชวน (2555) พบว่า ข้าวกล้องงอกที่ได้จากกระบวนการเพาะงอกนาน 24 – 48 h มีปริมาณกาบาเฉลี่ย 11.02 – 27.73 mg/100 g ซึ่งสูงกว่าข้าวกล้องธรรมดาที่มีปริมาณกาบาเฉลี่ย 6.04 mg/100 g ในการผลิตข้าวเปลือกงอกและข้าวกล้องงอกเพื่อเพิ่มปริมาณสารกาบาให้สูงขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับสถานะในการทำให้ข้าวงอก เช่น ระยะเวลาแช่และการเพาะงอก อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณออกซิเจน การใช้ความดัน และการทำแห้งข้าวงอก เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากหลายรายงานการวิจัยพบว่า ขั้นตอนการแช่และการเพาะข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องต้องใช้เวลาจนถึง 48 – 72 h เพื่อให้ปริมาณกาบาส่งขึ้น รวมทั้งต้องใช้เวลาในการทำแห้งข้าวเปลือกงอกนาน 24 – 48 h ด้วยการตากแดด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาวิธีการผลิตข้าวกล้องงอกให้มีคุณภาพสูงขึ้น รวมทั้งระยะเวลาในการผลิตให้สั้นลง โดยศึกษาผลของวิธีการนี้และการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพ และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก นอกจากนี้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือกต่อการกระตุ้นการงอกและเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก งานวิจัยนี้จะช่วยลดต้นทุนในการ

ผลิตข้าวกล้องงอก และทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีคุณภาพมากขึ้น รวมทั้งช่วยส่งเสริมผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ (Functional food) ให้กับผู้บริโภคข้าว นอกจากนี้เทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตข้าวกล้องงอก และเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวกล้องงอกได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการนึ่งข้าวเปลือกงอกและวิธีการทำแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้องงอก

1.2.2 เพื่อศึกษาการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือก

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกต่อการเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอก

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย (Research hypothesis)

1.3.1 การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยลดการสูญเสียสารกาบา ลดการแตกหักของข้าวระหว่างการกะเทาะเปลือก รวมทั้งช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้ง

1.3.2 การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกช่วยกระตุ้นการงอกของข้าว รวมทั้งเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และลดระยะเวลาการเพาะงอกข้าวเปลือก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) จากอำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา

1.4.2 แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดฮีเตอร์แบบแห้ง โดยให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 2 – 3 μm

1.4.3 ความดันไฮโดรสแตติกที่ใช้ในงานวิจัยอยู่ระหว่าง 2 – 4 bar

1.4.4 การดำเนินงานวิจัยทั้งหมดอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น

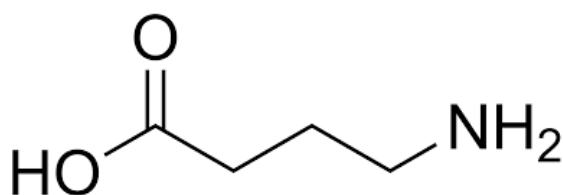
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 การฝึกแก้ไขปัญหาและเพิ่มทักษะในการทำงานวิจัยเกี่ยวกับการนำเทคโนโลยีด้านความดันไฮโดรสแตติกมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวกล้องงอก

1.5.2 การนำวิธีการเพาะงอกข้าวเปลือกที่เหมาะสมและมีผลต่อการเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอกไปเผยแพร่ให้กับเกษตรกรที่สนใจในการผลิตข้าวกล้องงอก

1.6 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

การพัฒนาให้ข้าวเปลือกงอกและข้าวกล้องงอกมีสารกาบาสูงเป็นนวัตกรรมที่น่าสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากสารกาบามีประโยชน์หลายอย่างต่อร่างกายของผู้บริโภค เช่น ช่วยทำให้สมองผ่อนคลาย ช่วยลดความดันโลหิต ป้องกันโรคอัลไซเมอร์ ป้องกันโรคเบาหวาน และยับยั้งการสร้างเซลล์มะเร็ง เป็นต้น จากรายงานการวิจัยพบว่า การงอก (germination) ของเมล็ดข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องเป็นกระบวนการทางชีวภาพทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเมล็ดข้าว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลทำให้เกิดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งมีปริมาณสูงกว่าข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก โดยเฉพาะกรดแกมมา-อะมิโนบิวทริก หรือ กาบา ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่ไม่เป็นองค์ประกอบของโปรตีน (รูปที่ 1.1) กาบาเกิดจากกระบวนการวิถีเมแทบอลิซึมซึ่งมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ กลูตาเมตดีคาร์บอกซิเลส (Glutamate decarboxylase, GAD) กาบาทรานส์อะมิเนส (GABA transaminase, GABA-T) และซักซินิก เซมิแอลดีไฮด์ดีไฮโดรจีเนส (succinic semialdehyde dehydrogenase, SSADH) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์สารกาบา (กรกฎ และคณะ, 2561) ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณสาร (กาบา) ในเมล็ดข้าวเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์เหล่านี้ ได้แก่ สภาวะในการแช่และการเพาะงอก เช่น อุณหภูมิ ค่า pH ของสารละลาย ความดัน ปริมาณออกซิเจน และการเติมสารบางชนิด เช่น กรดกลูตามิก ไคโตซาน และโซเดียมกลูตาเมต เป็นต้น นอกจากนี้สภาวะในการอบแห้งข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องงอกก็มีผลต่อปริมาณสารกาบาในข้าวเปลือกหรือข้าวกล้องงอกเช่นกัน



รูปที่ 1.1 โครงสร้างทางเคมีของกรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริก หรือ กาบา
(ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma-Aminobutyric_acid,
2563)

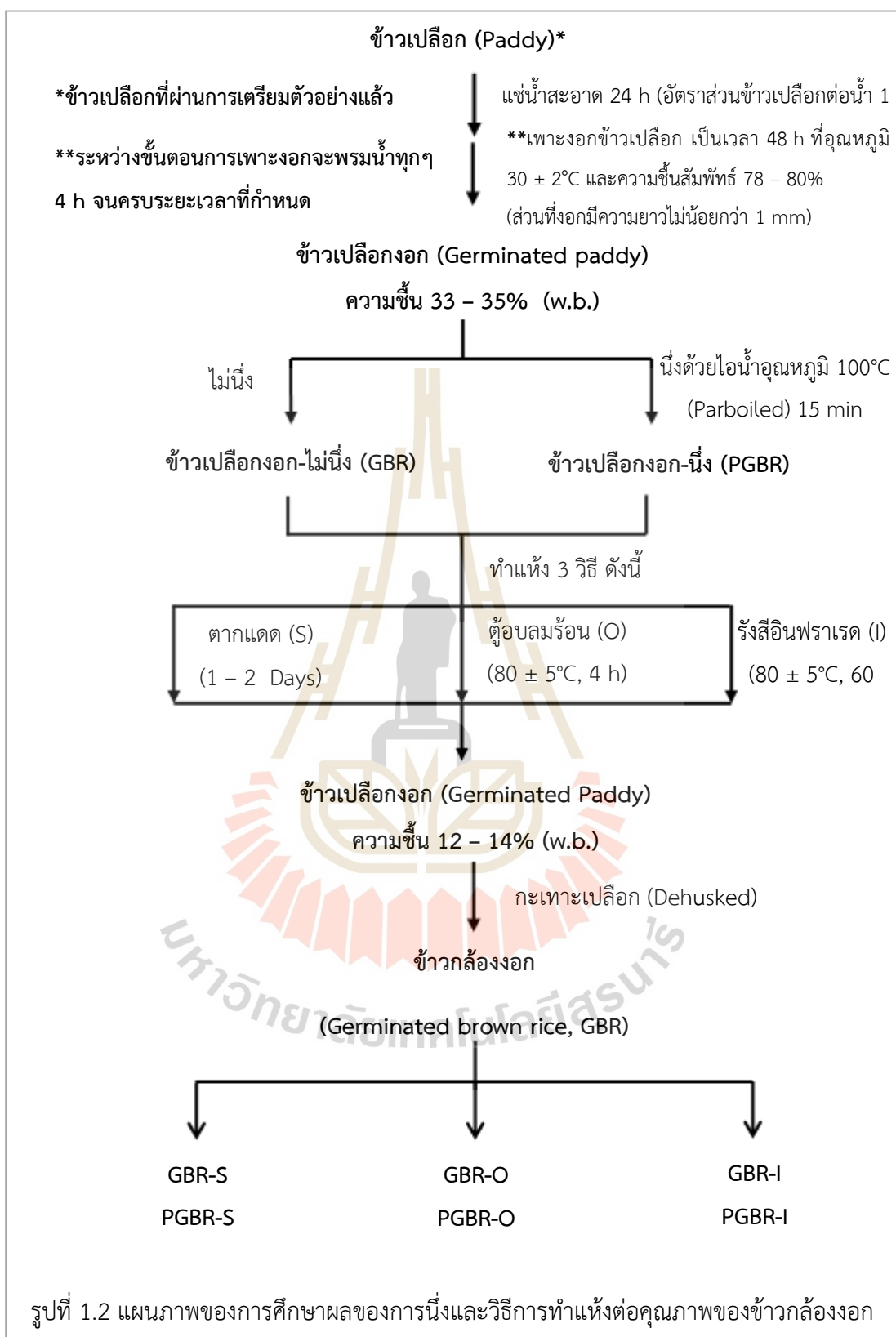
Eamarjharn et al. (2016) พบว่าการใช้สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตที่ pH 5 – 6 มีกรดกลูตามิกในการแช่รำข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นสถานะที่ช่วยทำให้ได้สารกาบาสูงสุด Komatsuzaki et al. (2007) ศึกษาการแช่ข้าวกล้องที่ระยะเวลาต่าง ๆ และเพาะงอกในสถานะที่ไม่มีมีการแลกเปลี่ยนของอากาศ พบว่า ระยะเวลาการแช่ 3 h และการเพาะงอก 21 h ที่อุณหภูมิ 35°C ทำให้ได้สารกาบาสูงขึ้น 2.4 เท่าเมื่อเทียบกับการแช่และเพาะงอกแบบวิธีดั้งเดิม Puangwerakul (2010) พบว่า การแช่ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 น้ำที่มี pH 7.0 นาน 24 h และเพาะงอกนาน 72 h ทำให้สารกาบา 23.85 mg/100 g สำหรับ Chungcharoen et al. (2015) พบว่า การแช่ข้าวเปลือกพันธุ์ชัยนาท 1 บ่มที่อุณหภูมิ 35°C นาน 60 64 และ 68 h แล้วนำไปอบแห้งที่ด้วยวิธี shade drying และวิธี fluidized bed ที่อุณหภูมิ 90 130 และ 150°C พบว่าปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญคือ 29.2 31.3 และ 33.2 mg/100 g sample ตามลำดับ

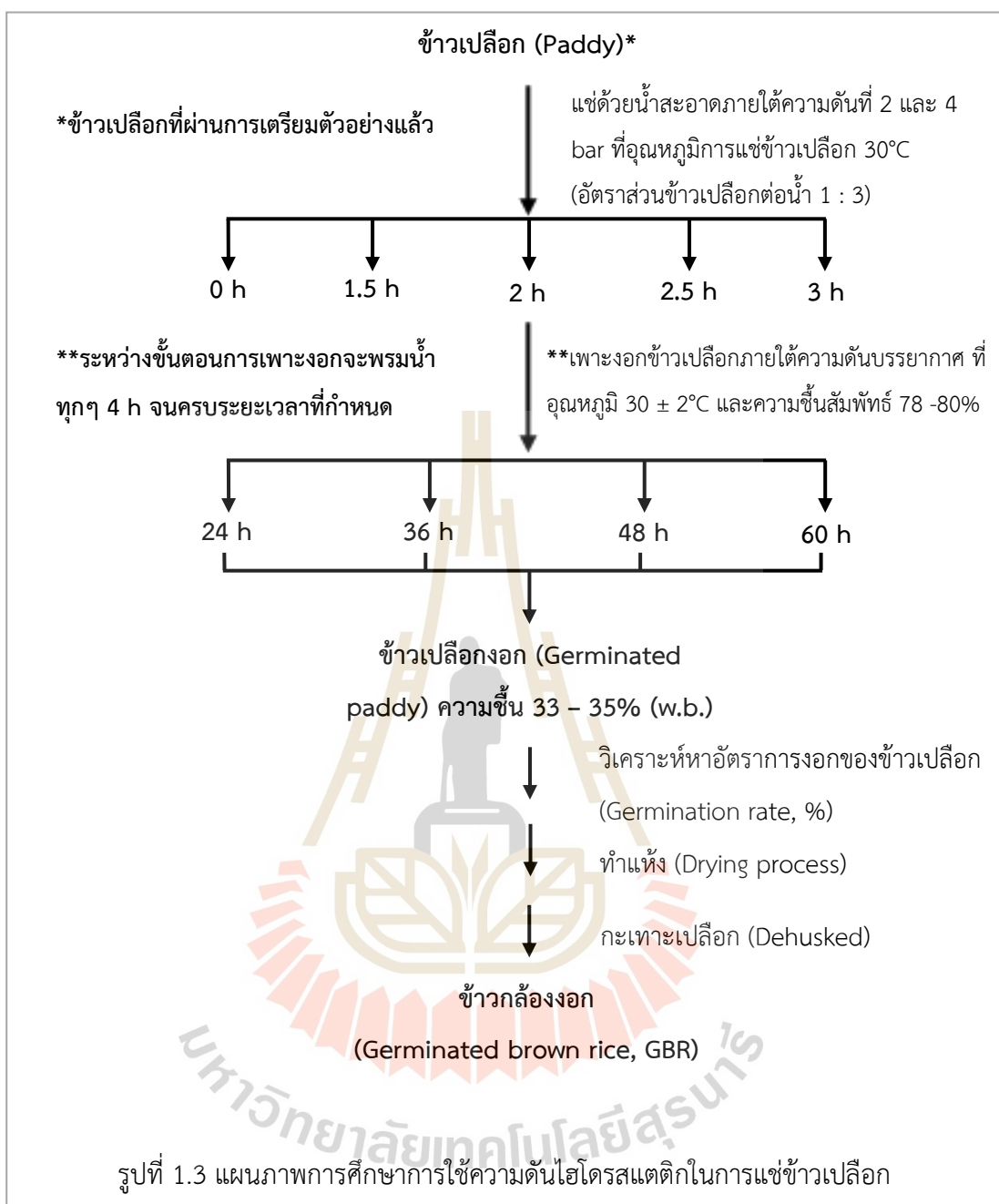
Ding et al. (2018) ได้ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasound) ในการเร่งหรือกระตุ้นให้เกิดการงอกซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์สารกาบาได้เร็วขึ้น Xia et al. (2018) และ Kim et al. (2017) ใช้เทคนิคความดันสูง (High hydrostatic pressure, HHP) ที่ระดับ 30 – 90 MPa และ 0.1 – 100 MPa ตามลำดับ ในการกระตุ้นการงอกของข้าวกล้องให้เร็วขึ้น พบว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความดัน ทั้งนี้การใช้ Ultrasound treatment และ Hydrostatic pressure เป็นวิธีการไม่ใช้ความร้อน (Non thermal processing) ปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอกเพื่อเพิ่มปริมาณสารกาบาและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ รวมทั้งวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอก และลดระยะเวลาการทำแห้งลง โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วนหลัก คือ (1) การศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยแผนภาพการทดลองแสดงในรูปที่ 1.2 ประกอบด้วยการเปรียบเทียบผลของการนึ่งและไม่นึ่งข้าวเปลือกงอกและวิธีการทำแห้งแบบตากแดด การใช้ตู้อบลม

ร้อน และการใช้รังสีอินฟราเรด และ (2) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยใช้ความดันที่ระดับ 2 – 4 bar โดยแผนภาพการทดลองแสดงในรูปที่ 1.3 ความดันไฮโดรสแตติกเป็นเทคนิคที่ไม่ใช้ความร้อน (Non thermal technique) ปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพื่อเร่งการผลิตสารกาบาและลดระยะเวลาในการผลิตข้าวเปลือกงอก นอกจากนี้ชุดอุปกรณ์ถึงความดันไฮโดรสแตติกที่ใช้ในการงานวิจัยนี้ไม่มีความซับซ้อน และต้นทุนไม่สูง ผู้ประกอบการสามารถนำไปใช้งานได้จริง งานวิจัยนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการผลิตข้าวกล้องงอก และทำให้ได้ข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงมากขึ้น นอกจากนี้เทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อเพิ่มศักยภาพการผลิตข้าวกล้องงอก และเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวกล้องงอกได้อีกด้วย







บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอกเพื่อเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอก รวมทั้งลดระยะเวลาในการผลิตลง โดยข้อมูลเกี่ยวกับข้าว ข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอก เช่น สายพันธุ์ การจำแนกประเภทข้าว สมบัติทางเคมีและกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ รวมถึงกระบวนการสีข้าว นอกจากนี้ยังรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอกด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอก

2.1 ข้าว (Rice)

2.1.1 ความหมายของข้าว

ข้าว (*Oryza sativa*) ซึ่งจัดเป็นเมล็ดพืชประเภทหญ้าที่มีใบยาว ต้นเป็นลำข้อและมีดอก นอกจากนี้ผลผลิตที่ได้จะเป็นเมล็ดมีเปลือกสีน้ำตาลหุ้มด้านใน ซึ่งสามารถใช้การตำหรือสีข้าวเพื่อทำให้เมล็ดด้านในหลุดออกมาเพื่อนำมารับประทานเป็นอาหารหลังผ่านการต้มหรือนึ่งแล้ว (พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2525) โดยมีลักษณะของข้าวแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของข้าวชนิดต่าง ๆ (ที่มา : <https://www.chonklang.com/th/>, 1915)

2.1.2 การจำแนกประเภทของข้าว

ประเทศไทยนิยมปลูกข้าว ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของข้าวได้ 3 ประเภท คือ

2.1.2.1 ข้าวไร่

เป็นข้าวที่ต้องการน้ำในปริมาณน้อยมากระหว่างการเจริญเติบโต ซึ่งนิยมปลูกบนที่สูงหรือตามไหล่เขาในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

2.1.2.2 ข้าวนาสวน

เป็นข้าวที่ต้องการน้ำในปริมาณมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต ข้าวประเภทนี้ได้รับความนิยปลูกในประเทศไทย

2.1.2.3 ข้าวนาเมือง

เป็นข้าวที่ปลูกในแหล่งที่มีระดับน้ำสูงกว่า 1 m ขึ้นไป นิยมปลูกด้วยการหว่านบริเวณที่ลุ่มมากในพื้นที่ภาคกลาง

2.1.3 ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของข้าว

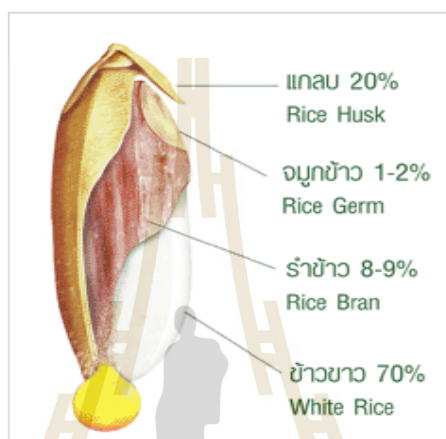
2.1.3.1 ส่วนประกอบของข้าว

สำหรับส่วนประกอบของข้าวสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีส่วนประกอบดังนี้

- เปลือกนอกหรือข้าวชั้นนอกสุด เป็นส่วนของแกลบ (Husk) ประกอบด้วยส่วนของเซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ทำหน้าที่ป้องกันและครอบคลุมด้านนอกทั้งหมด นอกจากนี้ยังห่อหุ้มส่วนที่เป็นข้าวกล้อง ซึ่งมีลักษณะสากและมีสีน้ำตาลเป็นฝ้า ประกอบกัน 2 ฝ้า ประกอบด้วยเปลือกฝ้าใหญ่ (lemma) และเล็ก (Palea) หลังจากผ่านการสีข้าวแล้วจะได้เป็นชั้นแกลบ ซึ่งมีประมาณ 20% ของข้าวเปลือก (นงนุช วงศ์สินชวน, 2555)

- เปลือกเมล็ดหรือเยื่อหุ้มข้าวกล้อง (Caryopsis coat) สามารถแบ่งเนื้อเยื่อเป็น 3 ชั้น ได้แก่ เยื่อหุ้มผล (Pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) และส่วนที่เป็นนิวเคลลัส (Nucellus) นอกจากนี้เมื่อแกะเปลือกนอกแล้วจะได้เมล็ดที่เรียกว่า ข้าวกล้อง ซึ่งแต่ละสายพันธุ์ข้าวจะมีสีที่ต่างกัน เช่น สีขาว, น้ำตาลอ่อน, แดง รวมถึงม่วงจนเกือบดำ โดยที่สารเหล่านี้อยู่ในชั้นเยื่อหุ้มผล และเยื่อหุ้มเมล็ด (ชาญ มงคล, 2536; นงนุช วงศ์สินชวน, 2555) นอกจากนี้ในเมล็ดข้าวกล้องประกอบด้วยจมูกข้าว (Germ หรือ Embryo) และเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) โดยส่วนของจมูกข้าวสามารถเจริญเป็นต้นกล้าต่อไปได้ นอกจากนี้ยังมีโปรตีน ลิพิด (Lipid) และวิตามินแร่ธาตุปริมาณสูงในส่วนนี้หลังจากขัดข้าวจนเป็นข้าวสารทำให้ได้รำข้าว (Rice bran) ที่มีสีน้ำตาล ซึ่งมีประมาณ 11% ของข้าวเปลือกและ 8% ของน้ำหนักเมล็ดพืช อีกทั้งเป็นแหล่งสารอาหารมากถึง 65% เช่น โปรตีน, โยอาหาร, ไขมัน, วิตามิน, เกลือแร่ และสารต้านอนุมูลอิสระปริมาณสูงพวกสารแกมมา-โอริซานอล (Gamma-oryzanol), Phytosterols และ Phytochemicals

- เนื้อเมล็ด (Endosperm) จะมีเยื่ออะลิวโรน (Aleurone layer) ห่อหุ้ม ส่วนของเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนที่มีโปรตีนสะสมอยู่มาก นอกจากนี้ยังมีธาตุฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และ โพแทสเซียม สำหรับภายในเนื้อเมล็ดประกอบด้วยแป้งถึง 69% ของข้าวเปลือก (นนุช วงศ์สินชวัน, 2555) อย่างไรก็ตามข้าวกล้องจะมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงแต่มีเนื้อสัมผัสที่กระด้างกว่าข้าวสาร เนื่องจากการขัดขวางของเส้นใยเซลลูโลสและโปรตีนส่งผลทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านไปได้ง่าย อีกทั้งใช้ระยะเวลาหุงที่นานกว่าข้าวขาว (วรรณวิไล ฤทธิเดช, 2550; นนุช วงศ์สินชวัน, 2555)

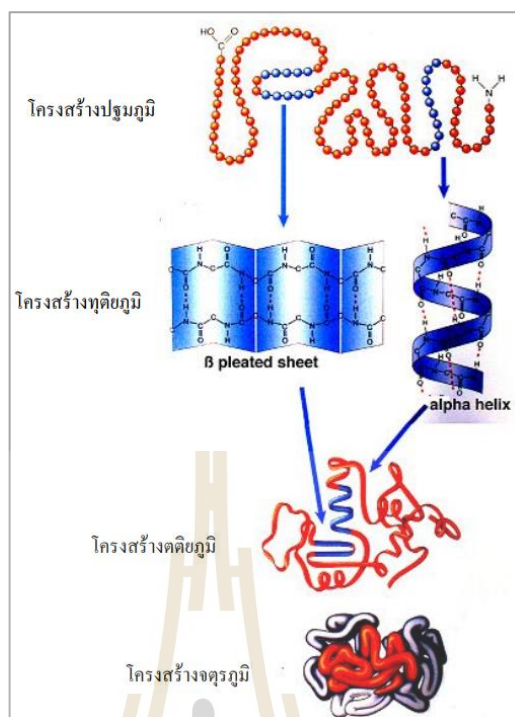


รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของข้าว (ที่มา : <https://productherb.blogspot.com/2015/04/2556>)

2.1.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

- คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) มีปริมาณมากในข้าว โดยชนิดของคาร์โบไฮเดรตที่พบบ่อยในข้าวคือ สตาร์ช (Starch), เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเดกซ์ทริน (Dextrin) ตามลำดับ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

- โปรตีน (Protein) ข้าวมีปริมาณโปรตีนเล็กน้อย (6.8 – 8.5%) แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ข้าว โดยข้าวมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าเมล็ดธัญพืชอื่น ๆ นอกจากนี้โครงสร้างของโปรตีนมีความซับซ้อนและพันธะทางเคมีมีผลต่อโครงสร้าง 3 มิติของโปรตีน อย่างไรก็ตามโครงสร้างของโปรตีนที่มีความจำเพาะเมื่อพันธะถูกทำลายส่งผลทำให้โครงสร้างสูญเสียไปและไม่สามารถทำงานหรือกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ทั้งนี้โครงสร้างของโปรตีนแบ่งออกเป็น 4 ระดับตามพันธะที่เกิดขึ้น (ระบบคลังข้อมูลทางวิชาการ BRU, 2016) (รูปที่ 2.3) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างสามมิติของโปรตีนทั้ง 4 ระดับ (ที่มา : ระบบคลังข้อมูลทางวิชาการ BRU, 2559)

- โครงสร้างระดับปฐมภูมิ (Primary structure) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของโปรตีนทุกชนิด มีลักษณะเป็นสายยาวของกรดอะมิโนที่มีการเรียงลำดับที่แน่นอนมาเชื่อมต่อกันเป็นสายพอลิเพปไทด์ (Polypeptide) ซึ่งโครงสร้างนี้มีความสำคัญมากเนื่องจากความผิดปกติอาจทำให้เปลี่ยนแปลงหน้าที่ของโปรตีนไปได้
- โครงสร้างระดับทุติยภูมิ (Secondary structure) เป็นโครงสร้างที่ได้จากการขดม้วนของโครงสร้างระดับปฐมภูมิและมีลักษณะบิดเป็นเกลียวของสายพอลิเพปไทด์ที่ โครงสร้างระดับนี้มี 2 ชนิด คือ เกลียวแอลฟา (α -helix) มีลักษณะเป็นเกลียว และแผ่นเบต้า (β -pleated sheet) มีลักษณะเป็นขดทับเป็นแผ่น
- โครงสร้างระดับตติยภูมิ (Tertiary structure) เกิดจากพันธะหลายชนิดในการสร้างโครงสร้าง 3 มิติ เช่น พันธะไฮโดรเจน พันธะไดซัลไฟด์ เป็นต้น ที่ช่วยยึดระหว่างสายพอลิเพปไทด์ภายในสายเดียวกันหรือยึดกันระหว่างสายที่เชื่อมต่อขดตัวบิดพับกันไปมาทำให้โครงสร้างทรงกลม 3 มิติ
- โครงสร้างจตุรภูมิ (Quaternary structure) ที่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยพอลิเพปไทด์มากกว่า 1 สายขึ้นไปซึ่งอาจมีทั้งโครงสร้างปฐมภูมิ ทุติยภูมิ หรือตติยภูมิมาจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนขึ้น ประกอบด้วยพอลิเพปไทด์ชนิดแอลฟา (α chain) 2 สาย และสาย

เบต้า (β chain) 2 สาย ทั้งนี้การที่โปรตีนมีโครงสร้างดังกล่าวเพื่อให้ไม่ต้องสร้างสายพอลิเพปไทด์ที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ และเมื่อมีจุดที่บกพร่องตรงหน่วยย่อยใดสามารถแก้ไขเฉพาะจุดนั้นได้

- ไขมัน (Lipid) ในเมล็ดข้าวจะมีอยู่ประมาณ 3% ซึ่งจะอยู่บริเวณส่วนด้านนอกมากกว่าบริเวณด้านในเมล็ด นอกจากนี้มีปริมาณไขมันเหลือเพียง 0.3 – 0.5% หลังจากผ่านการขัดสีเป็นข้าวขาวแล้ว อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของไขมันและเม็ดสตาร์ชถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

1. ไขมันจับกับโปรตีนที่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช รวมถึงบริเวณโครงสร้างของ Amylopectin สายนอก

2. ไขมันที่แทรกอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชและจับกันอยู่

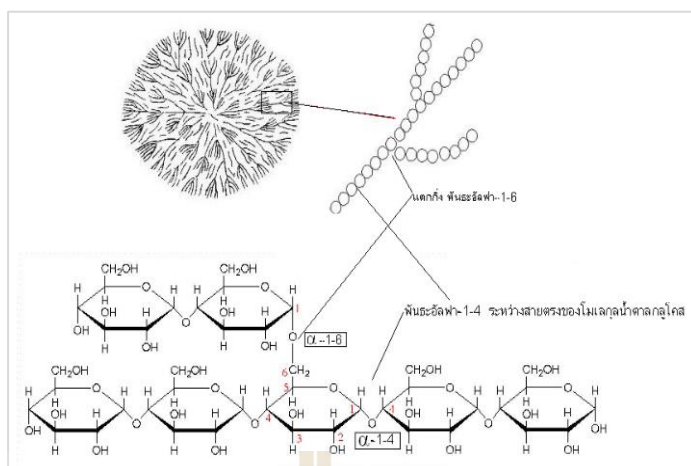
3. ไขมันที่แทรกอยู่ภายในเม็ดสตาร์ชแต่ไม่ได้จับกันอยู่

- ปริมาณความชื้น (Moisture content) ของข้าวเปลือกและข้าวสารถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีผลต่ออายุและความปลอดภัยของการเก็บรักษาข้าวให้มีคุณภาพที่ดีได้ โดยความชื้นที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาควรอยู่ประมาณ 12 – 14% ซึ่งสามารถเก็บรักษาข้าวได้ดีภายในช่วงเวลา 6 เดือน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) นอกจากนี้ ความชื้นที่เหมาะสมของข้าวเปลือกมีผลต่อคุณภาพของสีและปริมาณข้าวเมล็ดเต็ม

2.1.4 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชข้าว (Physicochemical properties of rice starch)

2.1.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชข้าว (Chemical composition of rice starch)

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์พบมากที่สุดในเมล็ดข้าว (90%) ซึ่งสตาร์ชมี 2 ชนิด ได้แก่ อะมิโลส และอะมิโลเพคติน ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะของน้ำตาลกลูโคสเรียงกันเป็นสายยาว โดยอะมิโลส และอะมิโลเพคตินจะจับตัวกันแน่นภายในเม็ดสตาร์ช และมีการจัดเรียงโครงสร้างตามแนวรัศมีจากจุดกึ่งกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

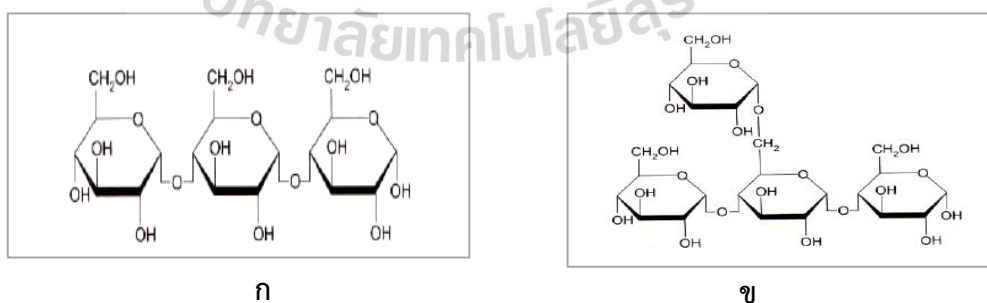


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ช (ที่มา : Amagliani et al., 2016)

- อะมิโลส (Amylose) เกิดจากการเรียงตัวกันเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (Linear chains) ของกลูโคส โดยโครงสร้างจะมีหลายรูปแบบเมื่ออยู่ในสารละลายที่ต่างกัน เช่น สายตรง สายพันแบบเกลียวเดียวหรือคู่ แบบเกลียวม้วน (Helix) เกลียวคลายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนแบบไม่เจาะจง (Random coil) อีกทั้งยังสามารถรวมตัวกับไอโอดีนจะเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นส่วนเฉพาะของสตาร์ชที่มีอะมิโลสเป็นส่วนประกอบอยู่

- อะมิโลเพคติน (Amylopectin) เกิดจากการเรียงตัวเป็นพอลิเมอร์แบบโซ่กิ่ง (Branched chain) โดยโครงสร้างจะมีลักษณะเป็นกิ่งก้านแบบโซ่กิ่งเกลียวคู่

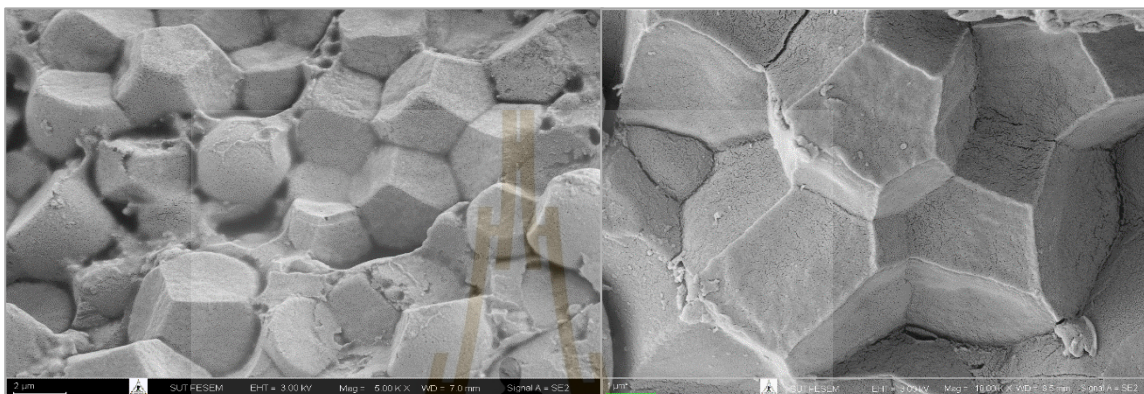
โดยสามารถอธิบายลักษณะของโครงสร้างอะมิโลสและอะมิโลเพคตินได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ : ก คือ อะมิโลส; ข คือ อะมิโลเพคติน (ที่มา : Herrero-Martinez and Schoenmakers (2004))

2.1.4.2 ขนาดและรูปร่างของสตาร์ชข้าว (Size and morphology of rice starch)

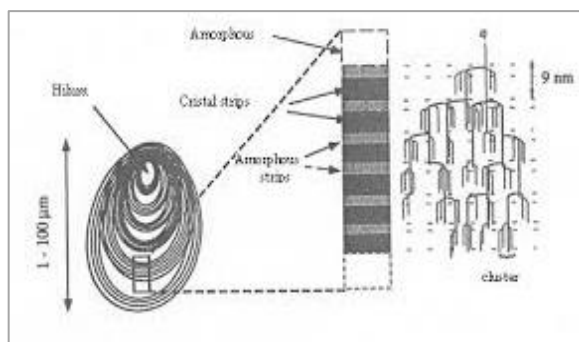
เม็ดสตาร์ชเรียงตัวอัดกันแน่นภายในเมล็ดข้าว โดยอาจมีโปรตีนหรือไขมันแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชข้าวมีขนาด 3 – 5 μm และมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าว (Starch granule) (ที่มา : ญัฐพร ชัชวาลธาดารี, 2565)

2.1.4.3 โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าว (Crystal of rice starch)

สำหรับเม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินจัดเรียงตัวกันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) จะช่วยทำให้เม็ดสตาร์ชคงความเป็นรูปร่างที่แน่นอนและส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ที่ช่วยยึดเกาะชั้นผลึกไว้ด้วยกัน รวมถึงช่วยสร้างความยืดหยุ่นให้กับเม็ดสตาร์ช โดยที่ส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชจะมีโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินเป็นแบบเชิงเส้นและมีลักษณะการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ส่วนที่เป็นผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลเพคตินสายโซ่กึ่งจัดเรียงตัวแบบเกลียวคู่ (Double helix) อย่างเป็นระเบียบในแนวรัศมีเป็นชั้น ๆ ในรูปของคลัสเตอร์ ซึ่งในแต่ละคลัสเตอร์จะประกอบด้วยชั้นผลึกสลับกับชั้นอสัณฐาน สามารถอธิบาย ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (อริญา ลาภโคกสูง, 2555)



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างแบบกึ่งผลึกของเม็ดสตาร์ช (ที่มา : Jacob and Delcours (1998))

2.1.5 สายพันธุ์และประเภทของข้าวในประเทศไทย

สามารถแบ่งประเภทของข้าวได้ 4 ประเภท (<https://www.wongnai.com/food-tips/12-rice-in-thailand?ref=ct>, 2018) คือ

2.1.5.1 ข้าวหอมมะลิ

เป็นข้าวที่มีกลิ่นหอมคล้ายใบเตย มีถิ่นกำเนิดในไทย ซึ่งได้รับความนิยมในการบริโภค เช่น ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวหอมมะลิทุ่งกุลารั เป็นต้น

2.1.5.2 ข้าวเหนียว

เป็นสายพันธุ์ข้าวนิยมปลูกในพื้นที่ของภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น ข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 และข้าวเหนียวเขาวงกตพันธุ์ เป็นต้น

2.1.5.3 ข้าวขาว

เป็นข้าวที่มีหลายพันธุ์ เช่น ข้าวเหลืองประทิวชุมพร และข้าวแจ๊กเซยเสาไห้ เป็นต้น

2.1.5.4 ข้าวเพื่อสุขภาพ

เป็นข้าวที่ยังไม่ได้ผ่านการเอารำข้าวออก ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการและมีปริมาณเส้นใยอาหารสูง เช่น ข้าวกล้อง และข้าวไรซ์เบอร์รี่ เป็นต้น

2.1.6 กระบวนการสีข้าว

ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเหมาะสม (ความชื้น 13-15%) จะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการสีข้าว (Rice milling) โดยทำการแปรรูปไปเป็นข้าวกล้องหรือข้าวสารเพื่อนำไปบริโภค ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ดังนี้

2.1.6.1 การทำความสะอาดข้าวเปลือก

เป็นขั้นตอนที่ใช้เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมออกจากข้าวเปลือก เช่น เศษหญ้า ฝุ่น ผง และกรวดทราย โดยการแยกสิ่งปลอมปนออกด้วยการร่อนหรือเป่า

2.1.6.2 การกะเทาะเปลือก

เป็นขั้นตอนที่ใช้เพื่อทำการแยกแกลบ (Husk) ออกจากเมล็ดข้าวด้วยเครื่องกะเทาะ (Huller) โดยจะมีแบบที่ใช้ลูกยางหรือใช้แผ่นโลหะบุด้วยหินหยาบเพื่อทำให้เกิดการเสียดสีและสามารถกะเทาะให้แกลบหลุดออกจากเมล็ดข้าวจนได้เป็นข้าวกล้อง ซึ่งจะมีส่วนที่เป็นข้าวเต็มเมล็ดไม่มีส่วนใดหัก (Whole kernels) และส่วนที่เป็นต้นข้าวหรือข้าวตัน (Head rice) เป็นเมล็ดข้าวที่มีความยาวของเมล็ดข้าวมากกว่าข้าวหัก แต่ยังไม่ถึงความยาวของข้าวเต็มเมล็ด รวมถึงเมล็ดข้าวแตกซีกที่ยังมีเนื้อเหลืออยู่ตั้งแต่ 80% ของเมล็ด และข้าวหัก (Broken rice) เป็นเมล็ดข้าวที่มีความยาวตั้งแต่ 2.5 ส่วนขึ้นไป แต่ไม่ถึงความยาวของต้นข้าว รวมถึงเมล็ดข้าวแตกซีกที่ยังมีเนื้อเหลืออยู่ไม่ถึง 80% ของเมล็ด ดังแสดงลักษณะของเมล็ดข้าวในรูปที่ 2.8 (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2555)



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะขนาดข้าวหักและส่วนข้าวหัก (ที่มา : พลกฤษณ์ คุ่มกล้า, 2557)

2.1.6.3 การขัดขาวและขัดมัน (Whitening and polishing)

เป็นขั้นตอนที่ใช้เพื่อขัดชั้นรำออกจากข้าวกล้องและนำมาขัดมันส่งผลทำให้ข้าวมีผิวเรียบและมีความเงาสะอาด นอกจากนี้รำข้าวที่เหลือจากขั้นตอนนี้สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของการทำน้ำมันรำข้าวต่อไป

2.1.6.4 การคัดขนาดข้าวสาร

เป็นขั้นตอนที่สามารถทำได้โดยใช้ตะแกรงลักษณะมีรูเปิดที่ความยาวแตกต่างกัน เพื่อคัดแยกข้าวเต็มเมล็ดและต้นข้าวออกจากข้าวหักและปลายข้าว

2.2 ข้าวกล้อง (Brown rice)

ตามมาตรฐานสินค้าเกษตรข้าวไทยของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2560 ได้นิยามความหมายของข้าวกล้อง (Brown rice)

หมายถึง ข้าวที่ผ่านการกะเทาะเอาเปลือกออกเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ยังมีสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญจากคาร์โบไฮเดรต สามารถกระตุ้นการทำงานของลำไส้จากไฟเบอร์ ซึ่งส่งผลดีกับระบบขับถ่ายและลดการเกิดปัญหาท้องผูก รวมถึงมีแร่ธาตุที่สำคัญ เช่น แมงกานีส เหล็ก กรดโฟเลต และสังกะสี



รูปที่ 2.9 ลักษณะของข้าวกล้อง (ที่มา : ญัฐพร ชัชวาลธาดรี, 2563)

2.3 ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice)

จากมาตรฐานสินค้าเกษตรข้าวกล้องงอกของสำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2555 ได้นิยามความหมายของข้าวกล้องงอก (รูปที่ 2.10) หมายถึง ผลผลิตของข้าวที่ผ่านการทำให้งอกโดยการแช่ข้าวเปลือกหรือแช่ข้าวกล้องในน้ำ ทำให้รากงอกออกจากเมล็ดด้วยความยาวระหว่าง 0.5 - 1 mm แล้วนำไปผ่านความร้อน (นึ่ง อบ หรือ ต้ม) และ/หรือลดความชื้นเพื่อทำให้แห้ง โดยส่วนใหญ่มีความนิยมนบริโภคข้าวขาวมากกว่าข้าวกล้อง อย่างไรก็ตามปัจจุบันพฤติกรรมการบริโภคเกิดการเปลี่ยนแปลงผู้บริโภคมีความใส่ใจด้านสุขภาพจึงทำให้มีการบริโภคข้าวกล้องมากขึ้น อีกทั้งข้าวกล้องอุดมด้วยคุณค่าทางอาหารมากมายประกอบไปด้วย โปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ เซลลูโลส และเอมิเซลลูโลส ดังนั้นการบริโภคข้าวกล้องจึงมีคุณค่าทางอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย แต่เนื่องจากเส้นใยจากเซลลูโลส และโปรตีนในข้าวกล้องจะขัดขวางไม่ให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดได้ง่ายจึงทำให้มีความกระด้างและใช้เวลาหุงต้มนานมากกว่าข้าวสารที่ผ่านการขัดขาวแล้ว (วรรณวิไล ฤทธิเดช, 2550) วิธีการทำข้าวกล้องงอกจึงเป็นวิธีที่ช่วยปรับปรุงให้ข้าวกล้องงอกมีความนุ่มมากขึ้น อีกทั้งทำให้เกิดสารชีวภาพ เช่น สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) ที่ดีต่อร่างกาย(นงนุช วงศ์สินชวัน, 2555) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเป็นสารที่มีฤทธิ์จำเพาะเช่น มีผลต่อเซลล์มะเร็ง และต่อเชื้อไวรัส เป็นต้น อย่างไรก็ตามสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต้องไม่มีส่งผลเสียต่อร่างกาย (สุริยา ทุดปอ และจิตรา สิงห์ทอง, 2560) และยิ่งช่วยลด

ความเสี่ยงของโรคหัวใจ มะเร็ง และโรคอื่น ๆ ได้ ข้าวกล้องที่ผ่านการเพาะงอกสามารถเกิดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญได้หลายชนิด เช่น สารกาบา ไยอาหาร กรดเพอรูลิก วิตามินอี แมกนีเซียม แกมมาโอไรซานอล และโพรไบโอติก เป็นต้น ซึ่งสามารถพบได้ใน ผัก ผลไม้ และธัญพืช ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสหรือพัฒนาคุณสมบัติทางโภชนาการและสุขภาพ (Gonzalez-Aguilar, 2011; Moongngarm and Saetung, 2010; Galanakis, 2017; Madalena et al., 2018; Mahfoudhi et al., 2016)



รูปที่ 2.10 ลักษณะของข้าวกล้องงอก (ที่มา : อนุรักษ์ ชัชวาลชาติ, 2564)

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีระหว่างการงอก

เมล็ดที่ได้มีน้ำซึมผ่านเข้าไปจะเกิดกระบวนการสังเคราะห์ต่าง ๆ ภายในเซลล์ เริ่มสร้างสารที่มีความจำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ ได้แก่ การย่อยสลาย และการลำเลียงสารอาหารที่เก็บสะสมไว้สำหรับการเจริญเติบโตเป็นต้นกล้าที่ปกติได้ (นงนุช วงศ์สินชอน, 2555) นอกจากนี้ปริมาณสารสำคัญในพืชมีปริมาณต่ำกว่าการบริโภคต่อวัน โดยวิธีการที่ช่วยเพิ่มสารอาหารได้ คือ กระบวนการทางชีวภาพที่เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในสิ่งมีชีวิต เช่น กระบวนการงอก (Germination) และกระบวนการหมัก (Fermentation) เป็นต้น (ภัสจรรย์ และคณะ, 2558)

สำหรับกระบวนการงอกจะนำข้าวเปลือกมาเพาะงอก โดยที่ข้าวเปลือกจะต้องผ่านระยะพักตัวประมาณ 1 เดือนเพื่อยับยั้งสารที่มีต่ออัตราการงอกของข้าว ซึ่งใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 30-40°C ในระหว่างการงอกเริ่มขึ้นเมื่อเมล็ดข้าวได้รับน้ำเข้าไปทำให้เปลือกเมล็ดอ่อนลงและทำให้โปรโทพลาสซึม (Protoplasm) ภายในเซลล์ได้รับน้ำและเกิดการสังเคราะห์เอนไซม์ (Enzyme synthesis) ขึ้น (ภัสจรรย์ และคณะ, 2558) และส่งผลทำให้เกิดการสังเคราะห์สารต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ การย่อยสลาย และการลำเลียงสารที่เก็บสะสมไว้ เช่น เอนไซม์ DNA

และ RNA เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้สมบูรณ์ การย่อยสลายสารอาหารด้วยเอนไซม์ส่งผลให้เกิดสารอาหารหลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไฮโดรเลส (Hydrolase) ทำให้จากรูปน้ำตาลที่ละลายน้ำไม่ได้เป็นรูปน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ จึงส่งผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีรสหวาน เช่น อะไมเลส (Amylase) และฟอสฟอริเลส (Phosphorylase) นอกจากนี้ในระหว่างการงอกของเมล็ดจะเกิดเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ที่สร้างขึ้นใหม่เพื่อย่อยโปรตีนทำให้ได้กรดอะมิโนหลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ กรดแกมมาอะมิโนบิวทิริก (Gamma amino butyric acid) หรือกาบา (GABA) ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทที่สำคัญต่อระบบสมอง อีกทั้งมีใยอาหารชนิดที่ละลายน้ำ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่ไม่สามารถถูกย่อยในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์จึงช่วยดูดซับสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) และช่วยป้องกันการดูดซึมน้ำตาลเข้าสู่เส้นเลือดจึงมีประโยชน์ต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน นอกจากนี้ยังพบสารต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด เช่น วิตามินอี สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) โอไรซานอล (Oryzanol) ที่ช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเลือดได้ อีกทั้งพบวิตามินและแร่ธาตุหลายชนิด เช่น B1 B2 ไนอะซิน แมกนีเซียม แมงกานีส สังกะสี โคบอล ทองแดง ซีลีเนียมและไอโอดีน (นงนุช, 2555) จากรายงานของนักวิจัยหลายท่านได้ทำศึกษาผลของการเพาะงอกต่อปริมาณสารกาบาของข้าวกล้อง (Control) และข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice) พบว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกมีผลทำให้ปริมาณกาบาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณกาบาของข้าวกล้องงอกเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้อง

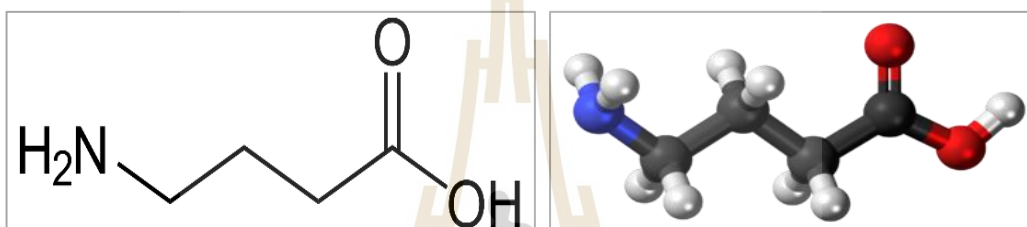
References	GABA (mg/100 g sample)	
	Control	Germinated Brown rice
Preliminary experiment in this study	0.41	11.90
Moongngarm and Seatung (2010)	23.80	68.40
Chungcharoen et al. (2015)	5.60	27.90

2.3.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds)

ในระหว่างกระบวนการงอกส่งผลให้เกิดสารสำคัญที่มาจากการกระตุ้นของเอนไซม์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประโยชน์ในร่างกายและสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิด โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้ (ภัสจันท์ และคณะ, 2558; กรกฎ และคณะ, 2561)

2.3.2.1 สารแกมมาอะมิโนบิวทีริกแอซิด (Gamma-Aminobutyric acid, GABA)

เป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งที่สำคัญโดยมีทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ออกฤทธิ์ยับยั้งหรือต้านทาน (Inhibitor) เพื่อรักษาความสมดุลของระบบสารสื่อประสาท นอกจากนี้ยังเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสารกาบาในเมล็ดข้าวสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดกลูตามิก (Glutamic acid) โดยเอนไซม์กลูตาเมทดีคาร์บอกซิเลส (Glutamate decarboxylase, GAD) ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (อินทาวูธ และคณะ, 2558) โดยลักษณะโครงสร้างของกาบาสามารถอธิบายดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างของกาบา (ที่มา : <https://th.wikipedia.org/wiki/กรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก>, 2557)

สำหรับประโยชน์ของสารกาบา มีรายละเอียดดังนี้

- เป็นสารสื่อประสาทที่ช่วยให้สมองผ่อนคลาย ลดความตึงเครียด ลดความวิตกกังวล ช่วยให้นอนหลับ หากมีสารสื่อประสาทชนิดกระตุ้นมากเกินไปจะทำให้ร่างกายตื่นตัวตลอด จึงทำให้เครียดง่าย สารสื่อประสาทชนิดยับยั้งจะทำหน้าที่ต้านทานจึงทำให้ผ่อนคลาย ลดความวิตกกังวล นอกจากนี้ยังช่วยให้ความคิดความจำดี

- กระตุ้นการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Pituitary gland) จากสมองส่วนหน้า (Anterior pituitary) ที่ทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนที่ส่งเสริมการเจริญเติบโต กระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อ และกระดูกโครงร่างของร่างกาย

- กระตุ้นการสร้างสารไลโปโทรปิก (Lipotropic) ซึ่งเป็นสารป้องกันไขมันเกาะตัวในร่างกาย ลดการสะสมไขมันจึงช่วยควบคุมน้ำหนักได้

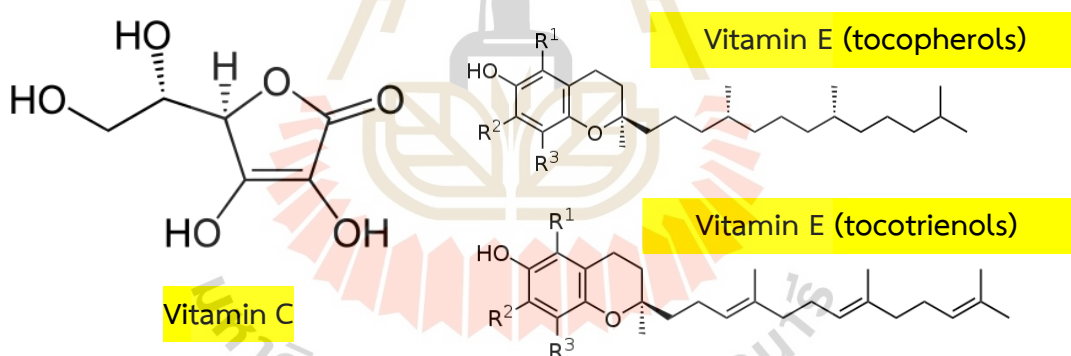
- ป้องกันโรคที่เกี่ยวข้องกับสารสื่อประสาท เช่น อัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease) พาร์กินสัน (Parkinson's disease)

- ชะลอความเสื่อมของเซลล์ ป้องกันการเกิดมะเร็ง เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ที่มีประสิทธิภาพสูง

- กระตุ้นการสร้างสารที่ช่วยป้องกันไขมันสะสม (Lipotropic) ช่วยทำลายเนื้อเยื่อไขมัน สร้างเนื้อเยื่อใหม่ให้ความกระชับ
- ลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือด เพราะช่วยให้หลอดเลือดมีความยืดหยุ่น เลือดจึงไหลเวียนดีขึ้น จึงช่วยควบคุมระดับความดันโลหิตให้ปกติ
- กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย (Immune system) กระตุ้นการสร้างฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ที่เป็นสารประกอบสำคัญในเม็ดเลือดแดง (Heme)

2.3.2.2 สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant)

หรือสารต้านออกซิเดชันทำหน้าที่ยับยั้งหรือต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมถึงกำจัดอนุมูลอิสระออกจากร่างกาย ซึ่งสามารถแบ่งตามกลไกของการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันได้เป็น 3 ชนิด คือ สารกลุ่มป้องกันการเกิดอนุมูลอิสระ (Preventative antioxidant) สารกลุ่มที่ทำลายหรือยับยั้งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น (Scavenging antioxidant) และสารกลุ่มที่ทำให้ลูกโซ่ที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระสั้นที่สุดลง (Chain breaking antioxidant) โดยตัวอย่างของสารต้านออกซิเดชัน ได้แก่ วิตามินซี (Ascorbic acid) ที่สามารถละลายน้ำได้ วิตามินอี (Vitamin E) ที่ละลายได้ในไขมันซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ประกอบด้วยโทโคฟีรอล (Tocopherol) และโทโคโทrienอล (Tocotrienol)



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างสารต้านอนุมูลอิสระ

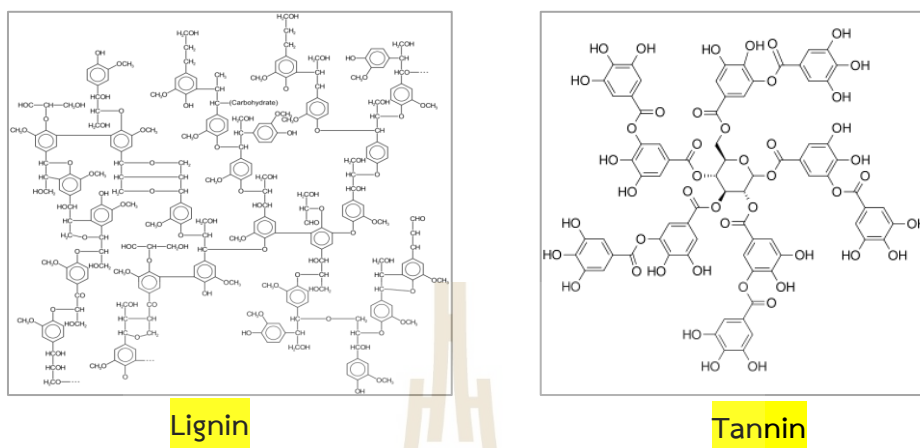
(ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Vitamin_C, 2565;

https://en.wikipedia.org/wiki/Vitamin_E, 2564)

2.3.2.3 สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound)

เป็นสารที่สามารถพบได้ในพืชทุกชนิดโดยตามธรรมชาติจะพบมากที่สุดในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) และพอลิฟีนอลิก (Polyphenolic) เช่น ลิกนิน (Lignin) และแทนนิน (Tannin) นอกจากนี้มีประโยชน์ในส่วนช่วยป้องกันมะเร็ง ป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือดสมอง

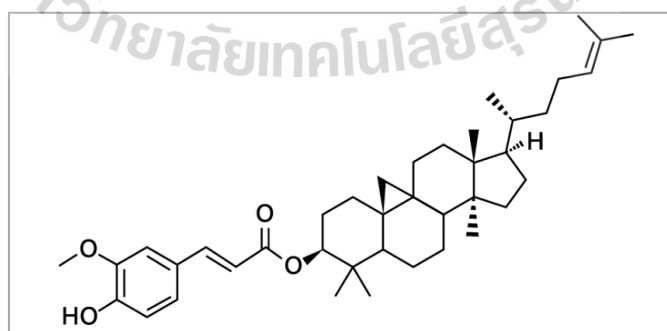
อีกทั้งช่วยเพิ่มระดับคลอเลสเตอรอลชนิดดี (HDL) รวมถึงลดความดันโลหิตและระดับน้ำตาลในเลือดอีกด้วย



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างของตัวอย่างสารประกอบฟีนอลิก
(ที่มา : <https://en.wikipedia.org/wiki/Lignin>, 2564;
<https://en.wikipedia.org/wiki/Tannin> , 2563)

2.3.3.4 สารแกมมาโอไรซานอล (γ -oryzanol)

เป็นสารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีคุณสมบัติสำคัญที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระรวมถึงช่วยลดระดับไขมันในเลือด กระตุ้นการหลั่งฮอร์โมนที่ใช้ในการเจริญเติบโต (Growth hormone) เพิ่มการหลั่งสารที่ช่วยทำให้ผ่อนคลาย (Endorphin) และลดการสูญเสียแคลเซียมสาเหตุของโรคกระดูกพรุน



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะโครงสร้างของ γ -oryzanol (ที่มา :
<https://www.disthai.com/17290410/>, 2560)

2.4 กระบวนการผลิตข้าวงอก (Germination brown rice process)

กระบวนการผลิตข้าวงอกประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ การแช่ข้าว การเพาะงอก และการทำแห้งเพื่อลดความชื้น ซึ่งวิธีการแบบดั้งเดิมนั้นจะเริ่มนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำสะอาด เป็นเวลา 24 h จากนั้นข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอก แล้วนำไปผ่านความร้อน (นึ่ง อบ หรือ ต้ม) และ/หรือลดความชื้นเพื่อให้แห้งมีความชื้นอยู่ที่ประมาณ 12 - 15% เพื่อนำข้าวงอกมาแกะเทาะเปลือกและเก็บรักษาสำหรับการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตข้าวงอกสามารถเพิ่มปริมาณสารกาบาได้ แต่ต้องอาศัยปัจจัยที่จำเป็นต่อการงอกของเมล็ดข้าวที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ โดยอาศัยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1 อุณหภูมิ ระยะเวลา และสภาวะความเครียดในการเพาะงอกที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวกล้องงอก

จากงานวิจัยของ Moongngarm and Seatung (2010) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเปลือกและข้าวกล้องงอกสายพันธุ์ กข6 โดยนำข้าวกล้องและข้าวเปลือก ปริมาณ 5 kg มาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 28-40°C เป็นเวลา 12 และ 48 h ตามลำดับ โดยจะมีการเปลี่ยนน้ำที่ใช้แช่ทุก ๆ 4 และ 8 h ตามลำดับ จากนั้นใช้ผ้าขาวบางคลุมข้าวเพื่อทำการเพาะงอก ที่อุณหภูมิ 28 - 40°C เป็นเวลา 24 และ 48 h ตามลำดับมีความชื้นอยู่ระหว่าง 90 - 95% โดยใช้ระบบสเปรย์อัตโนมัติ และทำแห้งข้าวกล้องและข้าวเปลือกงอกด้วยอุณหภูมิ 50°C ที่มีความชื้นประมาณ 10% ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณสารกาบาเท่ากับ 23.8 - 118 mg/100 g ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ที่ 110 mg/100 g ปริมาณวิตามินอี 0.93 - 1.50 mg/100 g และปริมาณโอโรซานอลอยู่ที่ 66 - 106 mg/100 g กระบวนการเพาะงอกมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกรดอะมิโน เนื่องจากหลังการเพาะงอกปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลได้อาจเกิดจากเอนไซม์ alpha amylase ย่อยสลายสตาร์ชระหว่างการเพาะงอก อย่างไรก็ตามปริมาณคาร์โบไฮเดรต ไขมัน ใยอาหารและเถ้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้หลังการเพาะงอกมีผลทำให้วิตามินบีและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการแช่น้ำหลังการเพาะงอกและกระบวนการเพาะงอกตามลำดับ

Caceres et al. (2014) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเพาะงอก โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้การเพาะงอกต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวกล้องงอกสายพันธุ์เอกวาดอร์ ข้าวกล้องถูกนำมาแช่น้ำในอัตราส่วนข้าวกล้องต่อน้ำอยู่ที่ 1 : 5 ที่อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำข้าวกล้องมาเพาะงอกภายในบริเวณที่ควบคุมแสงมืดที่มีความชื้น 90%RH ที่อุณหภูมิ 28 และ 34°C เป็นเวลา 48 และ 96 h ตามลำดับ จาก

การศึกษาพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลามีผลแปรผันตรงต่อปริมาณสารกาบาเปอร์เซ็นต์การออก ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระและปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด โดยมีปริมาณสารกาบาอยู่ที่ 10 - 123 mg/100 g และปริมาณสารฟีนอลิกมีค่าระหว่าง 0.57 - 2.52 mg/100 g นอกจากนี้ สภาวะที่เหมาะสมของการเพาะงอกข้าวกล้อง คือการเพาะงอกที่อุณหภูมิ 34°C เป็นเวลา 96 h

จากงานวิจัยของ Kim et al. (2015) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ปริมาณสารกาบาในรำข้าวภายใต้สภาวะที่มีความเครียดที่แตกต่างกัน ซึ่งสารกาบาจะถูกสังเคราะห์ ขึ้นภายในเนื้อเยื่อของพืชที่อยู่ภายใต้สภาวะที่มีความเครียดมาเกี่ยวข้อง เช่น ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไนโตรเจนสูงมีผลทำให้เร่งการผลิตปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้น 20 เท่า ซึ่ง งานวิจัยดังกล่าวได้ทำการปรับสภาพรำข้าวที่อุณหภูมิ 20 - 60°C ความชื้น 20 - 50% เป็นเวลา 12 h และใช้น้ำที่มีค่า pH 3.3 ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน โดยในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาความชื้นต่อ ปริมาณสารกาบาพบว่า ที่ความชื้น 30% มีปริมาณสารกาบาสูงสุดอยู่ที่ 110 mg/100 g จากนั้นทำ การปรับสภาพตามสภาวะดังกล่าว จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 40°C และ 30°C มีปริมาณ สารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 2 h แรก จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งปริมาณ สารกาบามีค่าเท่ากับ 280 mg/100 g ในส่วนการปรับสภาพที่เหมาะสม คือที่อุณหภูมิ 40°C ความชื้น 30% เป็นเวลา 12 h ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน โดยค่า pH ของสารละลายกลูตามิก อยู่ที่ 3.3 และ 10.2 ส่งผลให้ได้ปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นถึง 350 mg/100 g อย่างไรก็ตามค่า pH ของน้ำที่ต่ำกว่า 5.6 มีปริมาณสารกาบาอยู่ที่ 325 mg/100 g

Umnajkitikorn et al. (2013) ได้ทำการศึกษาผลของการแช่ข้าวในน้ำเกลือที่ความ เข้มข้นที่แตกต่างกันเพื่อนำข้าวงอกมาวิเคราะห์ปริมาณการออก ความยาวของรากงอก ความสามารถในการ ยับยั้งอนุมูลอิสระ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและกิจกรรมของเอนไซม์ระหว่างการงอก โดยทำ การแช่เมล็ดข้าวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (น้ำเกลือ) ที่ความเข้มข้น 0 - 300 mM อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 12 h จากนั้นข้าวถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 5 วัน ผลการศึกษา พบว่า ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS มีค่าเท่ากับ 1.25 $\mu\text{mol TE/ g}$ รวมถึงปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3 - 0.4 mg GAE/ g sample นอกจากนี้ความ เข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณการงอกมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระและปริมาณฟีนอลิกมากขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 150 mM

จากงานวิจัยของ Eamarjharn et al. (2016) ทำการศึกษาผลของระยะเวลาการ บ่ม ชนิดและความเข้มข้นบัฟเฟอร์ต่อการผลิตปริมาณสารกาบาในรำข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 ชัยนาท1 พิษณุโลก2 และปทุมธานี1 โดยนำรำข้าวมาผสมกับสารละลายกรดกลูตามิกที่ความเข้มข้น 0.2% ในอัตราส่วนรำข้าวต่อสารละลายอยู่ที่ 1 : 8 (w/v) และบ่มที่อุณหภูมิ 40°C จากนั้นเติมสาร

บัฟเฟอร์ที่ต่างชนิดกันประกอบด้วย citric acid, phosphate buffer และ tris ที่มีค่า pH อยู่ที่ 5.6 ในอัตราส่วนรำข้าวต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 8 (w/v) โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 6 h ผลการศึกษาพบว่า สารบัฟเฟอร์ที่ส่งผลทำให้ได้ปริมาณสารกาบามากที่สุด คือ ที่ความเข้มข้นของ phosphate buffer 80 mM และมีค่า pH เท่ากับ 5.6

2.4.1.1 ผลของการนึ่งต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก

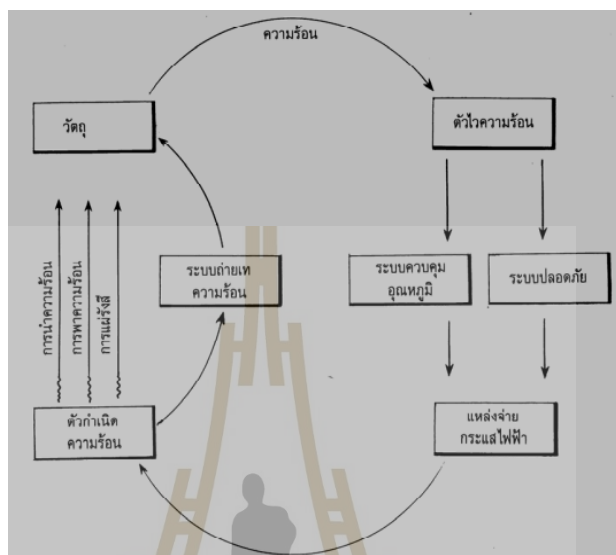
จากการศึกษาของ Hu et al. (2017) ที่สนใจเกี่ยวกับผลของการนึ่งข้าวต่อปริมาณพฤกษเคมี ความสามารถในการยับยั้งสารต้านอนุมูลอิสระ และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอกแดง โดยทำการนำข้าวงอกมาผ่านการนึ่ง เป็นเวลา 0, 2, 5, 10 และ 15 min พบว่า ระยะเวลาหนึ่งมีผลทำให้ความสามารถในการอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ค่า ΔH ลดลงเนื่องจากการนึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชถูกทำลาย อย่างไรก็ตามปริมาณ total free phenolic compound ที่เวลา 0 และ 15 min ไม่มีความแตกต่างกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบข้าวกล้องธรรมดาและข้าวกล้องงอกพบว่า ข้าวกล้องงอกใช้เวลาในการหุงข้าวสั้นกว่า นอกจากนี้ข้าวมีเนื้อสัมผัสที่นุ่มกว่าและมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่า อย่างไรก็ตามข้าวกล้องงอกมีกลิ่นแปลกเกิดขึ้นได้เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างการเพาะงอก ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่ง (Parboiling) ซึ่งเป็นวิธีการให้ความร้อนขึ้นส่งผลต่อรสชาติและเก็บรักษาได้นานกว่าเมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง การให้ความร้อนขึ้นจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การแช่ข้าวเปลือกในน้ำเย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำให้ข้าวเกิดเจลลิตินในเข้ขึ้นด้วยการนึ่งและทำแห้งข้าวที่อุณหภูมิต่ำจนมีความชื้นอยู่ที่ 14% นอกจากนี้ข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการนึ่งจะมีคุณค่าทางอาหารเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสารอาหาร วิตามิน เกลือแร่ในเอ็มบริโอและชั้นนอกของข้าวจะเข้าไปสู่อินโดสเปอร์ม อีกทั้งส่งผลทำให้ข้าวเปลือกงอกมีความแข็งมากขึ้นจึงสามารถลดการแตกหักระหว่างการกะเทาะเปลือกและลดการเหม็นหืนเนื่องจากการทำแห้งเอนไซม์ไลเปสระหว่างการเก็บรักษาได้ รวมถึงลดกลิ่นเหม็นหรือกลิ่นแปลกปลอมที่เกิดจากจุลินทรีย์ในระหว่างการเพาะงอก

Pascual et al. (2013) ได้ทำการศึกษาผลของการนึ่ง เก็บรักษาและการหุงข้าวต่อปริมาณวิตามินอีและแกมมาโอโรซานอลของข้าวกล้อง โดยได้นำเสนอเกี่ยวกับข้อดีของข้าวกล้องที่ผ่านการนึ่งสามารถช่วยให้มีปริมาณผลผลิตสูงเนื่องจากข้าวเกิดเจลลิตินส่งผลทำให้มีความแข็งแรงหลังผ่านการทำแห้งจึงสามารถลดการแตกหักได้ นอกจากนี้ยังลดความเหนียวของข้าว เอนไซม์ไลเปสและจุลินทรีย์ถูกทำลาย รวมถึงเพิ่มอายุการเก็บรักษาได้ อย่างไรก็ตามการนึ่งมีผลทำให้สารอาหารประเภท phytochemical ถูกทำลายไป ได้แก่ วิตามินอีและแกมมาโอโรซานอล

2.4.2 วิธีการทำแห้งที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก

ข้าวเปลือกที่ผ่านการเพาะงอกแล้วจะถูกนำมาลดความชื้นด้วยการให้ความร้อนเพื่อให้มีความชื้นประมาณ 12 - 15% ที่เป็นความชื้นที่เหมาะสมในกะเทาะเปลือกข้าว ซึ่งการให้

ความร้อนจะทำด้วยวิธีการทำแห้ง (Dehydration methods) ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการศึกษาวิธีการทำแห้งทั้งหมด 3 แบบ คือ วิธีการทำแห้งแบบตากแดด การใช้ตู้อบลมร้อน และการใช้รังสีอินฟราเรด โดยมีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.15 องค์ประกอบพื้นฐานของตู้อบลมร้อน (ที่มา : ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์, 2544)

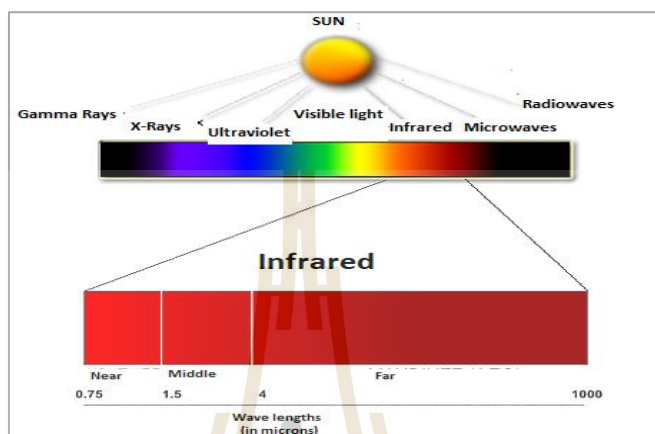
- การทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ความร้อนจากแหล่งกำเนิดถูกถ่ายเทให้กับวัตถุ โดยกระบวนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อนที่ถูกควบคุมอย่างเหมาะสมด้วยตัวให้ความร้อนและระบบควบคุมอุณหภูมิ ทำให้วัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว จากของเหลวเป็นไอ หรือจากของแข็งเป็นไอ (ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์, 2544) องค์ประกอบพื้นฐานของตู้อบลมร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.15

- การทำแห้งด้วยการตากแดด (Sun dried) เป็นการทำแห้งอาหารที่มีแหล่งความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ถ่ายเทสู่วัตถุ ซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งอย่างง่ายไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องทำแห้ง (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์, 2555)

- การทำแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation dried) รังสีอินฟราเรด (IR) เป็นพลังงานในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถแยกตามความยาวคลื่นได้ 3 ระดับ (รูปที่ 2.16) คือ

1. รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Near-infrared radiation, NIR) มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $0.78 - 1.4 \mu\text{m}$

2. รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (Mid-infrared radiation, MIR) มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1.4 –3.0 μm
3. รังสีอินฟราเรดคลื่นยาว (Far-infrared radiation, FIR) มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 3.0 – 1000 μm



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะความยาวคลื่นของรังสีอินฟราเรด

(ที่มา : https://www.firtech.gr/en/posts_en/far-infrared-rays-fir-far-infrared-radiation/)

การใช้รังสีอินฟราเรดร่วมกับกระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมอาหารจะอยู่ในรูปการแผ่รังสี (Radiation) เป็นพลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกจากสสารในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) หรือโฟตอน (Photon) เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุล เป็นการถ่ายเทพลังงานโดยไม่อาศัยตัวกลาง ซึ่งมีความเร็วสูงสุดเท่ากับความเร็วแสงและเกิดได้ในสุญญากาศ การถ่ายเทพลังงานความร้อนนั้นเกิดจากรังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุต่าง ๆ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวมันเองและอุณหภูมิที่ล้อมรอบ ความร้อนจะให้กับอาหารโดยการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางอากาศและถูกดูดกลืนโดยอาหาร สภาพการทะลุผ่าน (Permeability) ของพลังงานที่แผ่รังสีเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพทางความร้อนที่สามารถทะลุผ่านเข้าไปในอาหาร เนื่องจากพลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกสะท้อนออกไปบางส่วน และบางส่วนถูกส่งผ่านเข้าไปในอาหาร พลังงานที่ส่งผ่านเข้าไปในอาหารจะถูกลดทอน (Attenuation) ตามระยะความลึกของการทะลุผ่าน นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดมีลักษณะเด่นในการถ่ายเทความร้อนสู่อาหารอย่างมีประสิทธิภาพไปสู่อาหารด้วยระยะเวลาที่สั้น จึงช่วยลดระยะเวลาของกระบวนการและค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน อีกทั้งอุณหภูมิอากาศโดยรอบสามารถคงที่อยู่ในระดับปกติเนื่องจากอากาศภายในอุปกรณ์ไม่ได้ถูกทำให้ร้อนจึงมีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบ

อุปกรณ์ให้ความกะทัดรัดและทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งสามารถควบคุมได้ง่ายและปลอดภัยและควบคุมความร้อนได้โดยตรงตามที่ต้องการ เป็นต้น (Dongbang, 2013; Yunus and Cengel, 2006; Sakai and Mao, 2006)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของวิธีการทำแห้ง มีดังนี้

จากการวิจัยของ Ding et al. (2018) ทำการศึกษาการเปรียบเทียบผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรด ตู้อบลมร้อน และการตากแดดต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้อง ข้าวกล้องงอก และการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา โดยการนำข้าวเปลือกมาผ่านการทำแห้งด้วย 3 วิธีการดังกล่าวจากนั้นนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 0, 1, 2, 4 และ 7 เดือน เพื่อทำการวิเคราะห์หาอัตราการเพาะงอก พลังงานที่ใช้ในการเพาะงอก และสมบัติทางเคมีและกายภาพอื่น ๆ สำหรับวิธีการเพาะงอกนั้นผู้วิจัยนำข้าวกล้องมาแช่ด้วยน้ำ ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 h จากนั้นข้าวถูกนำมาเพาะงอกในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 30°C และมีการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์ในวันที่ 5 และ 10 ของระยะเวลาการเก็บรักษา ผลการศึกษาพบว่า การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 4 h สามารถลดความชื้นเริ่มต้นจาก 25% ลดลงเหลือ 15.92% นอกจากนี้การเก็บรักษาข้าวที่ผ่านการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีความคงตัวมากขึ้น ซึ่งมีค่าสีเหลืองน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งแบบอื่น อีกทั้งช่วยลดการดูดซึ่มความชื้น ปริมาณพลังงานที่ทำให้เกิดเจลลิตินในเซชันและลดความหนืดของข้าวหลังจากการเก็บรักษาเป็นเวลา 4 เดือน

Ding et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงอายุการเก็บรักษาของข้าวเปลือกและข้าวกล้องโดยใช้ความร้อนจากรังสีอินฟราเรด โดยการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 60°C ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณผลผลิตทั้งหมดและข้าวต้นอยู่ที่ 66 - 67% และ 57 - 61% ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของค่า enthalpy มีผลทำให้ค่า T_p ของข้าวที่ผ่านการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่ำกว่าการทำแห้งแบบตากแดดและใช้ตู้อบลมร้อนซึ่งโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินจับกันแน่น จึงทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการทำให้เกิดเจล การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยทำให้เอนไซม์ไลเปสสลายไปและมีผลทำให้ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาดีขึ้นจึงสามารถเก็บได้นานมากขึ้น อีกทั้งการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่อุณหภูมิดังกล่าวและมีความชื้นที่ผิวของข้าวอาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชภายนอกเมล็ดได้ รวมถึงทำให้สมบัติทางความร้อนและการเกิดเจลเปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามรังสีอินฟราเรดไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในเนื้อข้าวได้จึงไม่ได้ทำให้เม็ดสตาร์ชภายในเกิดเจลได้

จากการศึกษาของ Chungcharoen et al. (2015) ที่เกี่ยวข้องกับผลของระยะเวลาการเพาะงอกและอุณหภูมิในการอบแห้งต่อคุณลักษณะการอบแห้งและคุณภาพของข้าวเปลือกงอก โดยทำการนำข้าวเปลือกและข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 มาแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 60 - 84 h

ซึ่งทำการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 h จากนั้นทำแห้งข้าวด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบต ที่อุณหภูมิ 90 - 150°C ความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 54% db เป็นเวลา 2 - 10 min แล้วนำมาผึ่งให้ความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 13 - 15% db ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องและข้าวงอกมีค่าเท่ากับ 5.6 และ 27.9 - 33.2 mg/100 g ตามลำดับ การใช้อุณหภูมิสูงมีผลทำให้เมล็ดข้าวมีรอยแตกมากขึ้น นอกจากนี้ความแข็งของข้าวและปริมาณสารกาบาไม่มีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบวิธีการทำแห้ง และการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการเพาะงอก อีกทั้งทางผู้วิจัยได้กล่าวถึงคุณภาพของข้าวงอกที่ดีต้องอาศัยระยะเวลาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสตาร์ชและวิธีการอบแห้ง โดยที่ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการสลายตัวของสตาร์ชและมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากขึ้น ส่วนของวิธีการอบแห้งนั้นส่งผลเช่นกัน ซึ่งการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป (มากกว่า 100°C) อาจทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เช่น รอยแยกแตกของเมล็ดข้าวอาจทำให้ข้าวงอกมีความแข็งแรงมากขึ้น

จากการศึกษาของ Tumpanuvatr et al. (2018) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบตกับการใช้ตู้อบลมร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงการหุงข้าวและสมบัติทางกายภาพ สารอาหารและการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำอยู่ที่ 1 : 10 ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 72 h ซึ่งทำการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 4 h ความชื้นเริ่มต้นของข้าวอยู่ระหว่าง 38.8 - 40.7% wb จากนั้นนำมาผ่านการทำแห้งให้ความชื้นเหลืออยู่ที่ 12 - 14% wb ด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 50°C และเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบต ที่อุณหภูมิ 100 - 140°C โดยสภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งจะเริ่มที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 min จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C และลดอุณหภูมิเหลือ 45°C ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณสารกาบาอยู่ระหว่าง 24 - 50.28 mg/100 g นอกจากนี้ความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าอยู่ที่ 0.31 - 0.46 mg/g sample การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลได้มากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความแข็งและค่า adhesiveness ได้อีกด้วย

2.4.3 การใช้ความดันร่วมกับการเพาะงอกที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก

การใช้ความดันสูงในกระบวนการแปรรูปอาหาร เป็นกระบวนการที่ให้ความดันสูงแก่อาหารที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิห้อง ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการผ่านความดันให้แก่อาหาร เนื่องจากสะดวกและใช้ได้กับอาหาร นอกจากนี้ยังมีปริมาตรลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อให้ความดันสูงในช่วงที่ให้แก่อาหารและเก็บพลังงานไว้น้อยกว่ามากในขณะที่ให้ความดันจึงสามารถลดความเสี่ยงจากการระเบิดเนื่องจากการใช้แก๊สเป็นตัวกลางได้ กระบวนการใช้ความดันสูงในการแปรรูปอาหารเป็นกระบวนการแปรรูปที่ไม่ทำให้เกิดความร้อนหรืออาจจะเกิดได้น้อยมาก ซึ่งมีข้อดีเป็นผลทำให้คุณภาพอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและสามารถทำลายหรือยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิด

โรคและทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียได้ อีกทั้งยับยั้งเอนไซม์และผลิตอาหารที่มีคุณภาพสูงได้ จึงช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการและรสชาติที่มีความสดใหม่รวมถึงคงคุณภาพทางเนื้อสัมผัส อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการใช้ความดันสูงที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะขึ้นอยู่กับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ ซึ่งต้องมีการออกแบบให้สามารถทนความดันที่สูงมากและต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงต่อไป (Potakamury et al., 1995; Earnshaw, 1996; Farkas and Hoover, 2000; Barbosa-Canovas et al., 1998)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของการใช้ความดัน มีดังต่อไปนี้

จากการศึกษาของ Kim et al. (2017) ได้ทำการศึกษาผลของการเพาะงอกร่วมกับการใช้ความดันต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฟีนอลิกและวิตามินอี โดยทำการแช่ข้าวเปลือกที่อัตราส่วนข้าวต่อน้ำอยู่ที่ 1 : 5 ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 3 วัน ทำการเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 24 h จากนั้นข้าวถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 37°C ความชื้น 80%RH เป็นเวลา 2 วัน โดยใช้เครื่องเพาะงอก (Seed germinator) ในการควบคุมการเพาะงอก หลังการเพาะงอกข้าวเปลือกถูกนำมาบรรจุใส่ถุงอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 : 1 และปิดผนึกภายใต้สภาวะสุญญากาศ จากนั้นนำเข้าเครื่องความดัน 0.1, 10, 30, 50 และ 100 MPa (1, 100, 300, 500 และ 1000 bar) ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 h ผลการศึกษาพบว่า ความดันที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณฟีนอลิกและวิตามินอีมีค่ามากขึ้น โดยวิตามินอีมีค่าสูงที่สุดที่ความดัน 30 MPa ทั้งนี้วิตามินอีมีค่าเพิ่มขึ้นในระหว่างการเพาะงอกเนื่องจากการสังเคราะห์ tocopherol และ tocotrienol เพื่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งมีค่าวิตามินอีอยู่ที่ 0.53 mg/100 g อย่างไรก็ตามผลของการเพิ่มความดันสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน ซึ่งเกิดจากการทำลายเยื่อหุ้มชั้นใน (Inner membrane) ทำให้ตัวทำละลาย (Solvent) สามารถเข้าไปข้างในได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์ส่งผลทำให้ตัวทำละลายสามารถแทรกซึมจากภายนอกเข้าสู่ภายในได้ดี รวมถึงยังทำให้เอนไซม์ที่อยู่ภายในสามารถทำกิจกรรมได้มากขึ้น

Xia et al. (2018) ทำการประเมินผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกสูงร่วมกับการเพาะงอกต่อการใช้งานและคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยก่อนการเพาะงอกข้าวถูกนำมาปรับสภาพที่ความดันสูงด้วยการบรรจุข้าวในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำอยู่ที่ 2 : 1 จากนั้นปิดผนึกแล้วให้ความดันสูงที่ 50, 200 และ 350 MPa (500, 2000 และ 3500 bar) ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 20 h จากนั้นนำมาเพาะงอกภายในบริเวณที่ควบคุมแสงมืด ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 48 h และทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 h จนได้ความชื้นอยู่ที่ 12% ผลการศึกษาพบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่สูงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารอาหารและสามารถเพิ่มปริมาณสารกาบาโดยมีค่าสูงสุดที่ความดัน 50 MPa เนื่องจากความดันดังกล่าวสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะภายในเซลล์จากความเครียดที่มาจากความดัน เช่น การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน แคลเซียม และการถ่ายเทมวลของกรดกลูตามิก ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สารกาบา อย่างไรก็ตามความดันไม่มี

ผลต่ออัตราการเพาะงอกและความยาวของรากเมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอกที่ไม่ใช้ความดัน เนื่องจากความดันสูงเกินไปอาจไปรบกวนกิจกรรมต่าง ๆ ของเซลล์ เช่น gene expression วัฏจักรของเซลล์ และการสังเคราะห์ของเอนไซม์

Xia and Li (2018) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 30 และ 60 MPa (300 และ 600 bar) นาน 5 min ในการปรับสภาพข้าวกล้องก่อนการเพาะงอกทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 90 MPa มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงอย่างมาก การปรับสภาพข้าวด้วยความดันไฮโดรสแตติกก่อนนำไปผ่านกระบวนการเพาะงอก มีผลช่วยทำให้คุณภาพของข้าวกล้องงอกดีขึ้น ได้แก่ การเพิ่มปริมาณสารกาบา การเพิ่มความคงตัวของสี และไขมันระหว่างการเก็บรักษา การเพิ่มโครงสร้างแบบอสัณฐานให้กับสตาร์ชซึ่งทำให้ย่อยสลายได้ง่าย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเครียดจากความดันที่เมล็ดข้าวได้รับทำให้มีการปรับตัวและเกิดการสังเคราะห์สารทางชีวภาพและมีการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จากการวิเคราะห์ผล SEM แสดงให้เห็นว่า ความดันไฮโดรสแตติกทำให้สตาร์ชเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphization) ซึ่งทำให้ย่อยสลายด้วยเอนไซม์ได้ง่าย นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR พบว่าพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1046 cm^{-1} ลดลงหลังจากการเพาะงอกและความเข้มข้นของพีคที่ 1025 cm^{-1} เพิ่มสูงขึ้นหลังจากปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านการใช้ความดัน ซึ่งแสดงถึง การเพิ่มปริมาณโครงสร้างแบบอสัณฐานของสตาร์ชหลังจากการใช้ความดันไฮโดรสแตติก นอกจากนี้ปริมาณกรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิด ลดลงเมื่อข้าวนั้นได้ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกก่อนการเพาะงอกข้าว (300 – 900 bar นาน 5 min) ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวจากสภาวะเครียดจากความดันที่ได้รับก่อนการเพาะงอกมีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนระหว่างกระบวนการเพาะงอก

Wu et al. (2020) ได้ศึกษาการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวระดับความดันระหว่าง 0.1 – 500 MPa (1 – 5000 bar) ซึ่งพบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกไม่ส่งผลให้เกิดหมู่หน้าที่ (Functional group) ใหม่ของโมเลกุลในข้าว โดยมีพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เด่นชัดในเลขคลื่น 2925, 2855, 1653, 1540, 1081, 1022, และ 760 cm^{-1} ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของพีคเหล่านี้ลดลงแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัวของสตาร์ช นอกจากนี้พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 1652 และ 1545 cm^{-1} ลดลงหลังจากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกเช่นกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างแบบ β -sheet ของสายพอลิเพปไทด์ถูกทำลายไประหว่างการใช้ความดัน

Xia et al. (2018) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติก (50 – 350 MPa นาน 20 min) พบว่า ปริมาณปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้น 21.9 – 27.4% เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านการใช้ความดัน นอกจากนี้ผลของ FTIR แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของพีคการดูดกลืน

รังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1050 cm^{-1} ลดลงและความเข้มของพีค 1026 cm^{-1} ของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการใช้ความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline form) ของสตาร์ชเปลี่ยนไปเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous form) ระหว่างการเพาะงอกข้าว โดยความเข้มของพีค 1026 cm^{-1} เพิ่มขึ้นตามระดับความดันที่เพิ่มมากขึ้นด้วย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความดันไฮโดรสแตติกส่งเสริมการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชให้เป็นแบบอสัณฐาน นอกจากนี้การใช้ความดันไฮโดรสแตติกช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับข้าวกล้องงอกระหว่างการเก็บรักษาเนื่องจากลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดลง

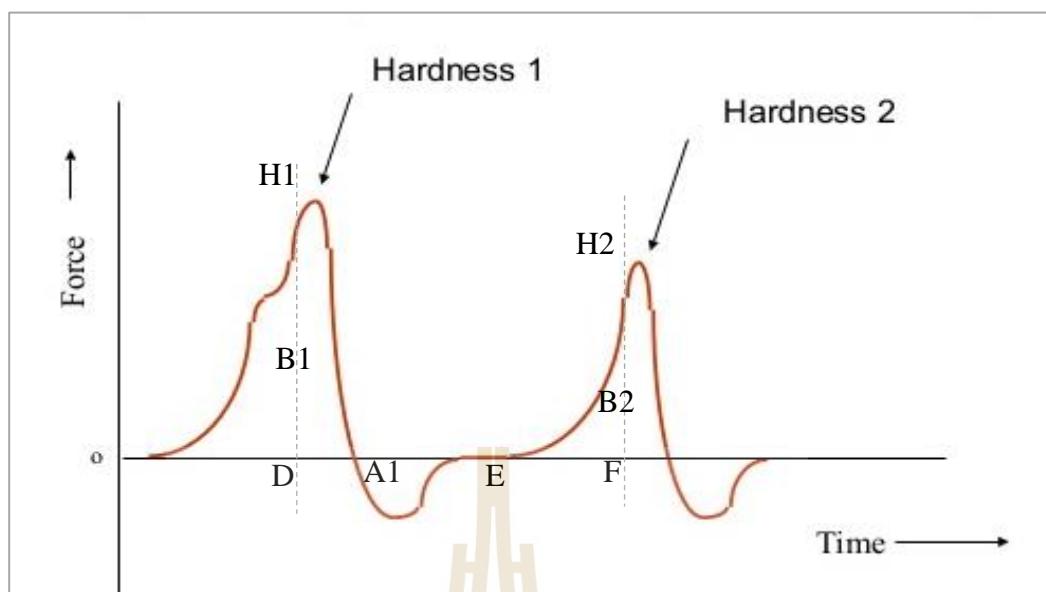
2.5 การทดสอบทางเนื้อสัมผัส (Texture analysis)

การทดสอบเนื้อสัมผัสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.5.1 การทดสอบเนื้อสัมผัสเชิงวัตถุ (Objective test)

การทดสอบเนื้อสัมผัสเชิงวัตถุ (Objective test) ใช้เครื่องมือ (Texture analyzer) ในการวัดค่าเนื้อสัมผัสอาหารโดยผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแรง เช่น แรงกด แรงเหวี่ยง แรงเจาะ แรงผลึก เป็นต้น การทดสอบที่ได้จึงไม่ขึ้นอยู่กับความรู้สึก ค่าที่ได้จึงมีความแม่นยำและสามารถควบคุมสภาวะการวัดได้ดี

Texture profile analysis (TPA) เป็นการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารแบบจำลองการเคี้ยวด้วยฟันกราม 2 ครั้ง โดยให้หัวกดตกลงบนอาหารในระยะที่กำหนด เช่น กำหนดเป็นระยะที่หัวกดตกลงตัวอย่างอาหาร หรือเปอร์เซ็นต์ความเครียด จากรูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA ที่จุด H1 มีแรงกระทำสูงสุดในการกดครั้งแรก เรียกว่าค่าความแข็งช่วงที่ 1 พื้นที่ใต้กราฟ A1 จะมีค่าแรงติดลบเนื่องจากเป็นช่วงการถดถอยของหัวโพรบคานี้เสมือนพลังงานในการดึงตัวอย่างอาหารออกจากหัวกด เรียกว่าค่าการยึดติด (Adhesiveness) ช่วง E-H2 เป็นช่วงการกดช่วงที่ 2 เปอร์เซ็นต์ค่าความเครียดที่อัตราส่วน E-H2 ต่อ C-D เรียกว่าค่าความตึง (Springiness) หรือ ค่าความยืดหยุ่นของตัวอย่างอาหาร (Elasticity) หากมีค่าอัตราส่วนเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวอย่างอาหารมีความตึง หรือความยืดหยุ่นสูง อัตราส่วนพื้นที่ B2 ต่อ B1 เรียกว่า ค่าความยึดตัวกันเอง (Cohesiveness) แสดงถึงความสามารถในการรักษาสภาพเดิมของตัวอย่างอาหารหลังถูกแรงกระทำไว้ได้ (ปานมนัส ศิริสมบูรณ์, 2555)



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA
(ที่มา : ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ (2555))

ตารางที่ 2.2 คำจำกัดความของเนื้อข้าวสุก

คำจำกัดความ	ความหมาย
ความแข็งหรือความกระด้าง (Hardness)	ปริมาณแรงที่ใช้ในการเคี้ยวข้าวสุกในช่วงครั้งแรก หรือบอกเป็นความนุ่ม
ความเหนียวติดกัน (Adhesiveness)	ปริมาณแรงที่ใช้ในการดึง แยก หรือการติดกันเองของข้าวสุก หรือขณะเคี้ยว หากข้าวสุกร่วน (ความเหนียวติดกันต่ำ)
ความยืดหยุ่น (Springiness)	หากความยืดหยุ่นสูงมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายยาง ความยืดหยุ่นต่ำพฤติกรรมคล้ายของไหลหนืด
ความเกาะติดกัน (Cohesiveness)	ความสามารถในการรักษาสภาพเดิมหลังการเคี้ยวไว้ได้ โดยลักษณะข้าวสุกละเอียดและ (ความเกาะติดกันต่ำ) ข้าวสุกนุ่ม (เกาะติดกันปานกลาง) และข้าวสุกแข็ง (ความเกาะติดกันน้อย)

2.5.2 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส (Sensory test)

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

วิธีทดสอบการยอมรับแบบ Hedonic scale (9-point hedonic scale) เป็นการประเมินการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค โดยมีคะแนนความชอบเป็นตัวเลขตั้งแต่ 1 – 9 โดยที่ 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด จนไปถึง 9 คือ ชอบมากที่สุด ที่แสดงถึงความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์โดยตรง (ปราณี อานเป็รื่อง, 2557)

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis)

การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์หรือการจำแนกทางเดียว (Completely Randomized Design, CRD หรือ One Way ANOVA)

การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) เป็นแผนการทดลองที่มีลักษณะที่ง่าย สะดวกในการปฏิบัติและวิเคราะห์ข้อมูล การทดลองแบบ CRD จึงเหมาะกับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอกันมาก ไม่มีความแตกต่างเนื่องจากอื่น ๆ ความแปรปรวนเกิดขึ้นเนื่องจากทรีตเมนต์เท่านั้น เป็นการแจกแจงปัจจัยความแปรปรวนในทิศทางเดียว ดังนั้นการทดลองแบบ CRD จะนิยมทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือเรือนทดลอง เพราะจะทำให้สามารถควบคุมความคาดเคลื่อนระหว่างทำการทดลองได้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียว (one way ANOVA) ถูกใช้สำหรับวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยระดับที่สนใจศึกษาของปัจจัยนี้เท่ากับ a ระดับ เพื่อดูว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนี้มีผลกระทบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร

2.6.1 ข้อดีและข้อเสียของการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

2.6.1.1 ข้อดี

1. จำนวนทรีตเมนต์และจำนวนซ้ำไม่จำกัด จำนวนซ้ำของแต่ละทรีตเมนต์ไม่จำเป็นต้องเท่ากัน
2. วิเคราะห์ผลสะดวกและง่าย แม้ในกรณีที่มีจำนวนซ้ำของแต่ละทรีตเมนต์ไม่เท่ากัน
3. เมื่อมีค่าสังเกตสูญหายไม่จำเป็นต้องประมาณค่าขึ้นแทน
4. ระดับขั้นความเป็นอิสระ (DF) ของความคลาดเคลื่อนของการทดลองสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแผนการทดลองแบบอื่น ทำให้ผลการทดลองมีความเที่ยงตรงสูง

2.6.1.2 ข้อเสีย

การหาสิ่งทดลองที่สม่ำเสมอทั้งการทดลองทำได้ค่อนข้างยาก ถ้าสิ่งทดลองไม่สม่ำเสมอซึ่งจะทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองถูกรวมอยู่ในความคลาดเคลื่อนของการทดลองด้วย ส่งผลให้การทดลองไม่น่าเชื่อถือ และขาดประสิทธิภาพอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของวัตถุดิบ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยซึ่งประกอบด้วย ชื่อ รุ่น และเงื่อนไขของการใช้งาน (Conditions of equipment) รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอก (Germinated paddy, GP) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) โดยวิธีดำเนินการวิจัยได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ (1) วัตถุดิบ (2) การศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก (3) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก และ (4) การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ค่าสี การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR ของ GBR รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกสุก (Cooked GBR) โดยรายละเอียดขั้นตอนแสดงดังต่อไปนี้

3.1 วัตถุดิบ (Raw material)

ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทำวิจัยเป็นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 12 – 18 เดือน จากอำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 – 14% (w.b.) ข้าวเปลือกถูกบรรจุในถุงปิดสนิทและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อรอการนำไปศึกษาต่อไป



รูปที่ 3.1 ลักษณะข้าวเปลือกหอมมะลิและการเก็บรักษาระหว่างการทำวิจัย

3.2 การศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างข้าวเปลือก

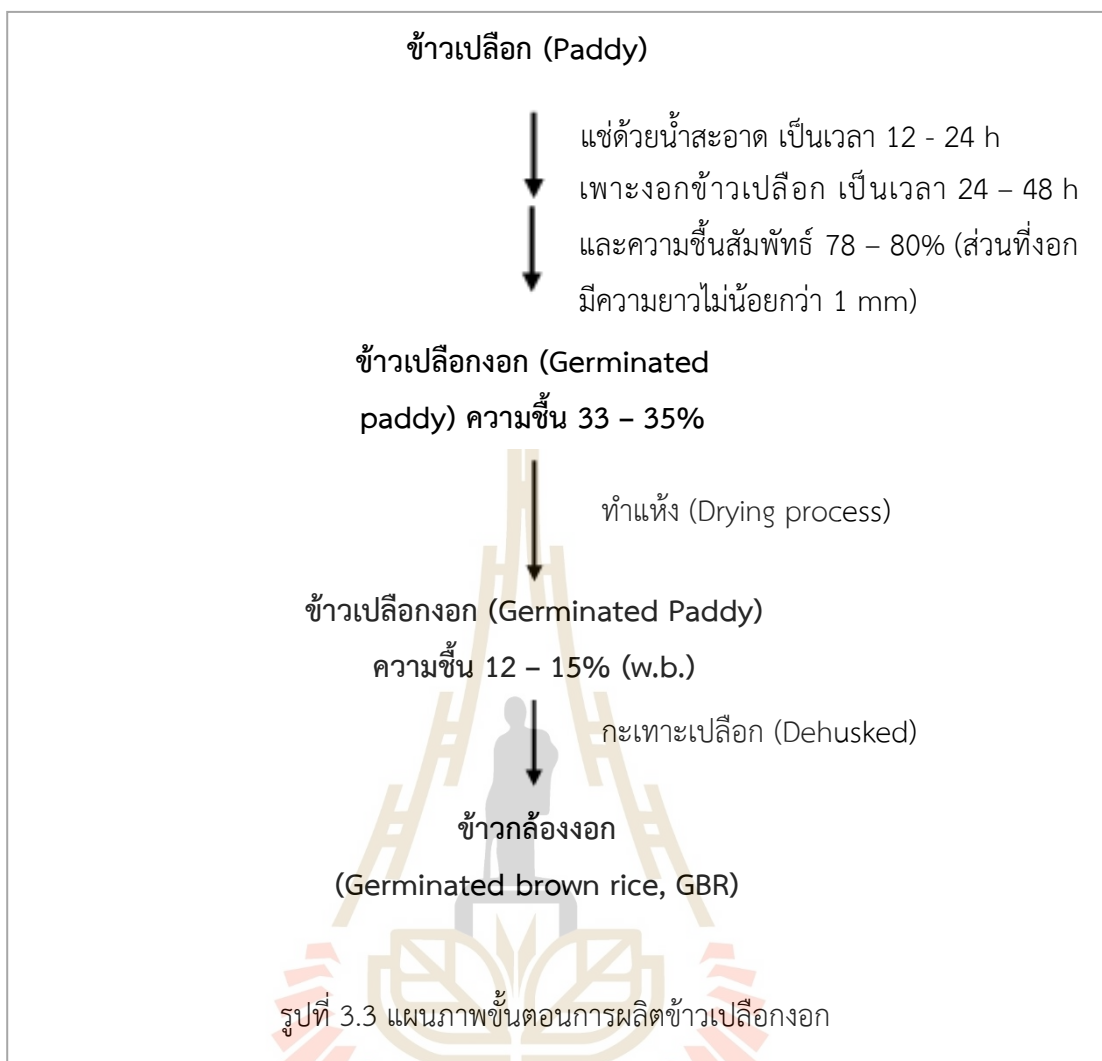
ข้าวเปลือก (ความชื้น 12 – 14% w.b.) ที่ผ่านการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมแล้วถูกนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำข้าวเปลือกมาแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) ที่ความเข้มข้น 0.1% (อัตราส่วนข้าวเปลือก 1 ส่วน : สารละลาย NaClO 2 ส่วน) เป็นเวลา 10 min และล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ที่อาจทำให้เกิดการหมักระหว่างการเพาะงอก โดยอ้างอิงวิธีการของ Chatchavanthatri et al. (2021) ก่อนการทำข้าวเปลือกงอกต่อไป โดยขั้นตอนการทำข้าวเปลือกงอก (Germinated paddy, GP) โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแช่ข้าวเปลือก (Soaking) การเพาะงอกข้าวเปลือก (Germinating) และการทำแห้งข้าวเปลือกงอก (Drying) จากนั้นนำข้าวเปลือกงอกมาเพาะเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) โดยวิธีการทำข้าวเปลือกงอกสามารถสรุปขั้นตอนในรูปที่ 3.3 และภาพการเตรียมและการเพาะงอกข้าวแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวก่อนขึ้นตอนเพาะงอก

3.2.2 การศึกษาผลของการนึ่งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ใช้วิธีการเพาะงอกข้าวเปลือก (Germination) โดยดัดแปลงวิธีการของ Hu et al. (2017) กล่าวคือ นำข้าวเปลือกที่ผ่านการล้างทำความสะอาดจากหัวข้อ 3.3.1 ปริมาณ 5 kg มาแช่ในน้ำสะอาดในภาชนะปิดด้วยอัตราส่วนข้าวเปลือกต่อน้ำสะอาดเท่ากับ 1 : 2 เป็นเวลานาน 24 h โดยควบคุมอุณหภูมิที่ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ จากนั้นนำข้าวเปลือกมาเพาะงอกต่อที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นาน 48 h ในภาชนะปิด (มิด) และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระหว่าง 78 – 80% โดยการพรมน้ำสะอาดทุก ๆ 3 – 4 h ซึ่งข้าวเปลือกงอกควรมีรากงอกออกจากเมล็ดที่ความยาวมากกว่า 1 mm (Umnajkitikorn et al., 2013) จากนั้นข้าวเปลือกงอกถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ข้าวเปลือกงอกรอนำไปทำแห้งโดยไม่ผ่านการนึ่ง (Non-parboiling) สำหรับส่วนที่ 2 ข้าวเปลือกงอกถูกนำมานึ่งด้วยไอน้ำร้อนเป็นเวลา 15 นาที (Parboiling) จากนั้นนำไปทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยวิธีการทำแห้งต่าง ๆ (รูปที่ 3.5) ซึ่งอธิบายในหัวข้อ 3.2.3



3.2.3 การศึกษาผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

จากหัวข้อ 3.2.2 ข้าวเปลือกงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งและข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการนึ่งถูกนำมาทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด (Sun drying, S) การใช้ตู้อบลมร้อน (Hot-air oven drying, O) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying, I) เพื่อให้ข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 - 14% (w.b.) การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดดและการใช้ตู้อบลมร้อนนั้น ข้าวเปลือกงอกถูกนำมาวางในถาดอลูมิเนียมขนาดกว้างและยาวเท่ากับ 34 cm และ 48 cm ตามลำดับ และกระจายข้าวเปลือกงอกให้มีความหนาประมาณ 1.5 cm ในการทำแห้งด้วยการตากแดดนั้น นำถาดที่ใส่ข้าวเปลือกงอกไปตากแดดบริเวณโล่งแจ้งในเวลากลางวัน ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย $33.75 \pm 1.32^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง $55.52 \pm 4.11\%$ นานจนกว่าข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 - 14% (w.b.) โดยใช้เครื่องวัดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกและธัญพืช (Grain moisture meter, SB900, Steinlite Corporation, Atchison, Kansas, USA)

การใช้ตู้อบลมร้อนในการทำแห้งข้าวเปลือกงอก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตู้อบลมร้อน (Universal oven, UF110, Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach, Germany) ที่อุณหภูมิ 80°C และอัตราเร็วของลมร้อนอยู่ที่ 1.60 ± 0.14 m/s พร้อมเปิดที่ระบายอากาศด้านหลังตู้ ในระหว่างการทำให้แห้งสามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ได้ $54.50 \pm 2.66\%$ ทั้งนี้ระยะเวลาการทำแห้งอยู่ระหว่าง 3.5 – 4.0 h จนกว่าข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 – 14% (w.b.) (รูปที่ 3.5)

การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรดได้ใช้เครื่องทำแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี (Infrared radial radiation dryer with continuous flow) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (Saelim, 2017) โดยกำหนดให้อัตราไหลของชั้นข้าวเปลือกงอกอยู่ที่ 1.875 kg/min อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 1.075 m³/min และอุณหภูมิระหว่างทำแห้งอยู่ที่ $80 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ระยะเวลาการทำแห้งอยู่ 60 ± 10 min ซึ่งทำให้ได้ข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 – 14% (w.b.)

ข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการเพาะงอกและข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยวิธีการทั้ง 3 วิธีข้างต้น ได้ถูกนำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก (NW 150, Natrawee, Thailand) เพื่อให้ได้ข้าวกล้องธรรมชาติ (Brown rice, BR) และข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) โดยข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งและถูกทำให้แห้งด้วยการตากแดด การใช้ตู้อบลมร้อน และการใช้รังสีอินฟราเรด สามารถเขียนรหัสชื่อตัวอย่างคือ GBR-S, GBR-O และ GBR-I ตามลำดับ ส่วนข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่งและถูกทำให้แห้งด้วยการตากแดด การใช้ตู้อบลมร้อน และการใช้รังสีอินฟราเรด สามารถเขียนรหัสชื่อตัวอย่างคือ PGBR-S, PGBR-O และ PGBR-I ตามลำดับ รูปที่ 3.7 ได้สรุปภาพรวมของวิธีการศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำให้แห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก ทั้งนี้รายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกแสดงในหัวข้อที่ 3.4 ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR ของ GBR รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกสุก (Cooked GBR)

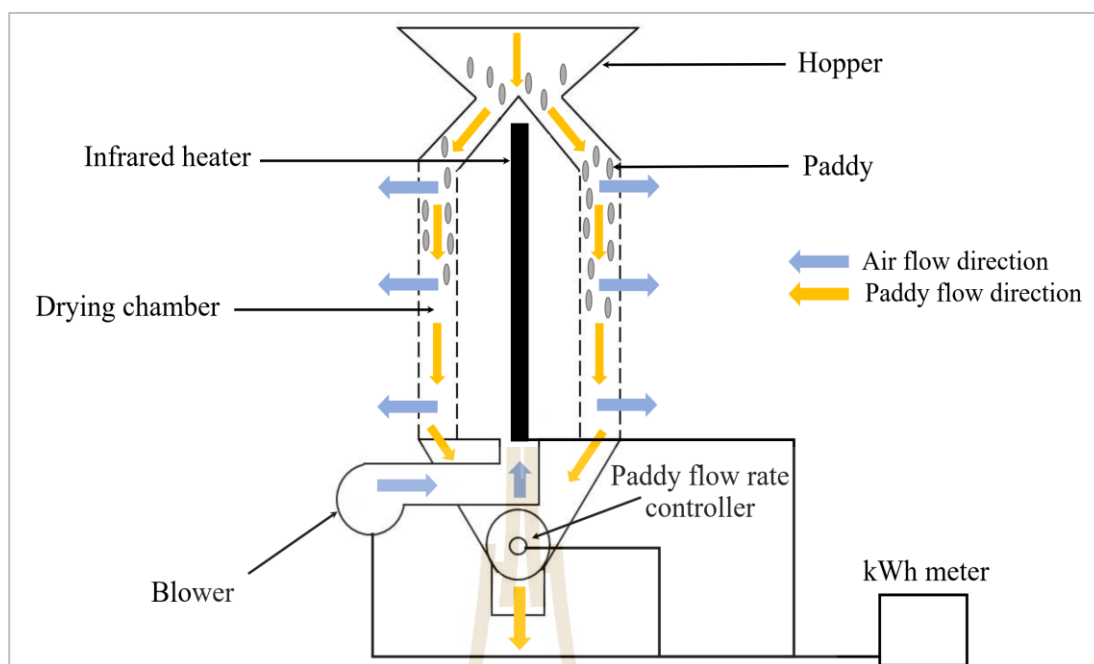


รูปที่ 3.4 แสดงภาพการเตรียมข้าวและการเพาะงอกข้าวเปลือก



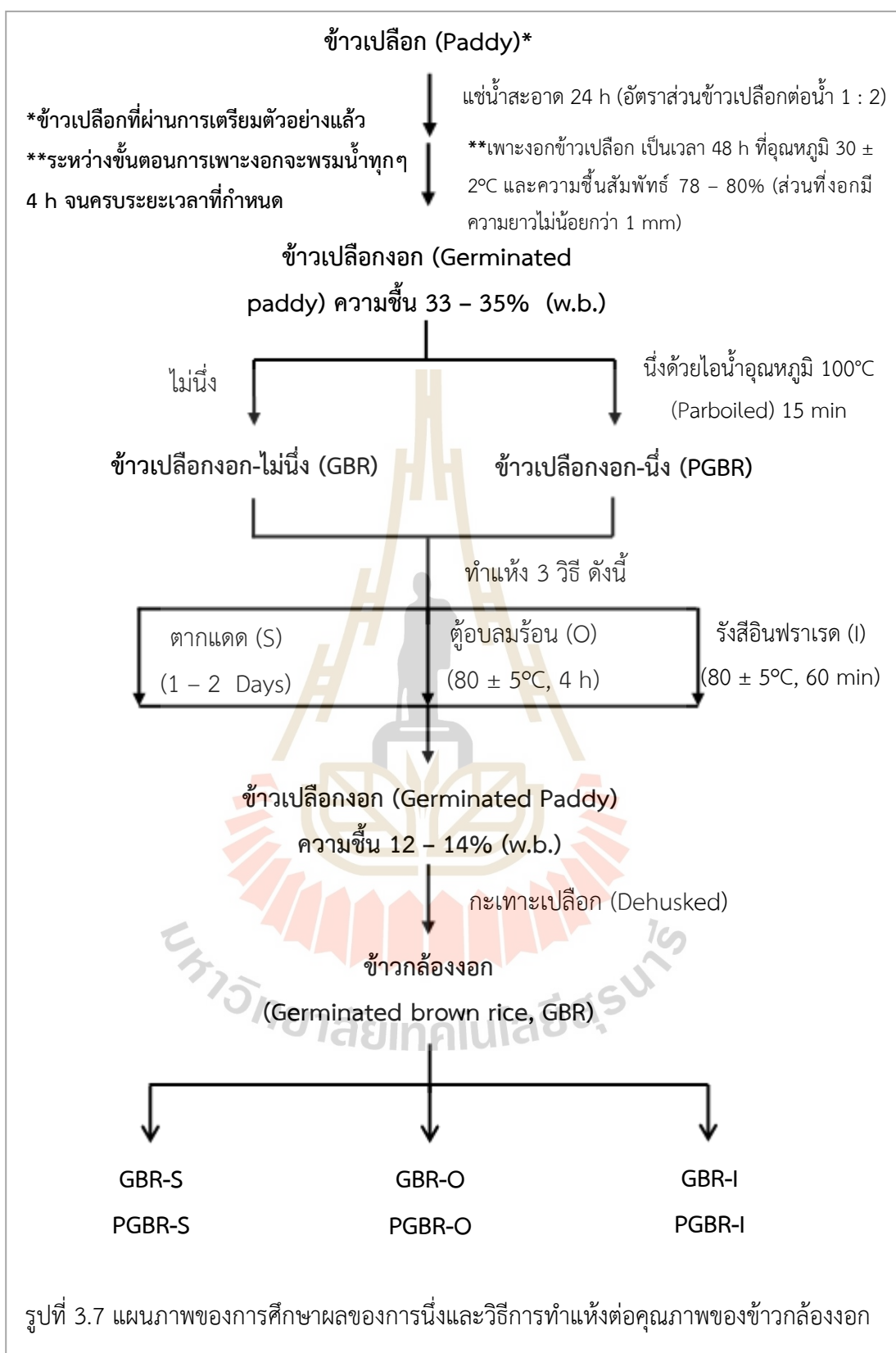


รูปที่ 3.5 แสดงภาพการนึ่งข้าวเปลือกงอก การทำแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ และเครื่องกะเทาะเปลือก



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพของเครื่องทำแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี (Chatchavanthatri et al., 2021)





3.3 การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) การศึกษาผลของสภาวะการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก (2) การศึกษาผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก และ (3) การศึกษาผลของการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยได้แสดงรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

3.3.1 การศึกษาสภาวะการแช่และการเพาะงอกที่มีผลต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก

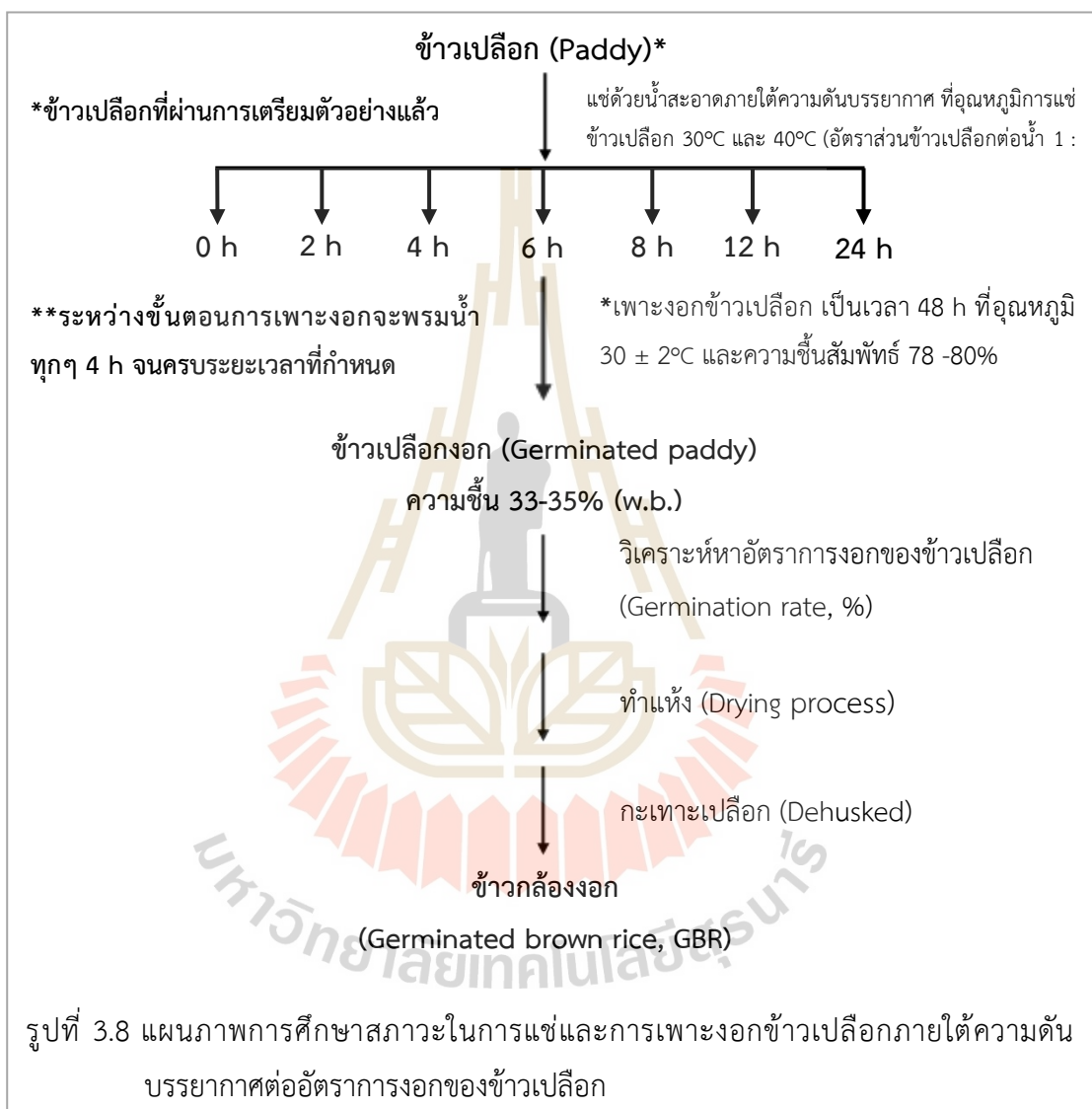
การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อนี้ ได้ศึกษาผลของสภาวะในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยได้ตัดแปลงจากวิธีของ Zhang et al. (2018); Hu et al. (2017) และ Sirisoontaralak et al. (2015) โดยนำข้าวเปลือกที่ผ่านการล้างทำความสะอาดดี รายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.1 มาแช่น้ำภายใต้ความดันบรรยากาศในภาชนะปิดสนิท สภาวะในการแช่ข้าวเปลือกได้แก่ อุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ 30°C และ 40°C ระยะเวลาในการแช่ข้าว นาน 0 – 24 h ด้วยอัตราส่วนข้าวเปลือกต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 3 จากนั้นนำข้าวเปลือกมาเพาะงอกภายใต้ความดันบรรยากาศในภาชนะปิดสนิทที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 48 h โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระหว่าง 78 – 80% ด้วยการพรมน้ำสะอาดทุก 3 – 4 h จากนั้นข้าวเปลือกงอกถูกนำมาวิเคราะห์หาอัตราการงอก (หัวข้อ 3.4.1.1) และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดจนข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 – 14% (w.b.) ก่อนนำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก (NW 150, Natrawee, Thailand) เพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) ทั้งนี้รูปที่ 3.8 ได้สรุปภาพรวมของวิธีการศึกษาสภาวะในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก

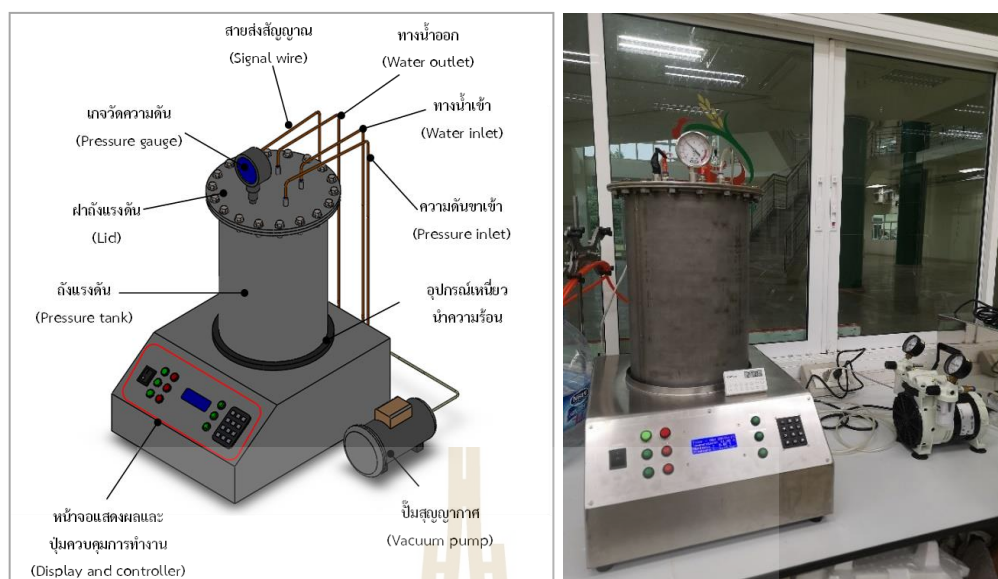
3.3.2 การศึกษาผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก

3.3.2.1 สภาวะการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่มีผลต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาการใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือกเพื่อกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือก โดยใช้ชุดถึงความดันแบบซึ่งแสดงในรูปที่ 3.9 การศึกษาได้เริ่มจากการนำข้าวเปลือกที่ผ่านการล้างทำความสะอาดดี รายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.1 มาแช่น้ำภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar เป็นเวลา 0 – 3 h ที่อุณหภูมิ 30°C จากนั้นนำข้าวเปลือกไปเพาะงอกต่อที่อุณหภูมิ 30°C นาน 24 – 60 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ h โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระหว่าง 78 – 80% ด้วยการพรมน้ำสะอาดทุก 3 – 4 h จากนั้นข้าวเปลือกงอกถูกนำมาวิเคราะห์หาอัตราการงอก (หัวข้อ 3.4.1.1) และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดจนข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 – 14% (w.b.) ก่อนนำมากะเทาะเปลือกด้วย

เครื่องกะเทาะเปลือก (NW 150, Natrawee, Thailand) เพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) โดยรูปที่ 3.10 แสดงการดำเนินงานวิจัยในการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก และรูปที่ 3.11 แสดงการสรุปภาพรวมของการศึกษาการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก

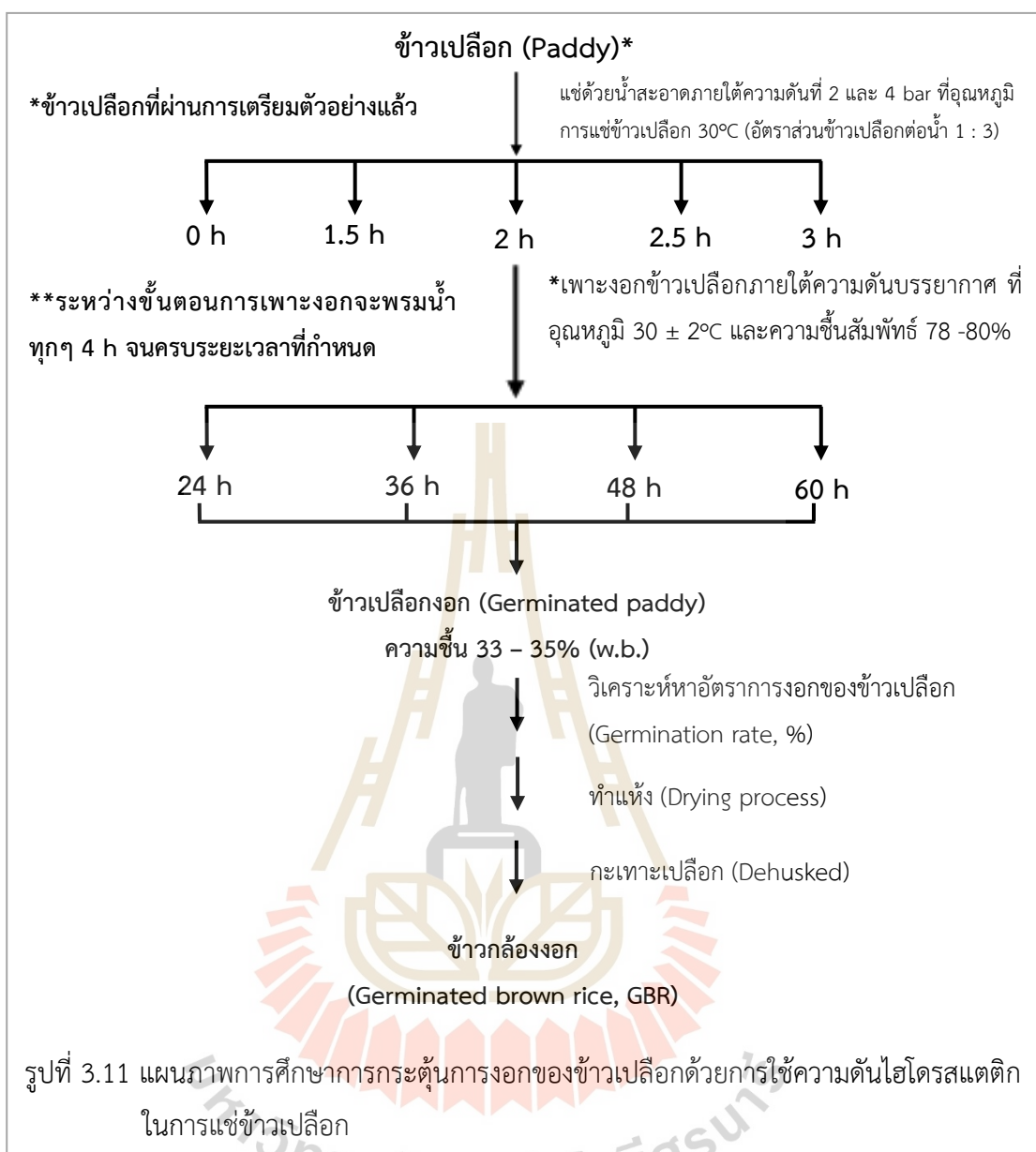




รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบของชุดถังความดันแบบที่ทำงานภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติก



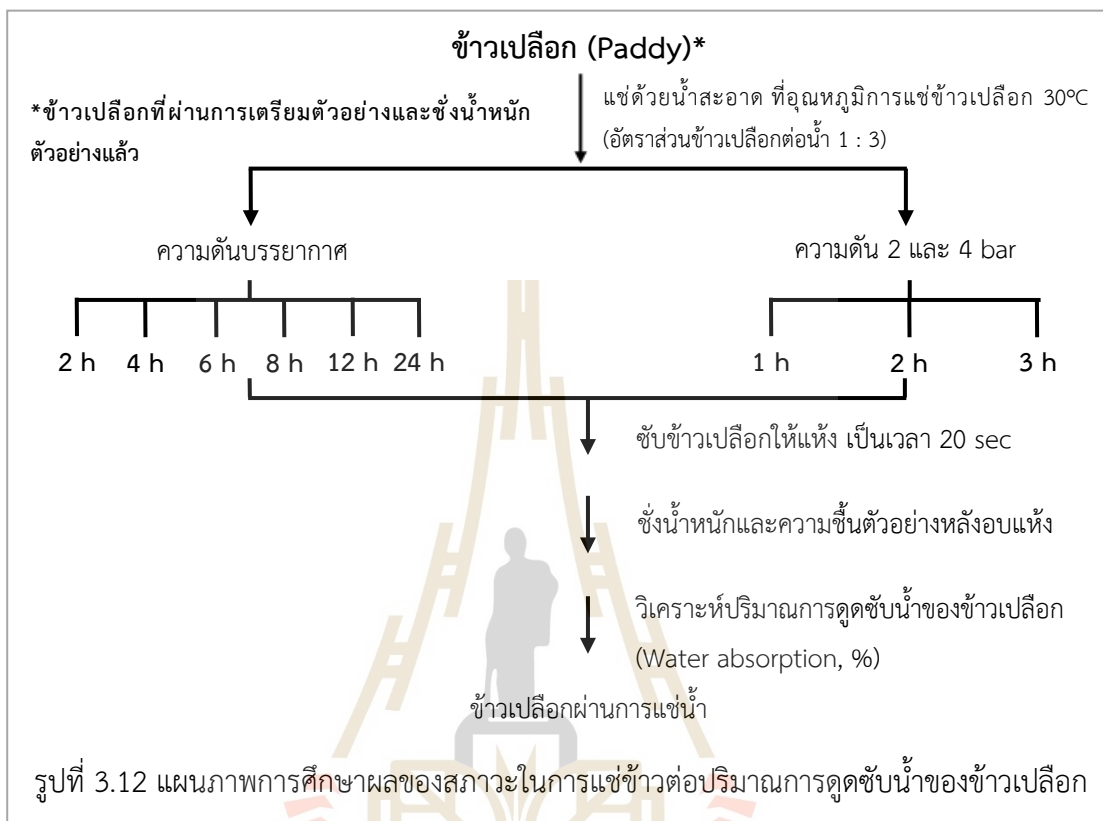
รูปที่ 3.10 ภาพการดำเนินงานวิจัยในการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก



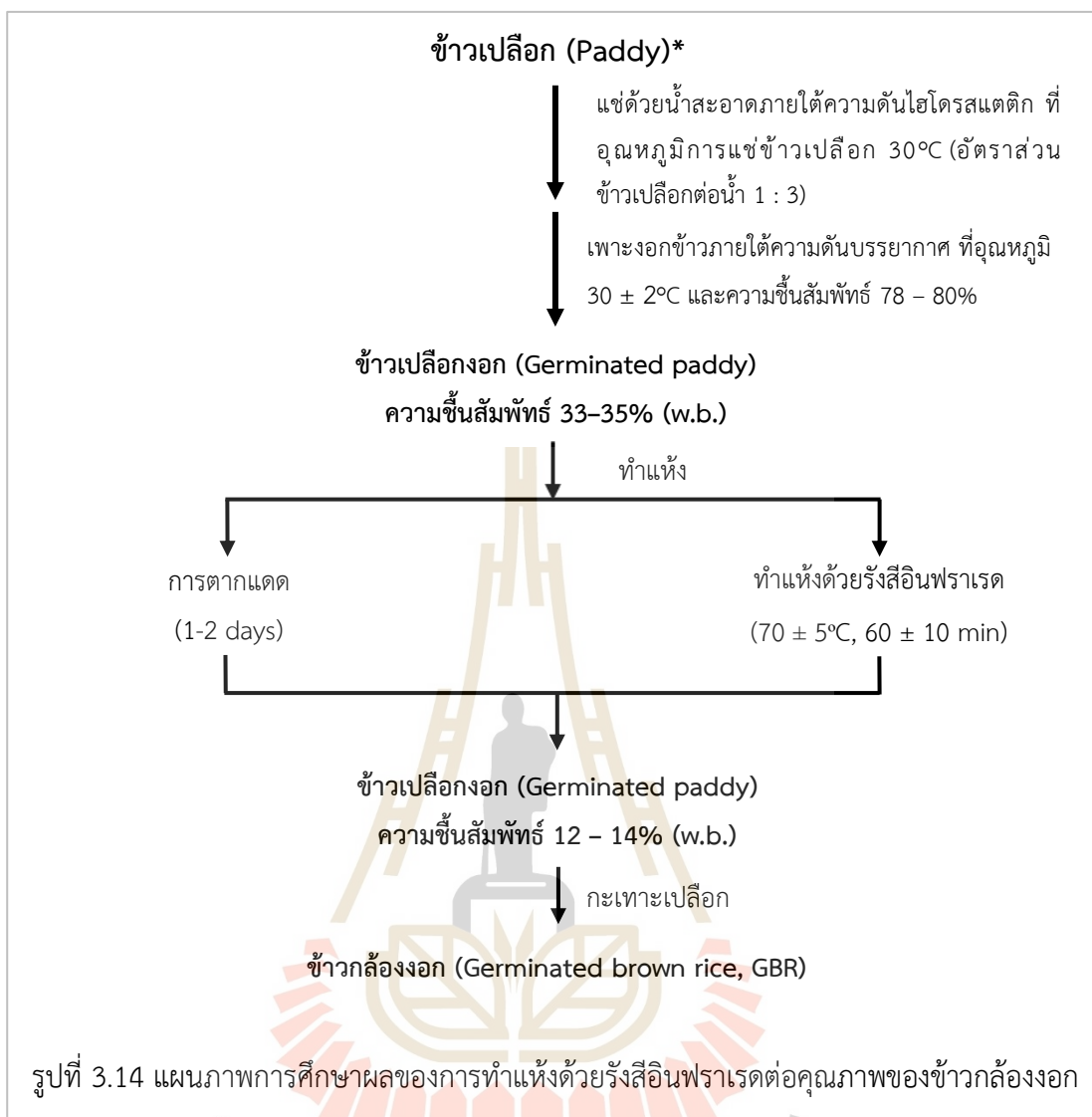
3.3.2.2 ผลของสภาวะในการแช่ต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก

หัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการแช่ต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก โดยได้แบ่งสภาวะในการแช่ข้าวออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ และ (2) การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar โดยระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศนาน 2 – 24 h ที่อุณหภูมิ 30°C และระยะเวลาในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar นาน 1 – 3 h ที่อุณหภูมิ 30°C จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกโดยดัดแปลงวิธีการศึกษาจาก Shittu et al. (2012) โดยรูปที่ 3.12 แสดงการสรุปภาพรวมของการศึกษา

ผลของสภาวะในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก และรูปที่ 3.13 แสดงการดำเนินงานวิจัยในการศึกษาสภาวะในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก



รูปที่ 3.13 ภาพการศึกษาสภาวะในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก



3.3.3 การศึกษาผลของการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยเปรียบเทียบการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (Sun drying) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying, IR) (รูปที่ 3.14) ทั้งนี้การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรดได้ใช้เครื่องทำแห้งข้าวเปลือกแบบไหลต่อเนื่องด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดในแนวรัศมี (Infrared radial radiation dryer with continuous flow) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยกำหนดให้อัตราไหลของชั้นข้าวเปลือกงอกอยู่ที่ 1.875 kg/min อัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 1.075 m³/min และอุณหภูมิระหว่างทำแห้งอยู่ที่ 70 ± 5°C ทั้งนี้ระยะเวลาการทำแห้งอยู่ที่ 60 ± 10 min ซึ่งทำให้ได้ข้าวเปลือกงอกมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 12 – 14% (w.b.) ก่อนนำมากะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก (NW 150, Natrawee, Thailand) เพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice,

GBR) การเปรียบเทียบคุณภาพของ GBR ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี และเนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM ดังแสดงรายละเอียดวิธีวิเคราะห์ในหัวข้อ 3.4

3.4 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี เนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM โดยแสดงรายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอก

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอก ประกอบด้วย การวิเคราะห์หาอัตราการงอกของข้าวเปลือก ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ปริมาณข้าวต้น และปริมาณรอยร้าว โดยแสดงภาพการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 3.14 และแสดงวิธีการวิเคราะห์รวมถึงสามารถอธิบายวิธีการวิจัยได้ต่อไปนี้

3.4.1.1 การคำนวณอัตราการงอกของข้าวเปลือก (Germination rate, %)

การหาอัตราการงอกของข้าวเปลือกงอกได้ดัดแปลงวิธีจาก Moonngarm and Saetung (2010) โดยหลังจากการเพาะงอกตามระยะเวลาที่กำหนด ได้สูมนำเมล็ดข้าวเปลือกออกมาประมาณ 200 – 300 เมล็ด แล้วนับจำนวนเมล็ดที่พบการงอก ดังแสดงลักษณะของข้าวเปลือกงอกในรูปแบบที่ 3.15 แล้วนำมาคำนวณหาอัตราการงอกตามวิธีการคำนวณของ Ding et al. (2018) ดังสมการที่ 3.1 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 6 ซ้ำ

$$\text{อัตราการงอกของข้าวเปลือก (\%)} = \frac{\text{number of seeds germinated}}{\text{number of seeds in total}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.4.1.2 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ข้าวต้น (Head rice yield, HRY) และรอยร้าว (Fissured grain, FG) ของข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้องงอกถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณผลผลิตทั้งหมด ข้าวต้น และรอยร้าวบนผิวข้าวตามวิธีการของ Chatchavanthatri et al. (2021) โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้

- ปริมาณผลผลิตทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ใช้ทำข้าวเปลือกงอกและน้ำหนักข้าวกล้องงอกหลังกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือกข้าว (Rice dehuller, NW 150, Natrawee, Thailand) ดังแสดงในสมการที่ 3.2 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

$$\text{ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้องงอกหลังกะเทาะเปลือก (g)}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้นของข้าวเปลือก (g)}} \times 100 \quad (3.2)$$

- ปริมาณข้าวเมล็ดเต็มสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักข้าวเปลือกงอกหลังการทำแห้งและน้ำหนักข้าวกล้องงอกหลังจากการคัดแยกเมล็ดเต็มด้วยเครื่องคัดแยกเมล็ดข้าวหัก (Rice sorting machine, TV-02, Natrawee, Thailand) ดังแสดงในสมการที่ 3.3 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

$$\text{ปริมาณเมล็ดเต็ม (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวกล้องงอกส่วนที่เป็นเมล็ดเต็ม (g)}}{\text{น้ำหนักข้าวเปลือกงอกหลังทำแห้ง (g)}} \times 100 \quad (3.3)$$

- ปริมาณรอยร้าวในข้าวสามารถหาได้โดยทำการสุ่มตัวอย่างข้าวมา 100 เมล็ด จากนั้นทำการหารอยแตกตามแนวขวางและยาวของเมล็ดข้าวภายใต้แสงไฟ จากนั้นนำมาคำนวณปริมาณรอยร้าว (%) โดยการเทียบปริมาณรอยร้าวของเมล็ดข้าวกล้องงอกกับปริมาณข้าวกล้องงอกทั้งหมด โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ



รูปที่ 3.15 ภาพการวิเคราะห์สมบัติกายภาพของข้าวกล้องงอก

3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก

3.4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition analysis)

นำข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (GBR) ที่ผ่านการบดลดขนาด (<0.2 mm) มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ประกอบด้วยความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า โยอาหาร ตามวิธีการของ AOAC (2000) และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตดังสมการที่ 3.4 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 – 5 ซ้ำ และสรุปภาพการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแสดงในรูปที่ 3.16

$$\text{Total carbohydrate (\% d.b.)} = 100\% - \text{protein content (\%d.b.)} - \text{lipid content (\%d.b.)} - \text{ash content (\% d.b.)} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.16 ภาพการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก

3.4.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก ได้แก่ ปริมาณสารกาบา (GABA), α -Tocopherol, สารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol), ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds, TPC) และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา

ข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (GBR) ที่บดลดขนาด (<0.2 mm) ถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสารกาบาโดยใช้การวิเคราะห์ 2 วิธี คือ (1) วิเคราะห์หาสารกาบาด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC 1290, Agilent Technology, Santa Clara, USA) ตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021) และวิเคราะห์หาสารกาบาด้วยการใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-spectrophotometer) โดยดัดแปลงวิธีการของ Cheevitsopon and Noomhorm (2015)

(1) วิเคราะห์หาสารกาบาด้วยเครื่อง HPLC

การผสมข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกบดละเอียดปริมาณ 0.5 g กับ Deionized water (DI) ปริมาณ 2 mL นาน 5 นาที แล้วกรองแยกของแข็งและสารสกัดออก จากนั้นนำสารสกัดมาผสมกับสารละลาย Sodium bicarbonate (NaHCO_3) ที่ความเข้มข้น 0.4 M ปริมาณ 200 μL และสารละลาย 4-dimethylaminoazobenzene-4-sulfonyl chloride (Dabsyl chloride) ที่ความเข้มข้น 6 mM ปริมาณ 400 μL แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 20 min จากนั้นกรองด้วย 0.2 μm Nylon membrane ก่อนนำไปวิเคราะห์หาสารกาบาด้วยเครื่อง HPLC ตามวิธีการของ Yongsawatdigul et al. (2007) โดยใช้ Poroshell 120 EC-C18 column (2.7 μm , 4.6 \times 50 mm, Agilent) และ Diode-array ultraviolet (UV)/visible spectrum detector (DAD) โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ

(2) วิเคราะห์หาสารกาบาด้วยการใช้เครื่องวัดการดูดกลืน

- การสกัดสารจากข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

ข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอกที่บดลดขนาด (<0.2 mm) แล้วถูกนำมาสกัดด้วยเอทานอลที่ความเข้มข้น 80% (อัตราส่วนของข้าวต่อเอทานอลเท่ากับ 1 : 4) โดยนำมาผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสารละลาย (Vortex mixer, Genie 2, Scientific Industries, Inc., New York, USA) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 min จากนั้นนำมาแยกตะกอนและของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Centrifuge, Legend XTR, Thermo scientific, USA) ที่อุณหภูมิ 4°C ความเร็วรอบ 10,000 rpm เป็นเวลา 5 min จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลวทำการระเหยด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator, Cole parmer, Antylia Scientific,

USA) ที่อุณหภูมิ 50°C ก่อนทำการ Resuspension ด้วยน้ำกลั่น และนำมาบ่มโดยใช้เครื่องบ่มเชื้อแบบเขย่า (Shaking incubator, KS4000i control, IKA®-Werke GmbH & Co. KG., Germany) ก่อนนำของเหลวมากรองผ่าน Syringe filter ขนาด 0.22 μm เพื่อบรรจุใส่ภาชนะกันแสงและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C สำหรับรอการวิเคราะห์ขั้นตอนต่อไป

- การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา

สารสกัดข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกและสารละลายมาตรฐานกาบา (GABA) ปริมาตร 0.6 mL ถูกเติมด้วยสารละลาย Borate buffer (ความเข้มข้น 0.2M) ปริมาตร 0.4 mL และสารละลาย Phenol (ความเข้มข้น 6%) ปริมาตร 2 mL ก่อนนำมาผสมให้เข้ากันอย่างดีในอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 min แล้วเติมสารละลาย Sodium hypochlorite (NaClO) (ความเข้มข้น 7.5%) ปริมาตร 0.8 mL จากนั้นให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน (Hot plate stirrer, C-MAG HS 7, IKA®-Werke GmbH & Co. KG., Germany) ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 min และรอให้ตัวอย่างเย็นตัวเพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 nm ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-spectrophotometer) (U-2900, Hitachi, Japan) ปริมาณสารกาบาหาได้จากการนำค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกาบา (GABA) ปริมาณที่ได้แสดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 100 g (mg/100 g sample) โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 – 5 ซ้ำ โดยรูปที่ 3.17 แสดงภาพรวมของการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา (GABA) ของข้าวกล้องงอก





รูปที่ 3.17 ภาพการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา (GABA) ของข้าวกล้องงอก

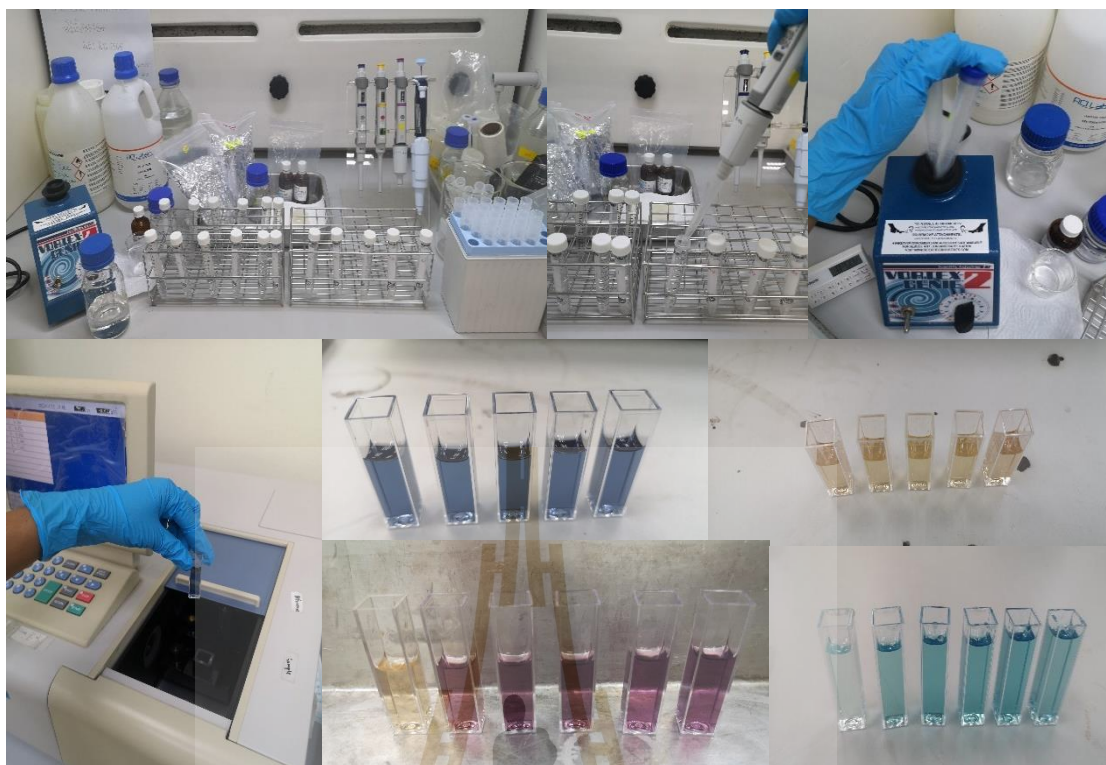
- การวิเคราะห์ปริมาณสาร α -Tocopherol

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาปริมาณ α -Tocopherol ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกที่ผ่านการบดลดขนาด (<0.2 mm) ตามวิธีการของ Chatchavanthatri et al. (2021) โดยนำตัวอย่างข้าว 100 mg ผสมกับไอโซโพรพานอล (99%) 2 mL จากนั้นนำมาสกัดด้วยเครื่องเขย่าสารละลาย (Vortex mixer, Genie 2, Scientific Industries, Inc., New York, USA) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 min ก่อนนำมาแยกตะกอนและของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (centrifuge, Legend XTR, Thermo scientific, USA) ที่อุณหภูมิ 4°C ความเร็วรอบ 5,000 rpm เป็นเวลา 10 min และนำส่วนที่เป็นของเหลวมากรองผ่าน Syringe filter ขนาด 0.22 μ m ก่อนนำสารสกัดมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC 1290, Agilent Technology, Santa Clara, USA) ปริมาณที่ได้แสดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 100 g (mg/100 g sample) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 2 ซ้ำ



รูปที่ 3.18 ภาพการสกัดตัวอย่างข้าวสำหรับการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ





รูปที่ 3.19 ภาพการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

- การวิเคราะห์ปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol)

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์หาปริมาณ γ -Oryzanol ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกที่ผ่านการบดลดขนาด (<0.2 mm) ตามวิธีการของ Chatchavanthatri et al. (2021) โดยตัวอย่างข้าวมีขนาดน้อยกว่า 0.2 mm ถูกนำมาสกัดด้วยสารเมทานอล (99%) โดยใช้ตัวอย่างข้าว 100 mg ผสมกับเมทานอล 2 mL จากนั้นนำมาสกัดด้วยการบ่มด้วยเครื่องบ่มเชื้อแบบเขย่า (shaking incubator, KS4000 I control, IKA® Werke GmbH & Co. KG, Germany) ที่อุณหภูมิห้อง ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 5 min จากนั้นนำมาแยกตะกอนและของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Centrifuge, Legend XTR, Thermo scientific, USA) ที่อุณหภูมิ 4°C ความเร็วรอบ 5,000 rpm เป็นเวลา 10 min จากนั้นนำส่วนที่เป็นของเหลวมากรองผ่าน Syringe filter ขนาด 0.22 μ m เพื่อบรรจุใส่ภาชนะกันแสงและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C สำหรับการวิเคราะห์ขั้นต่อไป โดยในรูปที่ 3.18 แสดงภาพการสกัดตัวอย่างข้าวสำหรับการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

สารสกัดและสารละลายมาตรฐาน γ -Oryzanol ถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณแกมมา-โอไรซานอลด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 314 nm ด้วยเครื่องวัด

การดูดกลืนแสง (UV-spectrophotometer) (U-2900, Hitachi, Japan) ปริมาณ γ -Oryzanol ได้จากการนำค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลาย γ -Oryzanol ปริมาณที่ได้แสดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 100 g (mg/100 g sample) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 – 5 ซ้ำ

- การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compound, TPC)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดโดยวิธี Folin-Ciocalteu Colorimetric ตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021) โดยนำสารสกัดที่ได้จากการสกัดในหัวข้อการวิเคราะห์ปริมาณ γ -Oryzanol และสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) ปริมาตร 250 μ L เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent 250 μ L ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 6 min จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่ความเข้มข้น 7% ปริมาตร 2.5 mL ผสมสารละลายให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 90 min จากนั้นนำตัวอย่างมาแยกตะกอนและของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงชนิดควบคุมอุณหภูมิ (Centrifuge, Legend XTR, Thermo scientific, USA) ที่อุณหภูมิ 25°C ความเร็วรอบ 5000 rpm เป็นเวลา 10 min และนำส่วนที่เป็นของเหลวมากรองผ่าน Syringe filter ขนาด 0.45 μ m ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 nm ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-spectrophotometer) (U-2900, Hitachi, Japan) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดหาได้จากการนำค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก (Gallic acid) ปริมาณที่ได้แสดงในหน่วยมิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 1 g (mg gallic acid/g sample) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ โดยในรูปที่ 3.19 ภาพการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง

- การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH

การวิเคราะห์ความสามารถในด้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH radical scavenging activity assay) ตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021) โดยนำสารสกัดที่ได้จากการสกัดในหัวข้อการวิเคราะห์ปริมาณ γ -Oryzanol และสารละลายมาตรฐาน Trolox ปริมาตร 0.1 mL มาผสมกับสารละลาย DPPH ที่ความเข้มข้น 0.1 mM ปริมาตร 2.9 mL จากนั้นนำมาเขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 min ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm โดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer) (U2900, Hitachi, Japan) และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณจากกราฟสารละลายมาตรฐานในหน่วยของมิลลิกรัมของ Trolox ต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 1 g (mg Trolox / g sample) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

- การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS

การวิเคราะห์ความสามารถในต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS radical scavenging activity assay) ตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021) เป็นการทดสอบโดยใช้สารละลาย ABTS^{•+} reagent ซึ่งทำการเตรียมสารละลาย ABTS ในน้ำกลั่น ที่ความเข้มข้น 7 mM ปริมาณ 15 mL ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (K₂S₂O₈) ที่ความเข้มข้น 140 mM ปริมาตร 264 µL แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 12 – 16 h โดยที่ก่อนนำไปใช้ให้เจือจางสารละลาย ABTS^{•+} reagent ที่เตรียมไว้ด้วยเมทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm เท่ากับ 0.70 ± 0.02

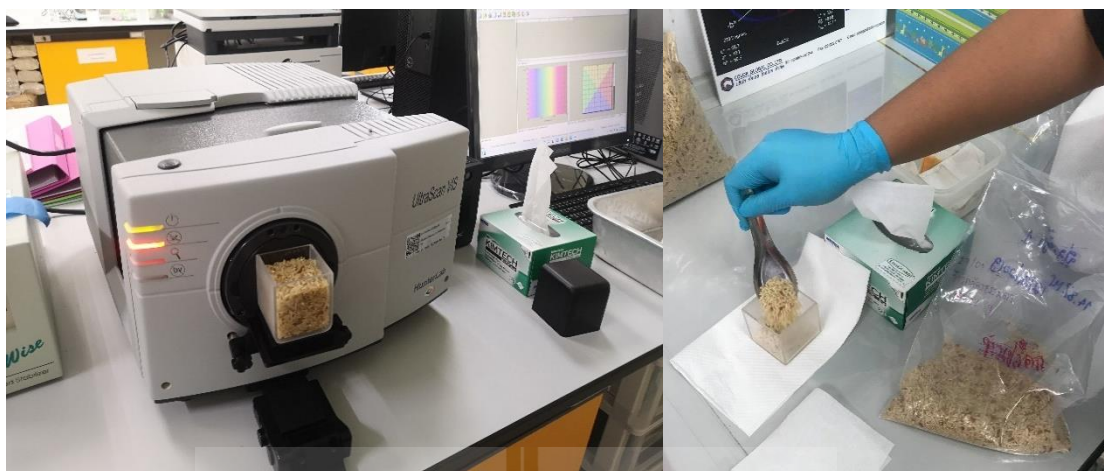
จากนั้นนำสารสกัดที่ได้จากการสกัดในหัวข้อการวิเคราะห์ปริมาณ γ -Oryzanol และสารละลายมาตรฐาน Trolox ปริมาตร 0.2 mL มาผสมกับสารละลาย ABTS^{•+} reagent ปริมาตร 2 mL ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 10 min แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer) (U2900, Hitachi, Japan) และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณจากกราฟสารละลายมาตรฐานในหน่วยของมิลลิกรัมของ Trolox ต่อน้ำหนักของตัวอย่าง 1 g (mg Trolox / g sample) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

3.4.3 การวิเคราะห์ค่าสี (Color analysis)

ในงานวิจัยนี้ได้นำข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกมาวิเคราะห์สีด้วยเครื่องวัดสี (Ultrascan VIS, ColorQuest ® XE, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) ในระบบ L* a* b* นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ค่า W และค่าความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE) ตามวิธีการของ Chatchavanthatri et al. (2021) เพื่อใช้เป็นดัชนีในการวิเคราะห์คุณภาพของข้าว ดังแสดงการศึกษาในรูปที่ 3.20 โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 5 – 10 ซ้ำ โดยค่า L* หมายถึงค่าความสว่าง (lightness) ค่า a* หมายถึงค่าความเป็นสีแดง (redness) ค่า b* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลือง (yellowness) และค่า W หมายถึงค่าความขาว (Whiteness) โดยค่า W และ ΔE สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.5 และ 3.6

$$W = 100 - [(100-L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3.6)$$



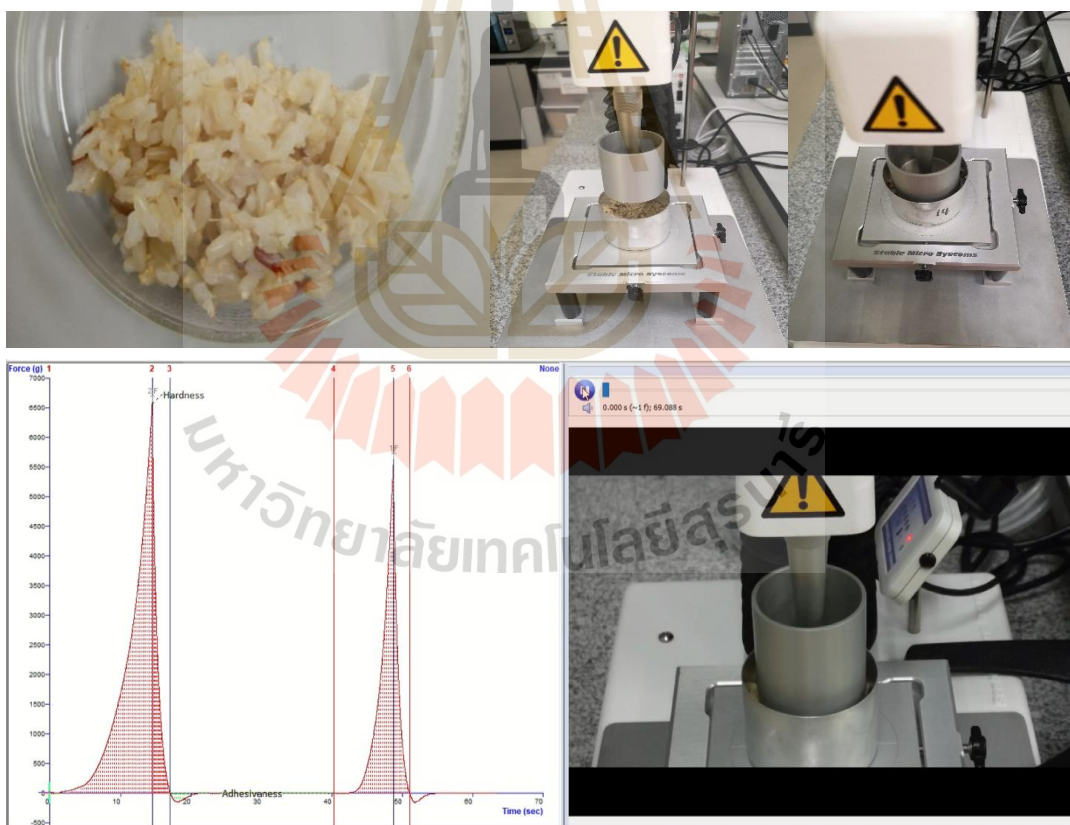
รูปที่ 3.20 การวิเคราะห์ค่าสี (Color value)

3.4.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัส (Texture analysis)

การเตรียมข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสุกโดยการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (TOSHIBA, RC-5MM) โดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 1.5 เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวสุก โดยชั่งข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสุก 40 กรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm และสูง 4 cm หลังจากนั้นกดทับตัวอย่างด้วยน้ำหนัก 100 g เป็นเวลา 3 min ก่อนนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสแบบ Texture profile analysis (TPA) ด้วยเครื่อง Texture analyzer (TA.XT Plus, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA) เพื่อจำลองการใช้ฟันบดข้าว โดยข้าวมีอุณหภูมิห้องในขณะทำการวิเคราะห์ (25°C) โดยใช้หัววัด Cylinder probe P/36R ค่าสถานะในการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสแสดงในตารางที่ 3.1 และภาพการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสแสดงในรูปที่ 3.21 โดยทำการวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าการยึดติดกับวัสดุที่สัมผัส (Adhesiveness) ค่าความสามารถในการคืนตัวหลังจากการกดครั้งแรก (Springiness) และค่าการยึดตัวกันเอง (Cohesiveness) ด้วยโปรแกรม Texture Exponent Software (version 6.1.7.0, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 10 ซ้ำ

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการวัดคุณสมบัติลักษณะเนื้อสัมผัส

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

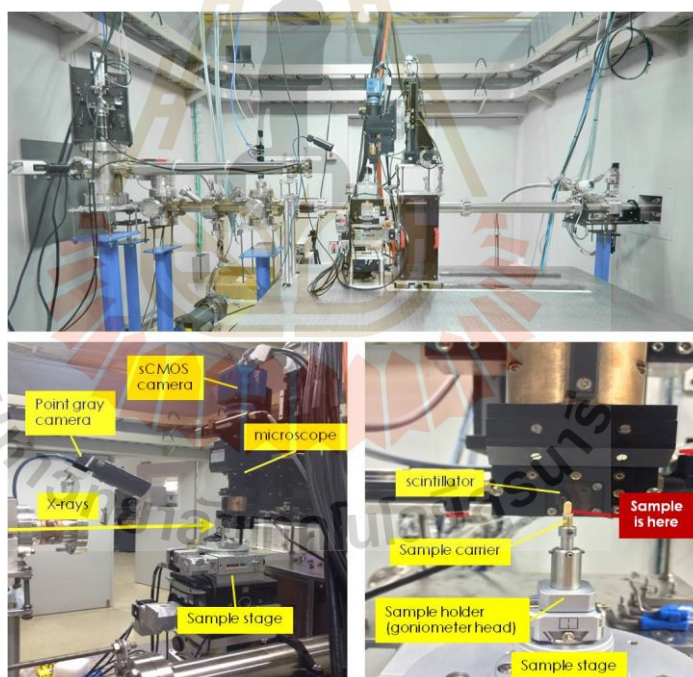


รูปที่ 3.21 ภาพการวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของข้าวกลิ้งและข้าวกลิ้งงอกสุก

3.4.5 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค (Microstructural analysis)

3.4.5.1 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติผ่านกล้องจุลทรรศน์ (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy, SR-XTM) สามารถสร้างภาพ 3 มิติของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก โดยทำการฉายรังสีเอ็กซ์หมุนรอบตัวอย่างเมล็ดข้าว 360° โดยเชิงมุมเพิ่มขึ้น 0.5 ก่อนการบันทึกภาพเอกซเรย์ด้วยกล้อง sCMOS (สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์เสริมทางวิทยาศาสตร์) ที่มีขนาดพิกเซล $1.44 \mu\text{m}$ ข้อมูลภาพที่บันทึกไว้ถูกนำมาประกอบเป็นภาพ 3 มิติของเมล็ดข้าวให้สมบูรณ์ โดยใช้การสร้างภาพแบบฟิลเตอร์แบ็กโปรเจกชัน (Filtered-back projection algorithm) ด้วย Octopus reconstruction software (Inside Matters BVBA, Belgium) และสามารถแสดงภาพตัวอย่างเมล็ดข้าวที่สร้างขึ้นได้จาก Dristhi software ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของช่องว่างระหว่างเซลล์ภายในเมล็ดข้าว ดังภาพการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ภาพการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วย SR-XTM (ที่มา : Rojviriya and Pakawanit, 2015)

3.4.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดย FE-SEM

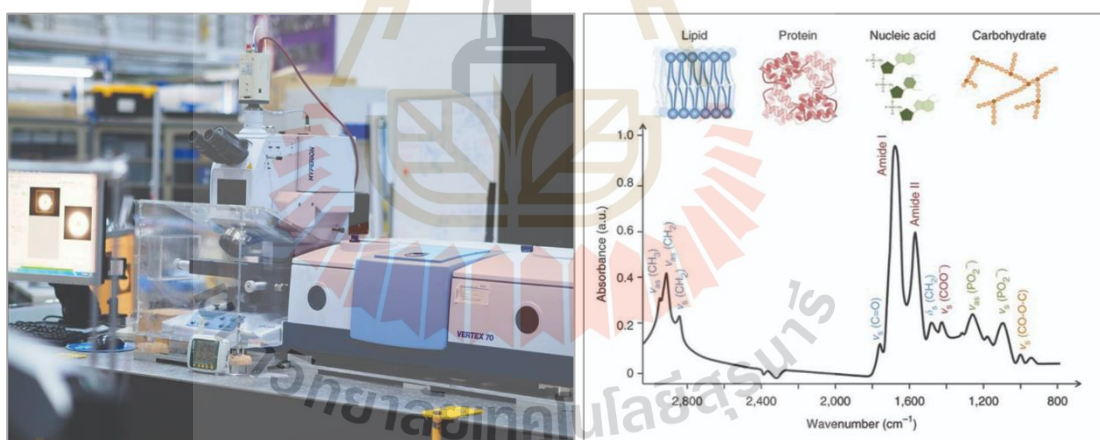
การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องชนิดฟิลด์อีมิชัน (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) (Zeiss AURIGA FE-SEM/FIB/EDX, Carl Zeiss AG, Germany) โดยนำขั้วกลิ้งและขั้วกลิ้งงอกทั้งแบบดละเอียดและแบบตัดขวางมาติดบน stub และเคลือบผิวตัวอย่างด้วยทองคำหนา 1 nm ก่อนนำมาวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคที่ระดับกำลังขยายของภาพระหว่าง 100 – 5000 เท่า เพื่อตรวจสอบลักษณะสัณฐานของผิวของเม็ดสตาร์ช การจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ช และลักษณะความเป็นรูพรุนภายในเมล็ดข้าว ที่เปลี่ยนแปลง โดยรูปที่ 3.23 แสดงภาพการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ FE-SEM



รูปที่ 3.23 ภาพการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ FE-SEM

3.4.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกด้วย SR-FTIR

ข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกที่ผ่านการบดลดขนาด (<0.2 mm) ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค SR-FTIR ดังแสดงในรูปที่ 3.24 โดยทำการวิเคราะห์ที่ IR Beamline BL4.1 (IR Spectroscopy and Imaging) ด้วยเครื่อง IR spectrometer (Vertex70, Bruker optic) ที่ต่อพ่วงเข้ากับเครื่อง IR Microscope (Hyperion 2000, Bruker optic) ที่มีระบบตรวจวัดแบบ Mercury Cadmium Telluride (Narrow band MCT) สามารถวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ตั้งแต่ช่วง $4000 - 700 \text{ cm}^{-1}$ ร่วมกับการใช้โปรแกรม OPUS 7.2 (Bruker optic, German) สามารถกำหนดการวัดสเปกตรัมแบบส่องผ่านและวัดที่ค่าความละเอียด (Resolution) 4 cm^{-1} ที่จำนวนการสแกน 64 Scans ซึ่งสเปกตรัมที่วัดได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการ Pretreatment ด้วยการทำให้ Baseline correction และ Vector normalize แบบ S-Golay 3 polynomial ที่ 9 pt smoothing จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยการทำให้ Multivariate data analysis แบบ Principle component analysis (PCA) ด้วยโปรแกรม The Unscrambler X 10.1, CAMO นอกจากนี้สามารถดูลักษณะจำนวนคลื่นที่แสดงแถบของการดูดกลืนแสง FTIR ส่วนบริเวณของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน (Amide I, Amide II) และไขมัน ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.24 ภาพการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR

(ที่มา : Synchrotron, 2015)

ตารางที่ 3.2 แถบการดูดกลืนแสง FTIR ส่วนบริเวณโครงสร้างทางเคมีและอัญฐานของสตาร์ช

References ¹	Wavenumber (cm ⁻¹) ²
Fetouhi et al. (2007)	Protein regions: Amide I (1720-1590); Amide II (≈1540)
	Carbohydrate regions: 1200-960
Kongmon et al. (2020)	Protein regions: Amide I (1700-1600); Amide II 1600-1500
	Lipid regions: 3000-2800
Kong and Yu (2007)	Protein regions: Amide I (1690-1600); Amide II (1575-1480)
Sivam et al. (2013)	Carbohydrate regions: 1200-800
Suresh et al. (2008)	GABA: NH ₃ ⁺ asy. deformation (1636) NH ₃ ⁺ sy. deformation+ (1579)
Xia et al. (2018)	Starch morphology: Amorphous structure (1022, 1023); Crystalline structure (1047, 1050)
Xia and Li (2018)	Starch morphology: Amorphous structure (1025); Crystalline structure (1046)
He et al. (2021)	Starch morphology: Amorphous structure (1022); Crystalline structure (1047)

ตารางที่ 3.3 แถบการดูดกลืนแสง FTIR ส่วนบริเวณโครงสร้างระดับทุติยภูมิ (Secondary structure) ของโปรตีน (Amide I)

Mean frequencies ¹	Assignment ²
1624 ± 1.0	β-sheet
1627 ± 2.0	
1633 ± 2.0	
1638 ± 2.0	
1642 ± 1.0	
1656 ± 2.0	α Helix
1663 ± 3.0	3 ₁₀ Helix
1667 ± 1.0	β-Turn
1675 ± 1.0	
1680 ± 2.0	
1685 ± 2.0	
1691 ± 2.0	β-sheet
1696 ± 2.0	

^{1,2} adapted from Dong et al. (1992a); Dong et al. (1992b); Kong and Yu (2007).

3.4.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis)

ในงานวิจัยนี้ได้วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อวิเคราะห์ผลของวิธีการเพาะงอกข้าวเปลือก ได้แก่ การนึ่งข้าวเปลือกงอก วิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอก สภาวะที่ใช้ในการเพาะงอก รวมทั้งการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก และเปรียบเทียบพหุคูณของค่าเฉลี่ย (multiple comparison test) ด้วยวิธีของ Tukey HSD ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรม Minitab[®] 16 (Minitab Inc.)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของผลการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอก (Germinated paddy, GP) ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) โดยผลการศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก และ (2) ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR ของ GBR รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกสุก (Cooked GBR)

4.1 ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยตารางที่ 4.1 แสดงรหัส (Code) ของแต่ละตัวอย่างข้าวกล้องงอก (GBR) ที่ได้จากการเตรียมข้าวเปลือกงอกในแต่ละวิธี ได้แก่ การไม่นึ่ง (Non-parboiling) และการนึ่ง (Parboiling) ข้าวเปลือกงอกหลังจากการกระบวนการเพาะงอกข้าว (Germination) และการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (Sun drying) การใช้ตู้อบลมร้อน (Hot-air oven drying) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying) โดยได้วิเคราะห์คุณภาพของ GBR ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ สี เนื้อสัมผัส และโครงสร้างระดับจุลภาค

ตารางที่ 4.1 รหัสชื่อตัวอย่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด

Treatment ¹	Code
Brown rice	BR
Sun-dried non-parboiled germinated brown rice	GBR-S
Sun-dried parboiled germinated brown rice	PGBR-S
Hot-air oven-dried non-parboiled germinated brown rice	GBR-O
Hot-air oven-dried parboiled germinated brown rice	PGBR-O
IR-dried non-parboiled germinated brown rice	GBR-I
IR-dried parboiled germinated brown rice	PGBR-I

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; GBR-S คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการอบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการอบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

4.1.1 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ปริมาณข้าวต้น และรอยร้าวของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ใช้วิธีการเพาะงอกข้าวเปลือกด้วยการแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 h จากนั้นเพาะงอกข้าวเปลือกต่อที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 48 h ที่ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 78 – 80% โดยพบว่าข้าวเปลือกมีอัตราการงอก (Germination rate) เท่ากับ $96.33 \pm 0.58\%$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2020) จากงานวิจัยของ Ding et al. (2015) พบว่า ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ปริมาณข้าวต้น (Head rice yield, HRY) และปริมาณรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องสามารถใช้บ่งบอกถึงคุณภาพของวิธีการผลิตข้าวกล้องได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ผลเปลี่ยนแปลงของ TRY, HRY และ FG ของข้าวกล้องงอกที่ได้จากการผลิตในแต่ละวิธีโดยเปรียบเทียบกับ TRY, HRY และ FG ของข้าวกล้องธรรมดา (BR)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ปริมาณข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอก

Treatment	Parameters		
	TRY (%) ²	HRY (%) ³	FG (%) ⁴
BR	72.78 ± 1.39 ^a	56.28 ± 1.06 ^c	2.33 ± 0.58 ^d
GBR-S	69.50 ± 3.23 ^a	52.56 ± 1.88 ^d	17.60 ± 1.82 ^a
PGBR-S	70.30 ± 2.12 ^a	62.83 ± 2.62 ^b	11.00 ± 1.29 ^b
GBR-O	69.97 ± 3.37 ^a	54.01 ± 2.12 ^{cd}	13.67 ± 3.06 ^{ab}
PGBR-O	72.62 ± 1.11 ^a	65.78 ± 0.61 ^b	4.33 ± 0.58 ^c
GBR-I	69.32 ± 2.03 ^a	56.77 ± 0.79 ^c	12.50 ± 3.54 ^{ab}
PGBR-I	72.01 ± 0.86 ^a	69.20 ± 0.43 ^a	1.00 ± 0.00 ^e

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; GBR-S คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3,4} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณผลผลิตทั้งหมด (TRY) ข้าวตัน (HRY) และรอยร้าว (FG) พบว่า ข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกที่ได้จากการเตรียมในแต่ละวิธีโดยมีค่า TRY, HRY และ FG อยู่ระหว่าง 69.32 – 72.78%, 52.56 – 69.20% และ 1.00 – 17.60% ตามลำดับ ทั้งนี้ BR มีค่า TRY เท่ากับ 72.78% ส่วนข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR) และผ่านการนึ่ง (PGBR) และการทำแห้งด้วยวิธี Sun drying, Hot-air oven drying, และ Infrared irradiation drying มีค่า TRY อยู่ระหว่าง 69.32 – 72.62% จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การไม่นึ่งและการนึ่งข้าวเปลือกงอกก่อนการทำแห้งในแต่ละวิธีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า TRY ของข้าวกล้องงอกเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา (BR) ($p > 0.05$) นอกจากนี้ TRY ที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ding et al. (2015) ที่มีค่า TRY ของข้าวกล้องอยู่ระหว่าง 66.52 – 69.39%

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณ HRY ของ BR มีค่าเท่ากับ 56.28% ส่วน GBR-S, -O, -I และ PGBR-S, -O, -I มีค่า HRY อยู่ระหว่าง 52.56 – 69.20% ซึ่งสอดคล้องกับ Borompichaichartkul et al. (2007), Ding et al. (2015) และ Tumpanuvatr et al. (2018) โดยเมื่อเปรียบเทียบค่า HRY ของ BR, GBR และ PGBR จะเห็นได้ว่า การนึ่งข้าวเปลือกงอกมีผลช่วยทำให้ค่า HRY เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการนึ่งข้าวเปลือกงอกทำให้สตาρχข้าวเกิดเจลาติไนเซชัน (ข้าวเกิดเจล) ซึ่งการเกิดเจลาติไนเซชันจะช่วยเติมรอยแยกตามเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าวได้ (Oil et al., 2014) โดยอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาρχข้าวอยู่ระหว่าง 68 – 78°C (Srichamnong et al., 2016) ดังนั้นการนึ่งข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้ด้วยไอน้ำ (steam parboiling) เป็นเวลานาน 15 นาที จึงช่วยให้เมล็ดข้าวมีรอยแยกที่ลดลงและเมื่อผ่านการทำแห้ง เมล็ดข้าวจึงทนต่อแรงกระแทกมากขึ้นในระหว่างการกะเทาะเปลือก (Dehusking) ซึ่งส่งผลให้เมล็ดข้าวมีการแตกหักลดลงนั่นเอง จากงานวิจัยของ Bualuang et al. (2012) และ Borompichaichartkul et al. (2007) รายงานว่า วิธีการนึ่งมีผลทำให้ค่า HRY สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่นึ่งข้าว นอกจากนี้การทำแห้งเมล็ดข้าวมีผลทำให้ข้าวเกิดเจลาติไนเซชันทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงและทนต่อแรงกระแทกมากขึ้นซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มค่า HRY (Roy et al., 2019) นอกจากนี้การนึ่งข้าวยังทำให้เกิดการสลายตัวของโปรตีน ซึ่งสามารถเติมช่องว่างในเม็ดสตาρχ (Starch granule) ส่งผลทำให้ลดรอยแยกของเมล็ดข้าวได้ (Bualuang et al., 2012) ในงานวิจัยนี้วิธีการทำแห้งที่ต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า HRY ของข้าวกล้องงอก โดยการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดส่งผลทำให้ค่า HRY ของ PGBR-I (69.20%) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการใช้ตู้อบลมร้อนและรังสีอินฟราเรดมีผลทำให้ GBR-O (54.01%) และ GBR-I (56.77%) มีค่า HRY ใกล้เคียงกับของ BR (56.28%) ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามจากรายงานของ Semwal & Meera (2020) พบว่า การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสีข้าว (Rice milling) เนื่องจากรังสีอินฟราเรดช่วยทำให้อุณหภูมิระหว่างการทำแห้งมีความสม่ำเสมอและเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมล็ดข้าวซึ่งทำให้ทนต่อการแตกหักเมื่อเปรียบเทียบกับ การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดดซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกงอกจะช่วยทำให้ได้ค่า HRY ของข้าวกล้องงอกเพิ่มสูงขึ้น

จากงานวิจัยของ Clossen et al. (2003) และ Tumpanuvatr et al. (2018) รายงานว่า การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดรอยร้าว (FG) ของเมล็ดข้าวมากขึ้น โดย FG มีผลทำให้ปริมาณข้าวตัน (HRY) มีค่าลดลง เนื่องจาก FG ภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวเกิดการแตกหักระหว่างการกะเทาะเปลือกมากขึ้น นอกจากนี้ FG ยังส่งผลเสียต่อคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกอีกด้วย (Clossen et al., 2003) ในงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบผล HRY ของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกพบว่า HRY ของ PGBR-S และ PGBR-O มีค่าสูง

กว่า BR แม้ว่าค่า FG ของ PGBR-S และ PGBR-O (4.33 – 11.00%) จะมีค่าสูงกว่า BR (2.33%) (ตารางที่ 4.2) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมล็ดข้าวที่มีรอยร้าวบางส่วนอาจไม่เกิดการแตกหักระหว่างการแกะทะเปลือกข้าว (Cnossen et al., 2003) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผล FG ของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่าน (GBR) และผ่านการนึ่ง (PGBR) พบว่า การนึ่งมีผลทำให้ค่า FG ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชข้าวช่วยเติมรอยแยกตามเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าว (Oil et al., 2014) ผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheevitsopon and Noomhorm (2011), Cheevitsopon and Noomhorm (2015), และ Chungcharoen et al. (2015) ซึ่งพบว่า การนึ่งข้าวช่วยลดปริมาณรอยร้าวของเมล็ดข้าวได้ จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า PGBR-I มีค่า FG ต่ำสุด (1%) เมื่อเปรียบเทียบกับ BR และ GBR-S, GBR-O และ GBR-I รวมถึง PGBR-S และ PGBR-O ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งนั้นโดยการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังข้าวเปลือกงอกทำให้เกิดจากการดูดซับรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลภายในเมล็ดข้าวซึ่งทำให้เกิดการสั่น (Vibration) และการหมุน (Rotation) ของโมเลกุลที่ดูดซับรังสีและทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดจึงมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง สม่ำเสมอ และใช้ระยะเวลาสั้นในการทำแห้งซึ่งอาจช่วยลดการเกิดรอยร้าว (FG) ของเมล็ดข้าวได้ นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง (80°C) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของข้าวซึ่งมีค่า T_g เท่ากับ 60°C ซึ่งอาจช่วยป้องกันการเกิดรอยร้าว (FG) ภายในเมล็ดข้าว เนื่องจากเมล็ดข้าวอยู่ในสถานะยาง (Rubbery state) ที่มีความยืดหยุ่นได้ดี (Cnossen et al., 2003)

4.1.2 สมบัติทางเคมีและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด (GBR-S, GBR-O, GBR-I, PGBR-S, PGBR-O, และ PGBR-I) ซึ่งพบว่า BR และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดมีปริมาณโปรตีนระหว่าง 10.08 – 11.41% ซึ่งมีค่าสูงกว่าในรายงานของ Moongarm and Saetung (2010) ที่พบว่า ข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกมีปริมาณโปรตีนเท่ากับ 6.98% และ 8.98% ตามลำดับ ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างข้าวมีความแตกต่างกันอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วิธีการวิเคราะห์ พันธุ์ข้าว วิธีการเพาะปลูก และระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวข้าว เป็นต้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ปริมาณโปรตีนของ BR, GBR และ PGBR มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องรายงานวิจัยของ Bualuang et al. (2012) พบว่า การนึ่งข้าวทำให้โครงสร้างของโปรตีนแยกออกจากกัน แต่ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีน อย่างไรก็ตาม Moongarm และ Saetung (2010) รายงานว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องงอกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายตัวของพอลิเมอร์ของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วยเอนไซม์ส่งผลทำให้ปริมาณกรดอะมิโนอิสระทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Chemical composition (%) ²				
	Protein	Fat	Fiber	Ash	Carbohydrate
BR	10.74 ± 0.04 ^{abc}	2.92 ± 0.18 ^a	0.75 ± 0.02 ^a	0.85 ± 0.05 ^a	84.72 ± 0.16 ^b
GBR-S	11.22 ± 0.61 ^{abc}	2.81 ± 0.03 ^a	0.72 ± 0.08 ^a	0.83 ± 0.01 ^a	84.42 ± 0.72 ^b
PGBR-S	10.55 ± 0.03 ^{abc}	2.85 ± 0.07 ^a	0.52 ± 0.14 ^a	0.51 ± 0.15 ^b	85.57 ± 0.11 ^{ab}
GBR-O	10.33 ± 0.04 ^{bc}	2.85 ± 0.01 ^a	0.62 ± 0.03 ^a	0.52 ± 0.07 ^b	85.68 ± 0.06 ^{ab}
PGBR-O	10.08 ± 0.03 ^c	2.42 ± 0.44 ^a	0.54 ± 0.01 ^a	0.45 ± 0.11 ^b	86.51 ± 0.38 ^a
GBR-I	11.41 ± 0.09 ^a	2.92 ± 0.86 ^a	0.54 ± 0.16 ^a	0.83 ± 0.14 ^a	84.30 ± 0.75 ^b
PGBR-I	11.34 ± 0.03 ^a	2.74 ± 0.14 ^a	0.54 ± 0.06 ^a	0.57 ± 0.05 ^b	84.81 ± 0.04 ^b

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; GBR-S คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

² ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไขมันและใยอาหารของ BR และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดมีมีค่าระหว่าง 2.42 – 2.92% และ 0.52 – 0.75% ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพาะงอกเปลือก การไม่นึ่งและการนึ่งข้าวเปลือกงอกก่อนการทำแห้งด้วยวิธีแตกต่างกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันและใยอาหาร ($p > 0.05$) โดยปริมาณไขมันมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณไขมันของข้าวในรายงานของ Oli et al. (2014) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.9 – 3.4% ในงานวิจัยนี้ ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ BR และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดมีมีค่าระหว่าง 84.30 – 86.51% ซึ่งสูงกว่าในรายงานของ Moongngarm and Saetung (2010) นอกจากนี้รายงานวิจัยของ Moongngarm and Saetung (2010) พบว่า การเพาะงอกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมัน (1.19 – 1.23%), เส้นใยอาหาร (1.13 – 1.27%), เถ้า (1.96 – 2.19%) และคาร์โบไฮเดรต (76.8 – 79.2%) ของ GBR เมื่อเปรียบเทียบกับ BR อย่างไรก็ตาม Oli et al. (2014) รายงานว่า การนึ่งข้าวสามารถช่วยปรับปรุงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการนึ่งและระยะเวลาที่ใช้ในการนึ่ง การนึ่งข้าวทำให้โครงสร้างของไขมันเกิดการคลายตัวและเคลื่อนที่มายังผิวของเมล็ดหรือรำข้าว ซึ่งส่งผลทำให้ปริมาณไขมันในข้าวที่ผ่านการนึ่งมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม

Bualuang et al. (2012) พบว่า ปริมาณไขมันของข้าวที่ผ่านการนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่กระจายของไขมันภายในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสารกาบา (GABA) ปริมาณสาร α -Tocopherol และปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	GABA (mg/100 g) ²	α -Tocopherol (mg/100 g) ³	γ -Oryzanol (mg/100 g) ⁴
BR	1.16 \pm 0.15 ^d	0.19 \pm 0.01 ^b	47.48 \pm 1.74 ^a
GBR-S	13.59 \pm 0.38 ^b	0.33 \pm 0.01 ^a	44.15 \pm 2.58 ^{ab}
PGBR-S	5.12 \pm 0.16 ^c	Not detected	39.44 \pm 1.10 ^b
GBR-O	14.43 \pm 0.57 ^b	0.17 \pm 0.04 ^b	43.74 \pm 1.74 ^{ab}
PGBR-O	5.29 \pm 0.30 ^c	Not detected	41.39 \pm 0.84 ^{ab}
GBR-I	29.76 \pm 0.80 ^a	0.36 \pm 0.03 ^a	45.06 \pm 0.82 ^{ab}
PGBR-I	6.43 \pm 0.04 ^c	Not detected	41.00 \pm 1.49 ^{ab}

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; GBR-S คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3,4} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) นอกจากมีประโยชน์ในการส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภคให้ดีขึ้น ยังมีความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ (Free radicals) ได้อีกด้วย จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา สาร α -Tocopherol และสาร γ -Oryzanol ของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด (GBR-S, GBR-O, GBR-I, PGBR-S, PGBR-O, และ PGBR-I) พบว่า ปริมาณสารกาบาของ BR มีค่าเท่ากับ 1.16 mg/100 g ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ Cheevitsopon and Noomhorm (2011) และ Jongyingcharoen and Cheevitsopon (2016) (2.10 และ 1.31 mg/100 g KDML105 BR) อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Sirisoontaralak et al. (2015) พบว่า ข้าวกล้อง (KDML105 BR) มีปริมาณสารกาบาสูงถึง 10 mg/100 g ซึ่งปริมาณสารกาบาที่แตกต่างกันนี้อาจเนื่องมาจากวิธีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้พบว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

($p < 0.05$) โดยข้าวกล้องงอกที่ได้จากข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR) มีปริมาณสารกาบระหว่าง 13.59 – 29.76 mg/100 mg โดยเพิ่มขึ้น 1,071 – 2,465% เมื่อเทียบกับ BR และข้าวกล้องงอกที่ได้จากข้าวเปลือกที่ผ่านการนึ่ง (PGBR) มีปริมาณสารกาบระหว่าง 5.12 – 6.43 mg/100 mg โดยเพิ่มขึ้น 396 – 454% เมื่อเทียบกับ BR ปริมาณสารกาบที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Biochemical reaction) และการสังเคราะห์สารกาบระหว่างการเพาะงอก (Sirisoontaralak et al., 2015) ปริมาณสารกาบของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR) ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับรายงานวิจัยของ Sirisoontaralak et al. (2015) (15-17 mg/100 g), Jongyingcharoen and Cheevitsopon (2016) (11.08 – 19.71 mg/100 g), และ Cheevitsopon and Noomhorm (2011) (22.38 – 22.42 mg/100 g) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารกาบของ GBR และ PGBR พบว่าการนึ่งข้าวเปลือกมีผลทำให้ปริมาณสารกาบของข้าวกล้องงอก (PGBR) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งลดลง 62.32 – 78.39% เมื่อเทียบกับ GBR (ไม่ผ่านการนึ่ง) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Cheevitsopon and Noomhorm (2011) นอกจากนี้ Jongyingcharoen and Cheevitsopon (2016) พบว่า ข้าวกล้องงอกสุก (cooked GBR) มีปริมาณสารกาบลดลงถึง 62% เมื่อเปรียบเทียบ GBR โดยลดลงจาก 19.71 mg/100 g เป็น 7.49 mg/100 g

การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีที่แตกต่างกันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบ โดย GBR-S (13.59 mg/100 g) และ GBR-O (14.43 mg/100 g) มีปริมาณสารกาบต่ำกว่า GBR-I (29.76 mg/100 g) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็ว สม่่าเสมอ และใช้ระยะเวลาการทำแห้งสั้นลง ส่งผลทำให้ปริมาณสารกาบมีค่าเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดยังทำให้เมล็ดข้าวมีรูพรุนมากขึ้นซึ่งอาจเพิ่มความสามารถในการสกัดของสารกาบออกมาจากเมล็ดข้าวได้ ทั้งนี้ข้อดีของการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด ได้แก่ ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูง การเกิดความร้อนภายในเมล็ดข้าวมีความสม่ำเสมอ และใช้ระยะเวลาสั้น (Aboud et al., 2019; Semwal & Meera, 2020) เนื่องจากระยะเวลาการทำแห้งที่ลดลงอาจมีผลต่อการป้องกันการสูญเสียสารกาบในเมล็ดข้าวได้ อย่างไรก็ตามปริมาณสารกาบของ PGBR-I (6.43 mg/100 g) มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PGBR-S (5.12 mg/100 g) และ PGBR-O (5.29 mg/100 g) อาจเกิดจากการเจลาตีไนเซชันของสตาร์ชจากขั้นตอนการนึ่ง ซึ่งส่งผลทำให้ลดการเกิดรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างเซลล์ทำให้ความสามารถในการสกัดของสารกาบลดลง

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณ α -Tocopherol ของ BR มีค่าเท่ากับ 0.19 mg/100 g ผลการทดลองนี้มีค่าใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ KDML105 (0.1 mg/100 g) และข้าว *Indica* (0.2 – 0.3 mg/100 g) (Pascual et al., 2013; Srichamnong et al., 2016) แต่ปริมาณ α -Tocopherol ของ BR ในงานวิจัยนี้น้อยกว่าข้าวพันธุ์ RD-6 (0.93 mg/100 g) (Moongngarm &

Saetung, 2010) จากงานวิจัยนี้พบว่า การเพาะงอกข้าวมีผลต่อการเพิ่มปริมาณ α -Tocopherol ขึ้น 73 – 89% เมื่อเทียบกับ BR ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการนึ่งข้าวเปลือกงอกมีผลทำให้สูญเสีย α -Tocopherol ในตัวอย่าง PGBR-S, PGBR-O และ PGBR-I โดยไม่สามารถตรวจพบได้ (ตารางที่ 4.4) ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า การนึ่งทำให้ α -Tocopherol ถูกทำลายทั้งหมด จากรายงานของ Pascual et al.(2013) ระบุว่า การสูญเสียหรือลดลงของปริมาณ Tocols ในข้าวหนึ่ง โดยเฉพาะ α -Tocopherol (93%) เกิดจากการไวต่อการถูกทำลายด้วยความร้อนของสารนี้ นอกจากนี้การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยตู้อบลมร้อน (80°C เป็นเวลา 4 h) มีผลทำให้ α -Tocopherol ของ GBR-O ลดลงเหลือ 0.17 mg/100 g ซึ่งใกล้เคียงกับ BR (0.19 mg/100 g) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยตู้อบลมร้อนมีผลทำให้ปริมาณ α -Tocopherol ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ α -Tocopherol ของ GBR-S และ GBR-I พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.33 mg/100 g และ 0.36 mg/100 g ตามลำดับ ทั้งนี้การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (Sun drying) ซึ่งอุณหภูมิของการทำแห้งค่อนข้างต่ำ โดยเมื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวของข้าวเปลือกระหว่างการทำแห้งมีค่าระหว่าง $38 - 40^{\circ}\text{C}$ และการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation drying) ซึ่งใช้ระยะเวลาสั้น สามารถช่วยลดการสูญเสีย α -Tocopherol ของข้าวกล้องงอกได้ นอกจากนี้การใช้รังสีอินฟราเรดทำให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างของเมล็ดข้าวซึ่งช่วยทำให้การสกัดสาร α -Tocopherol ออกมาได้เพิ่มมากขึ้น (Aboud et al., 2019)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ BR พบว่า มีค่าเท่ากับ 47.48 mg/100 g ซึ่งใกล้เคียงกับ BR ของข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่าเท่ากับ 50 mg/100 g (Srichamnong et al., 2016) นอกจากนี้ปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ GBR และ PGBR ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าระหว่าง 41.00 – 45.06 mg/100 g ($p > 0.05$) ยกเว้น PGBR-S มีปริมาณสาร γ -Oryzanol (39.44 mg/100 g) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ BR ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามปริมาณสาร γ -Oryzanol ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าน้อยกว่าผลการศึกษาของ Srichamnong et al. (2016) ที่มีปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ PGBR (KDML105) เท่ากับ 60 mg/100 g และ Moongngarm & Saetung (2010) พบว่า ปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ BR และ PGBR (RD-6) เท่ากับ 66 mg/100 g และ 84 mg/100 g ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นได้ว่า ปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ GBR และ PGBR มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ($p > 0.05$) อาจเกิดจากการเจลาติโนเซชันของสตาร์ระหว่างการนึ่งส่งผลให้สตาร์มีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งช่วยลดการสูญเสียสาร γ -Oryzanol ได้ (Srichamnong et al., 2016) นอกจากนี้รายงานวิจัยของ Moongngarm & Saetung (2010) และ Srichamnong et al. (2016) พบว่า การเพาะงอกข้าวมีผลต่อการเพิ่มปริมาณสาร γ -Oryzanol และ Tocols ได้ และการนึ่งมีผลทำให้ PGBR มีปริมาณสาร γ -Oryzanol และ Tocols (α -Tocopherol, γ -Tocopherol, α -

Tocotrienol, และ γ -Tocotrienol) สูงกว่าข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR) (Srichamnong et al., 2016) อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Pascual et al. (2013) พบว่า การนึ่งข้าวมีผลทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณสาร γ -Oryzanol และ Tocols จากรายงานของ Cáceres et al. (2017) พบว่า การทำแห้งด้วยการตากแดด (Sun drying) มีผลทำให้ปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ GBR เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการสะสมของสาร γ -Oryzanol ที่เกิดจากแสงแดด ทั้งนี้ผลการทดลองของแต่ละงานวิจัยที่ได้ไม่สอดคล้องกันอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของสภาวะในการเพาะงอก อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการนึ่ง รวมถึงกระบวนการทำแห้งด้วย

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในตารางที่ 4.4 พบว่า γ -Oryzanol เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เกิดการสูญเสียน้อยที่สุดจากการนึ่งข้าวเปลือกงอกเมื่อเปรียบเทียบกับสารกาบา และ α -Tocopherol โดยสารทั้ง 2 ชนิดนี้ถูกทำลายเนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงระหว่างการนึ่งมากกว่า γ -Oryzanol ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเสถียรภาพทางความร้อนและโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด จากรายงานของ Pradeep et al. (2014) พบว่า ข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการนึ่งสามารถเพิ่มปริมาณสาร γ -Oryzanol ได้ แต่มีผลทำให้สูญเสียสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ รวมถึงวิตามินอีและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด นอกจากนี้การใช้อุณหภูมิ 120°C หรืออุณหภูมิที่สูงกว่า มีผลทำให้ปริมาณสาร γ -Oryzanol ในข้าวลดลงได้ (Srichamnong et al., 2016) อีกทั้งผลการศึกษาของ Sirisoontarak et al. (2015) รายงานว่า การสูญเสียสารกาบาของข้าวกล้องงอกสุกเกิดจากการใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 100°C นอกจากนี้ Irakli et al. (2018) และ Pradeep et al. (2014) รายงานว่า เมื่อเปรียบเทียบ tocopherols ได้แก่ α -, β , และ γ -Tocopherol นั้น α -Tocopherol เป็นสารที่ไวต่อการถูกทำลายด้วยความร้อนมากที่สุด จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการผลิตข้าวกล้องงอก โดยไม่นึ่งข้าวเปลือกงอกและใช้การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถช่วยคงปริมาณสารกาบา (29.76 mg/100 g) α -Tocopherol (0.36 mg/100 g) และสาร γ -Oryzanol (45.06 mg/100 g) ได้

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Antioxidant activity (mg TE/g) ²		Total phenolic compounds
	DPPH	ABTS	(mg GA/g) ³
BR	1.13 ± 0.13 ^{bc}	1.21 ± 0.05 ^b	0.67 ± 0.01 ^b
GBR-S	1.36 ± 0.03 ^a	1.31 ± 0.01 ^a	0.88 ± 0.03 ^a
PGBR-S	0.84 ± 0.04 ^d	0.91 ± 0.02 ^c	0.48 ± 0.01 ^c
GBR-O	1.20 ± 0.03 ^{ab}	1.23 ± 0.04 ^b	0.81 ± 0.09 ^a
PGBR-O	0.75 ± 0.03 ^{cd}	0.85 ± 0.04 ^c	0.57 ± 0.05 ^c
GBR-I	1.17 ± 0.03 ^{ab}	1.22 ± 0.03 ^b	0.81 ± 0.02 ^a
PGBR-I	0.83 ± 0.02 ^d	0.93 ± 0.01 ^c	0.55 ± 0.00 ^c

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; GBR-S คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS รวมทั้งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด (GBR-S, GBR-O, GBR-I, PGBR-S, PGBR-O, และ PGBR-I) พบว่า ความสามารถในการยับยั้งสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox มีค่าอยู่ในช่วง 0.75 – 1.36 mg TE/g และ 0.85 – 1.31 mg TE/g ตามลำดับ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) เมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน Gallic acid มีค่าอยู่ระหว่าง 0.48 – 0.88 mg GA/g โดย TPC ของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR) และทำแห้งทั้ง 3 วิธี (0.81 – 0.88 mg GA acid/g) มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องธรรมดา (BR) (0.67 mg GA/g) และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่ง (PGBR) (0.48 – 0.57 mg GA/g) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกมีผลต่อการเพิ่มปริมาณ TPC และวิธีการทำแห้งทั้ง 3 วิธีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ TPC นอกจากนี้การนึ่งข้าวเปลือกมีผลทำให้ปริมาณ TPC ของ PGBR ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งลดลง 30 – 45% เมื่อเปรียบเทียบกับ GBR ปริมาณ TPC ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับ Moongngarm & Saetung (2010) ซึ่งพบว่า BR และ GBR มีปริมาณสาร TPC เท่ากับ 0.703 และ 0.843 mg GA/g

ตามลำดับ แต่มีค่าสูงกว่าในงานวิจัยของ Tumpanuvat et al. (2018) ที่มีปริมาณ TPC อยู่ระหว่าง 0.31 – 0.46 mg GA/g จาก Cáceres et al. (2014) รายงานว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยผนังเซลล์ด้วยเอนไซม์ระหว่างการเพาะงอก ซึ่งส่งผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกที่ยึดกับผนังเซลล์สามารถหลุดออกมาได้ นอกจากนี้ปริมาณ TPC สูงขึ้นในรำข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยรังสีอินฟราเรด เนื่องมาจากผนังเซลล์ถูกทำลาย ส่งผลทำให้สามารถปลดปล่อยสารประกอบฟีนอลิกออกมาได้ (Irakli et al., 2018) นอกจากนี้ About et al. (2019) พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดช่วยกระตุ้นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำส่งผลทำให้สารฟีนอลิกทั้งหมดในเปลือกส้มที่ถูกทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าสูงกว่าการทำแห้งด้วยการตากแดด

จากตารางที่ 4.5 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ของ BR, GBR-O และ GBR-I ไม่แตกต่างกัน แต่ของ GBR-S มีค่าสูงกว่า BR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งผลการทดลองนี้ช่วยบ่งบอกได้ว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ได้ จากงานวิจัยของ Cáceres et al. (2017) พบว่า ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดดมีปริมาณ TPC และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ About et al. (2019) พบว่า การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยส่งผลให้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระมีสูง เนื่องจากรังสีอินฟราเรดช่วยกระตุ้นการสลายพันธะโควาเลนต์ของสารประกอบฟีนอล ซึ่งส่งผลทำให้มีสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มสูงขึ้น

การนึ่งข้าวเปลือกงอกมีผลทำให้ PGBR มีความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งลดลง 24 – 38% เมื่อเทียบกับ GBR ที่ไม่ผ่านการนึ่ง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ DPPH และ ABTS ต่ำลงเนื่องมาจากการนึ่งข้าวเปลือกงอก ซึ่งสอดคล้องกับ Srichamnong et al. (2016) รายงานว่า สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิดในข้าวจะถูกทำลายเมื่อผ่านการทำให้สุก นอกจากนี้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ของ GBR และ BR สูงกว่า PGBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Cáceres et al., 2014; Tumpanuvat et al., 2018)

ในงานวิจัยนี้ ปริมาณ TPC มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu et al. (2017) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า การนึ่งข้าวเปลือกมีผลทำให้ปริมาณ TPC ลดลงได้มากกว่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ทั้งนี้อาจเกิดจากการสร้างสารประกอบ Maillard เนื่องจากความร้อนจากการนึ่งข้าวเปลือก โดยสารประกอบ Maillard มีความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Amarowicz, 2009) จาก Cheetangdee (2019) รายงานว่า การเพาะงอกข้าวช่วยเพิ่มปริมาณ TPC เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีและเอนไซม์ส่งผลทำให้ปริมาณ TPC และความสามารถในการต้าน

สารอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่ได้เพาะงอก งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ความร้อนสามารถทำลาย TPC และสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณ TPC และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลง

4.1.3 สมบัติทางด้านสีและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอก

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ค่าความเป็นสีขาว (Whiteness, W) และความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE) ของข้าวกล้องธรรมชาติ (BR) และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด (GBR-S, GBR-O, GBR-I, PGBR-S, PGBR-O, และ PGBR-I) โดยมีค่า L^* , W และ ΔE อยู่ระหว่าง 49.76 – 58.95 , 44.24 – 53.14 และ 2.96 – 9.36 ตามลำดับ โดย BR มีค่า L^* และ W เท่ากับ 58.95 และ 53.17 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับ Bualuang et al. (2012); Sirisoontarak et al. (2015) อย่างไรก็ตามข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR) และผ่านการนึ่ง (PGBR) มีค่า L^* และ W ต่ำกว่า BR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งส่งผลทำให้ค่า ΔE เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่ง (PGBR-S, PGBR-O, PGBR-I) มีการเปลี่ยนแปลงของสีมากกว่าข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR-S, GBR-O, GBR-I) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเพาะงอกและการนึ่งข้าวเปลือกมีผลต่อการลดค่า L^* และ W ของข้าวกล้องงอก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแพร่ของสีจากส่วนเปลือกนอกของข้าวไปยังเอนโดสเปิร์ม (Hu et al., 2017; Sirisoontarak et al., 2015) อย่างไรก็ตาม Sirisoontarak et al. (2015) รายงานว่า การเพาะงอกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* ของ GBR เมื่อเทียบกับ BR แต่ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับ Roy et al. (2019) และ Bualuang et al. (2012) และจากรายงานวิจัยของ Chungcharoen et al. (2015) และ Roy et al. (2019) พบว่า การเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีขาวขุ่นเป็นสีขาวโปร่งแสงซึ่งส่งผลให้ L^* มีค่าลดลง อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวอาจเกิดได้จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ของข้าวที่ผ่านการนึ่ง ซึ่งการเกิดลักษณะดังกล่าว (Maillard browning) ส่งผลทำให้ข้าวหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสีได้ (Oli et al., 2014)

วิธีการทำแห้งข้าวเปลือกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ W ของเมล็ดข้าว โดยเมื่อพิจารณาวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกัน พบว่า การทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนมีผลทำให้ค่า L^* และ W ของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR-O) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับ GBR-S และ GBR-I นอกจากนี้การทำแห้งด้วยการตากแดดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* และ W ของ PGBR น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนและรังสีอินฟราเรด จากงานวิจัยของ Irakli et al. (2018) รายงานว่า รำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดจะมีค่า L^* น้อยลง เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีผลต่อการสร้างพอลิเมอร์สีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction)

นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดข้าวทำให้เมล็ดข้าวร้อนขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลมากขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ความเป็นสีขาว (Whiteness, W) และความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	L^* ²	W ³	ΔE ⁴
BR	58.95 ± 0.01 ^a	53.14 ± 0.14 ^a	-
GBR-S	56.88 ± 0.17 ^b	52.25 ± 0.17 ^b	2.96 ± 0.32 ^d
PGBR-S	51.34 ± 0.43 ^d	46.67 ± 0.29 ^d	7.67 ± 0.48 ^b
GBR-O	53.46 ± 0.87 ^c	48.69 ± 0.49 ^c	5.70 ± 1.07 ^c
PGBR-O	50.74 ± 0.26 ^{de}	45.89 ± 0.20 ^e	8.23 ± 0.27 ^{ab}
GBR-I	56.01 ± 1.51 ^b	50.83 ± 1.13 ^{bc}	3.06 ± 1.54 ^d
PGBR-I	49.76 ± 0.74 ^e	44.24 ± 0.56 ^e	9.36 ± 0.72 ^a

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; GBR-S คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวกล้องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวกล้องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3,4} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 6 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ โดยค่า L^* คือค่าความสว่าง (lightness) และค่า W คือค่าความเป็นสีขาว (whiteness)

⁴ ΔE คำนวณได้จาก $\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องธรรมดาสุก (Cooked BR) และข้าวกล้องงอกสุกแต่ละชนิด (GBR-S, GBR-O, GBR-I, PGBR-S, PGBR-O, PGBR-I) ด้วยวิธี Texture profile analysis (TPA) โดยทำการวิเคราะห์ข้าวสุกที่อุณหภูมิระหว่าง 25 – 30°C ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ซึ่งได้วิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าการยึดตัวกันเอง (Cohesiveness) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 โดยที่ค่าความแข็ง คือ การวัดแรงสูงสุดในระหว่างการกดตัวอย่างครั้งแรก และ ค่าความยึดตัวกันเองแสดงถึงความสามารถที่วัสดุรักษาโครงสร้างเดิมไว้ได้และมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะทางเคมีภายในของวัสดุ (ปานมนัส ศิริสมบุรณ์, 2555; Ma and Sun, 2009; Junyusen et al., 2017) จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็ง และค่าการยึดตัวกันเอง มีค่าอยู่ระหว่าง 7.44 – 9.32 N และ 24.55 – 31.15% เมื่อเปรียบเทียบค่าความ

แข็งของข้าวกล้องสุกแต่ละชนิด พบว่า GBR-S มีค่าความแข็งเท่ากับ 9.32 N ซึ่งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับ BR และตัวอย่างอื่น ๆ ($p < 0.05$) นอกจากนี้การนึ่งข้าวเปลือกงอกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวกล้องงอกสุกเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่นึ่งข้าวเปลือกงอก ($p > 0.05$) จากรายงานวิจัยของ Sirisoontarak et al. (2015) และ Chungcharoen et al. (2015) พบว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถูกย่อยด้วยเอนไซม์กลายเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้ความแข็ง มของข้าวกล้องงอกสุก (GBR) มีค่าลดลง นอกจากนี้ Cheevitsopon and Noomhorm (2011) และ Bualuang et al. (2012) รายงานว่า ค่าความแข็งของ PGBR สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ GBR อาจเป็นผลมาจากเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวจากการนึ่งส่งผลทำให้ข้าวมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งต่อค่าความแข็งของข้าวสุก พบว่า GBR-I และ PGBR-I มีค่าความแข็งน้อยกว่า GBR-S, PGBR-S และ GBR-O อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากรายงานวิจัยของ Chungcharoen et al. (2015) และ Sirisoontarak et al. (2015) ระบุว่า การลดค่าความแข็งของข้าวสุกลงมีผลทำให้คะแนนการยอมรับด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองในงานวิจัยนี้ อาจกล่าวได้ว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับ GBR-I และ PGBR-I เนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสที่ อ่อนนุ่มของข้าวกล้องสุก (Cáceres et al., 2017; Srichamnong et al., 2016) นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นในเมล็ดข้าวได้อย่างรวดเร็ว อาจส่งผลทำให้ภายในเมล็ดมีช่องว่างและรูพรุนมากขึ้น ซึ่งช่วยทำให้ข้าวกล้องสุกมีความนุ่มมากขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM ซึ่งแสดงให้เห็นว่า GBR-I และ PGBR-I มีช่องว่างและรูพรุนมากกว่า GBR-S โดยปริมาณรูพรุนที่เพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องสุกมีความนุ่มมากขึ้น จากรายงานวิจัยของ Semwal and Meera (2020) พบว่า รังสีอินฟราเรดสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสตาร์ชข้าวได้ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติเชิงหน้าที่ (Functional properties) เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงเพิ่มความสามารถดูดซับน้ำและการพองตัวของสตาร์ชข้าวมากขึ้น

ผลการทดลองของค่าการยึดตัวกันเองของข้าวกล้องสุกแต่ละชนิด พบว่า การเพาะงอกมีผลทำให้ค่าการยึดตัวกันเองของ GBR ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการนึ่งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการยึดตัวกันเองของข้าวเมื่อเทียบกับการไม่นึ่งข้าว ($p > 0.05$) นอกจากนี้ค่าการยึดตัวกันเองของ GBR-I มีค่าน้อยกว่า GBR-S และ GBR-O อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเกิดจากรังสีอินฟราเรดสามารถทำลายโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของพันธะทางเคมีภายในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.7 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวก้อนและข้าวก้อนงอกสุก

Treatment ¹	Hardness (N) ²	Cohesiveness (%) ³
BR	8.23 ± 0.21 ^{bc}	31.15 ± 0.79 ^a
GBR-S	9.32 ± 0.34 ^a	28.30 ± 1.05 ^b
PGBR-S	8.91 ± 0.26 ^{ab}	27.67 ± 1.51 ^b
GBR-O	8.73 ± 0.58 ^{ab}	28.00 ± 0.42 ^b
PGBR-O	8.02 ± 0.67 ^{bc}	28.40 ± 0.30 ^b
GBR-I	7.45 ± 0.30 ^c	24.55 ± 0.78 ^c
PGBR-I	7.44 ± 0.42 ^c	26.50 ± 2.45 ^{bc}

¹ BR คือ ข้าวก้อน; GBR-S คือ ข้าวก้อนงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; PGBR-S คือ ข้าวก้อนงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; GBR-O คือ ข้าวก้อนงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; PGBR-O คือ ข้าวก้อนงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; GBR-I คือ ข้าวก้อนงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ PGBR-I คือ ข้าวก้อนงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 6 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

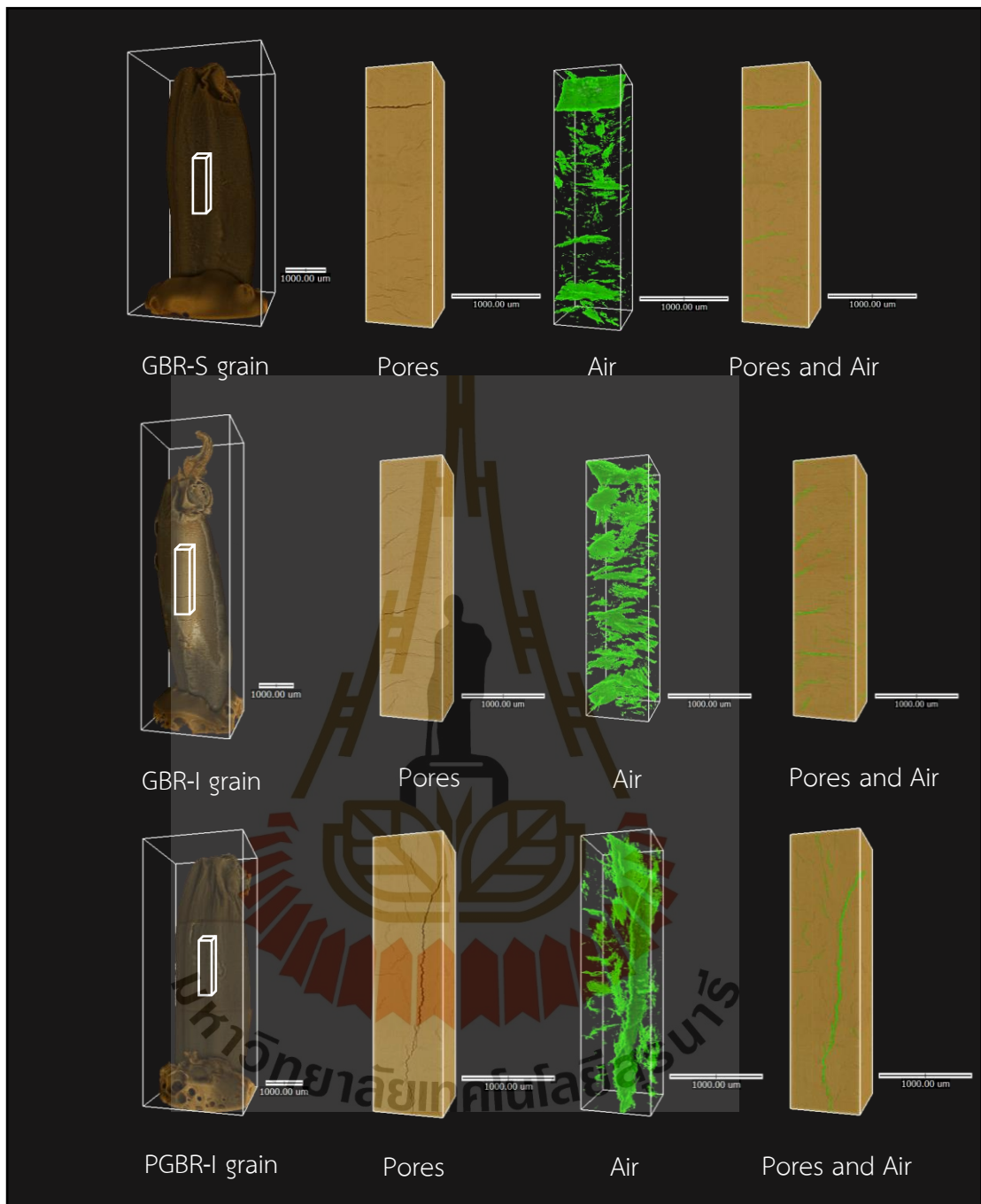
4.1.4 โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวก้อนและข้าวก้อนงอก

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติผ่านกล้องจุลทรรศน์ (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy, SR-XTM) โดยสามารถอธิบายลักษณะช่องว่าง รูพรุน และรอยร้าวบนพื้นผิวและภายในแกนของเมล็ดข้าวได้ อีกทั้ง SR-XTM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและไม่ทำลายตัวอย่างให้เสียหาย (Tiozon et al., 2020) จากรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคของ GBR-S, GBR-I และ PGBR-I โดยสีเขียวแสดงถึงอากาศภายในเมล็ดข้าว ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะรูพรุน และรอยร้าวภายในเมล็ดข้าวได้ จากผลการวิเคราะห์นี้พบว่า โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว GBR-I มีรูพรุนมากกว่า GBR-S ซึ่งอาจเกิดจากรังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นภายในเมล็ดข้าวได้อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์มากขึ้น (Semwal and Meera, 2020) อย่างไรก็ตาม PGBR-I มีลักษณะรูพรุนภายในเมล็ดข้าวน้อยกว่า GBR-I ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชข้าวจากการนึ่งช่วยเติมรอยแยกภายใน โดสเปิร์มของเมล็ดข้าว (Oil et al., 2014) ซึ่งส่งผลทำให้ลดการเกิดรูพรุนหรือช่องว่างระหว่างเซลล์ได้

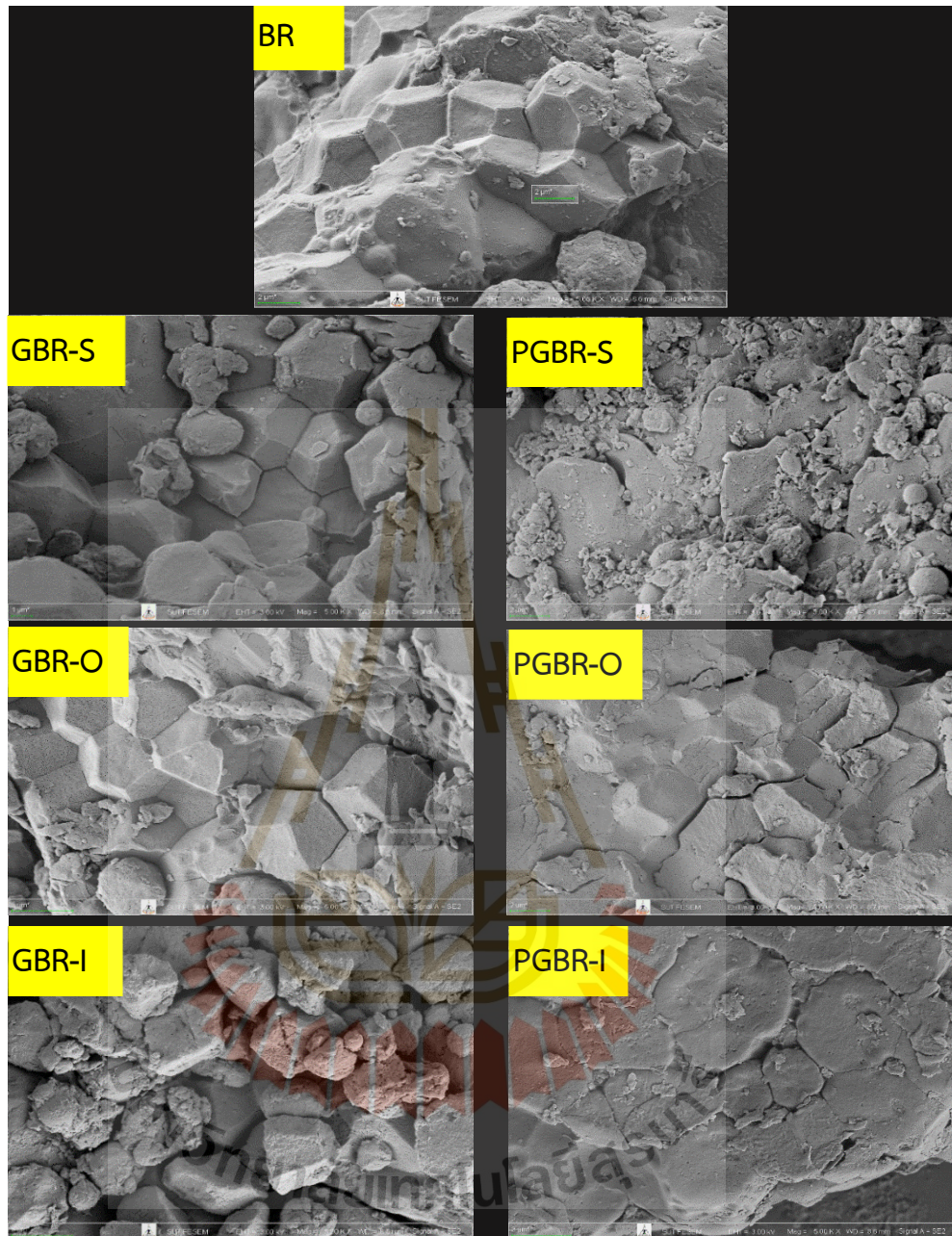
จากรูปที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด (GBR-S, GBR-O, GBR-I, PGBR-S, PGBR-O, PGBR-I) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) พบว่า โครงสร้างภายใน BR เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยม มีพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชเรียบเกะตัวกันแน่น และขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชอยู่ระหว่าง 4 – 6 μm ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chungcharoen et al. (2015) ซึ่งรายงานไว้ว่า ลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องมีรูปทรงหลายเหลี่ยมเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 3 – 5 μm จากผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ การเพาะงอกข้าวเปลือกไม่ได้ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการจัดเรียงตัว รูปร่าง พื้นผิว และขนาดเม็ดสตาร์ชดังแสดงในรูปของ GBR-S และ GBR-O เมื่อเทียบกับ BR อย่างไรก็ตามเม็ดสตาร์ชของ GBR-I มีรูปทรงที่แตกต่างเล็กน้อยและการจัดเรียงตัวกันไม่หนาแน่นหรือมีลักษณะรูพรุนมากขึ้น รวมถึงมีพื้นผิวเม็ดสตาร์ชค่อนข้างขรุขระเมื่อเปรียบเทียบกับ BR, GBR-S และ GBR-O

จาก Semwal and Meera (2020) รายงานว่า รังสีอินฟราเรดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและกายภาพของเมล็ดข้าวเนื่องจากเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาร์ชหรือทำให้เกิดรอยร้าวเนื่องจากความร้อน นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นภายในเมล็ดข้าวได้อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์มากขึ้น (Semwal and Meera, 2020) ซึ่งส่งผลทำให้เมล็ดข้าวมีความเป็นรูพรุนและเปราะมากขึ้น จากภาพ FE-SEM ของ GBR-I แสดงให้เห็นว่าช่องว่างจำนวนมากที่เกิดขึ้นในเมล็ดข้าวมีความสอดคล้องกับภาพถ่ายด้วย SR-XTM (รูปที่ 4.2)

เมื่อพิจารณาผลของการนี้ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอก พบว่า เม็ดสตาร์ชของ PGBR-S, PGBR-O และ PGBR-I มีลักษณะหลอมรวมกันและไม่พบลักษณะรูปทรงหลายเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยมซึ่งแตกต่างจาก GBR-S, GBR-O, GBR-I ทั้งนี้เนื่องมาจากการนี้ข้าวมีผลทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันและพองตัว ทำให้สูญเสียรูปทรงจากเดิม ซึ่งสอดคล้องกับ Chungcharoen et al. (2015), Bualuang et al. (2012) และ Hu et al. (2017) นอกจากนี้ Chungcharoen et al. (2015) ระบุว่า การสูญเสียรูปทรงหลายเหลี่ยมของเม็ดสตาร์ชช่วยบ่งบอกถึงการเกิดเจลาติไนเซชัน และ Hu et al. (2017) รายงานว่า การนี้จะมีผลทำให้เนื้อสัมผัสภายในเมล็ดข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชมีผิวลักษณะไม่สม่ำเสมอและเรียงตัวกันหนาแน่นมากขึ้น



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SR-XTM: (GBR-S) ขี้วกล่องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; (GBR-I) ขี้วกล่องงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ(PGBR-I) ขี้วกล่องงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (ส่วนที่เป็นสีเขียวแทนอากาศภายในเมล็ดข้าว)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย FESEM: (BR) ขี้วกล้าง; (GBR-S) ขี้วกล้างงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; (PGBR-S) ขี้วกล้างงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด; (GBR-O) ขี้วกล้างงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; (PGBR-O) ขี้วกล้างงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการใช้ตู้อบลมร้อน; (GBR-I) ขี้วกล้างงอกไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด และ (PGBR-I) ขี้วกล้างงอกผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (ระดับกำลังขยายของภาพ 5,000x)

4.1.5 สรุปผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกโดยข้าวกล้องงอกที่ได้จากการไม่นึ่ง (Non-parboiling) และการนึ่ง (Parboiling) ข้าวเปลือกงอกหลังจากกระบวนการเพาะงอกข้าว (Germination) และการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (Sun drying) การใช้ตู้อบลมร้อน (Hot-air oven drying) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเพาะงอกข้าวเปลือกมีผลทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ ปริมาณสารกาบา, α -Tocopherol และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

2. การนึ่งข้าวเปลือกงอกทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ ปริมาณสารกาบา, α -Tocopherol และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด รวมทั้งความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และการนึ่งข้าวเปลือกงอกทำให้โครงสร้างของเมล็ดสตาร์ชมีลักษณะหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่สามารถช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้นและลดการเกิดรอยร้าวของเมล็ดข้าวได้

3. การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยคงปริมาณสารกาบาและ α -Tocopherol ของข้าวกล้องงอกได้ เนื่องจากการใช้ระยะเวลาการทำแห้งสั้น นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเพิ่มรูพรุนภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวกล้องงอกสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม สอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM และ FE-SEM

4. ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีขาว (W) ของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (GBR-O) มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด (GBR-S) และรังสีอินฟราเรด (GBR-I) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5. การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR-I) และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกสุกให้มีความนุ่มมากขึ้น

ดังนั้นจากตารางที่ 4.8 สามารถสรุปผลของการศึกษาดังกล่าวในรูปแบบของตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 สรุปผลของการนิ่งและวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

Treatment	Quality alteration
การเพาะงอกข้าวเปลือก	- เพิ่มปริมาณสารกาบา α -Tocopherol และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด
การนิ่งข้าวเปลือกงอก	- เพิ่มปริมาณข้าวต้น - ลดการเกิดรอยร้าวของเมล็ดข้าว ปริมาณสารกาบา α -Tocopherol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ
การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	- เพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของ GBR-I และรุกรุนภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวกล้องงอกสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม

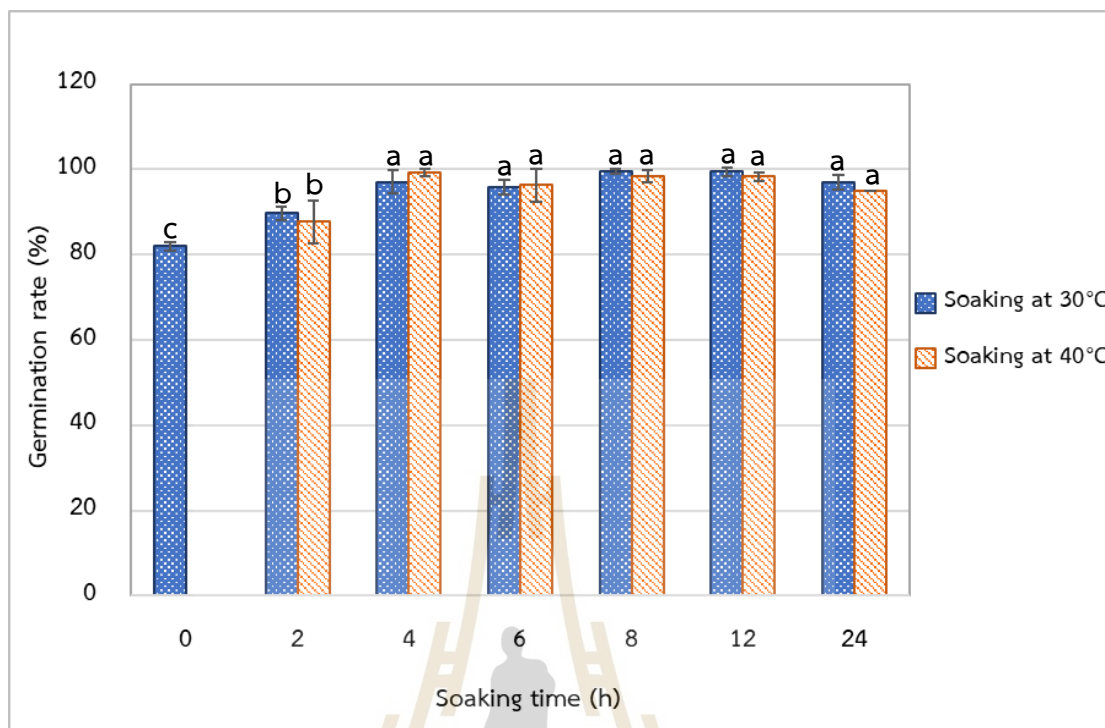
4.2 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก (GBR) โดย GBR ได้จากการเตรียมข้าวเปลือกงอกในแต่ละวิธี ได้แก่ การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศเปรียบเทียบกับการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดันต่าง ๆ จากนั้น ข้าวเปลือกได้ถูกนำมาเพาะงอกต่อภายใต้ความดันบรรยากาศ ก่อนจะนำไปทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด (Sun drying) โดยสภาวะในการเตรียมข้าวเปลือกงอกที่เหมาะสมที่สุด จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทำแห้งระหว่างวิธีการตากแดดกับการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying) ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์คุณภาพของ GBR ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี เนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM การศึกษาหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ผลของสภาวะการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก (2) ผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก และ (3) ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้องงอก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของสภาวะการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก

หัวข้อนี้ได้การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของสภาวะในการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยผลของระยะเวลาและอุณหภูมิในการแช่ข้าวเปลือกสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 4.3 โดยในการทดลองได้เลือกใช้ระยะเวลาในการแช่นาน 0, 2, 4, 6, 8, 12, และ 24 h และอุณหภูมิการแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C และ 40°C และทำการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 78 – 80% ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 48 h ซึ่งสภาวะในการ

แช่และเพาะงอกนี้ได้ดัดแปลงวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2020); Ding et al. (2018); Zhang et al. (2018); Hu et al. (2017); Sirisoontaralak et al. (2015) จากผลการทดลองพบว่า การแช่ข้าวเปลือกนาน 4 – 24 h มีผลทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีค่าระหว่าง 95.00 – 99.60% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2020) และ Cáceres et al. (2014) พบว่า การแช่ข้าวเปลือกข้าวเปลือกที่ 30°C นาน 24 h และเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C และ 34°C นาน 48 h และ 96 h ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือกระหว่าง 96.33% และ 98.00% ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ การไม่แช่ข้าวเปลือก (0 h) และแช่นาน 2 h ก่อนนำไปเพาะงอกนาน 48 h มีอัตราการงอกของข้าวเปลือกระหว่าง 82.00 – 89.67% เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการแช่ข้าวเปลือก พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 30°C เป็น 40°C ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการงอกของข้าวเปลือก ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามจากรายงานของ Sirisoontaralak et al. (2015) พบว่า การแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงกว่า (40°C) มีผลทำให้ความชื้นในข้าวสูงมากเกินไปส่งผลให้อัตราการงอกของข้าวลดลงได้ การแช่ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่อุณหภูมิ 35°C นาน 12 h จากนั้นเพาะงอกต่อที่อุณหภูมิ 25°C นาน 24 h มีผลทำให้ได้สารกาบาซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพถูกสังเคราะห์ขึ้นระหว่างการเพาะงอกข้าวมากที่สุดที่สุด (17 mg/ 100 g) แต่การเพิ่มระยะเวลาการแช่ข้าวเปลือกจาก 12 เป็น 24 h ที่อุณหภูมิ 35°C ส่งผลให้ปริมาณสารกาบาลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (7 mg/ 100 g)

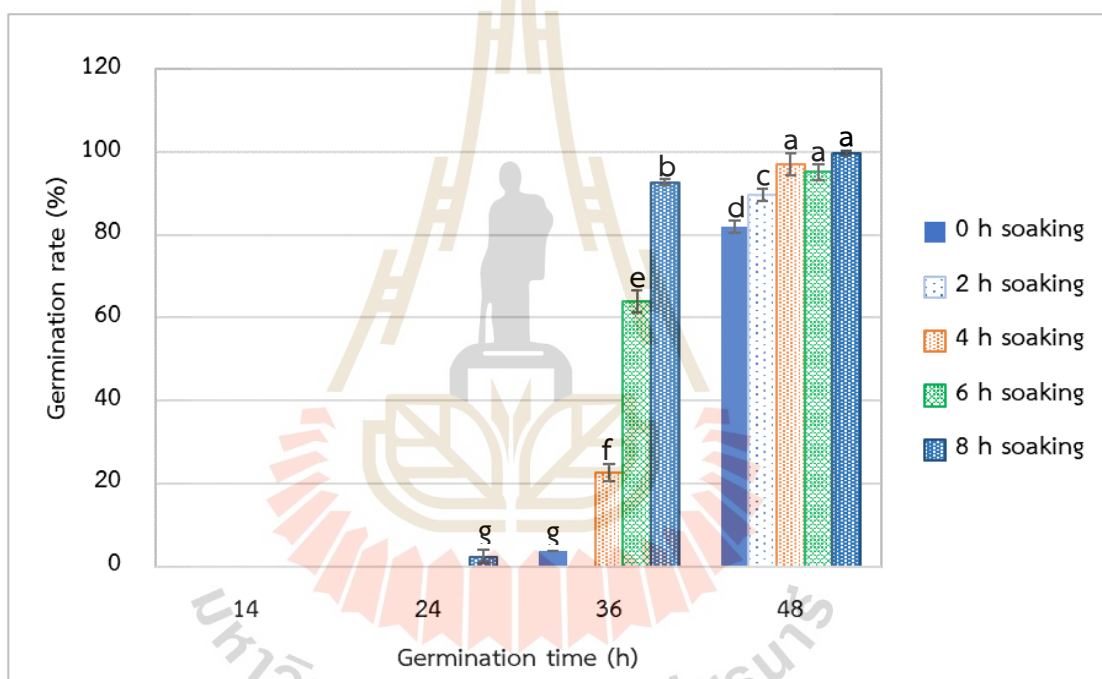


รูปที่ 4.3 ผลของสภาวะการแช่ข้าวต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกที่ระยะเวลา (Soaking time) และอุณหภูมิ (Soaking temperature) ในการแช่ข้าวเปลือก

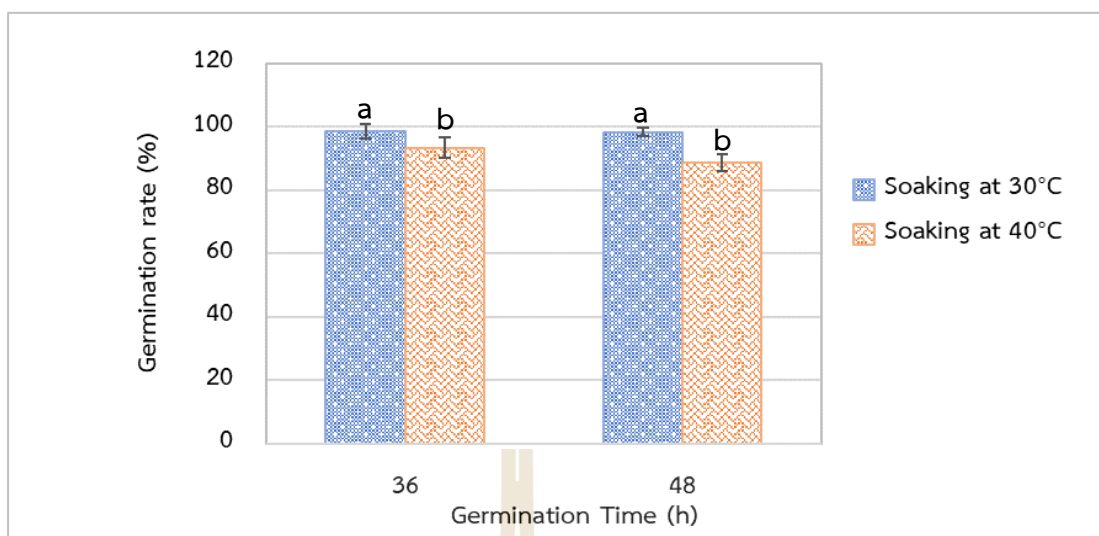
ตั้งนั้นงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาสภาวะในการแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 30°C โดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการแช่ข้าวระหว่าง 0 – 8 h และระยะเวลาในการเพาะงอกระหว่าง 14 – 48 h ที่อุณหภูมิ 30°C ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการงอกของข้าวเปลือก ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 4.4 พบว่า การแช่ข้าวเปลือกนาน 0 – 8 h และเพาะงอกนาน 14 h และ 24 h ไม่พบการงอกของข้าวเปลือก ยกเว้น การแช่ข้าวเปลือกนาน 8 h และเพาะงอกนาน 24 h ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 2.33% เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวเป็น 36 h พบว่า ข้าวเปลือกมีอัตราการงอกเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการแช่ข้าวเปลือกนาน 8 h (92.66%) เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวเป็น 48 h หลังจากการแช่ข้าวระหว่าง 0 – 8 h ทำให้ได้อัตราการงอกเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 82.00 – 99.67% จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาในการแช่ข้าว 8 h และระยะเวลาในการเพาะงอก 36 h ที่อุณหภูมิ 30°C ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 92.67% (สูงกว่า 80%) และใช้ระยะเวลาในการเตรียมข้าวเปลือกงอกสั้นที่สุด (44 h) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการแช่ข้าวรวมทั้งระยะเวลาการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก (รูปที่ 4.5) พบว่า การใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการแช่ข้าวเปลือกมีผลทำให้อัตราการงอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวจาก 36 h เป็น 48 h ที่อุณหภูมิในการแช่ข้าวเท่ากัน ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการงอก ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Sirisoontaralak et al.

(2015) นอกจากนี้ Zhang et al. (2018) รายงานว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการแช่ข้าวจาก 30°C เป็น 35°C และการเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกจาก 36 h เป็น 48 h มีผลทำให้ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกสภาวะในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกได้แก่ การแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C นาน 8 h และการเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 36 h ก่อนการทำแห้งด้วยการตากแดดและกะเทาะเปลือกเพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอก ทั้งนี้สภาวะในการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบผลของการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอกต่อไป



รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกโดยใช้ อุณหภูมิในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ 30°C



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิการแช่และระยะเวลาการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยกำหนดให้อุณหภูมิในการเพาะงอกที่ 30°C และระยะเวลาการแช่ข้าว นาน 8 h

4.2.2 ผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก

หัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก ซึ่งเปรียบเทียบการเตรียมข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C นาน 8 h และการเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 36 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ ในตารางที่ 4.9 แสดงรหัส (Code) ของตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ได้จากเตรียมในขั้นตอนการแช่ข้าว (Soaking) ที่แตกต่างกัน แต่ขั้นตอนการเพาะงอกข้าว (Germinating) ที่อุณหภูมิ 30°C นาน 36 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ เหมือนกันทุกตัวอย่าง โดยหัวข้อที่ 4.2.2.1

ศึกษาผลของสภาวะการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก และหัวข้อที่ 4.2.2.2 ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือกงอก

4.2.2.1 ผลของสภาวะการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก

ในการศึกษานี้ได้ศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือกเพื่อกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือก โดยระดับความดันที่ใช้คือ 2 และ 4 bar เป็นเวลา 0, 1.5, 2, 2.5 และ 3 h อุณหภูมิ 30°C ก่อนนำข้าวเปลือกไปเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 24, 36, 48, และ 60 h ภายใต้ความดันบรรยากาศและควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 78 – 80% ดังแสดงผลอัตราการงอกของข้าวเปลือกในรูป 4.6 จากผลการทดลองพบว่า ความดันไฮโดรสแตติกที่ระ

ดับ 2 และ 4 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 0 – 3 h และเพาะงอกนาน 24 h นั้นมีผลในกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกซึ่งให้ค่าอัตราการงอกระหว่าง 5 – 17% เมื่อเปรียบเทียบกับ การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศนาน 8 h และเพาะงอกนาน 24 h มีค่าอัตราการงอก 2.33% และการแช่ข้าว นาน 2 h และเพาะงอกนาน 36 ไม่พบอัตราการงอกของข้าวเปลือก (รูปที่ 4.4) ผลการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกทั้ง 2 และ 4 bar แช่ข้าว นาน 1.5 – 3 h สามารถกระตุ้น การงอกของข้าวเปลือกหลังจากเพาะงอกนาน 24 h และ 36 h ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความดันไฮโดรสแตติกส่งผลให้ความดันภายในและภายนอกเมล็ดข้าวแตกต่างกัน ซึ่งทำให้เกิดรูระหว่างเซลล์และ เม็ดสตาρχทำให้มีการดันน้ำเข้าไปภายในเมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น (Wu et al., 2020) ซึ่งมีผลไปเร่ง กระบวนการทางเคมีเกี่ยวกับการสร้างและสลายโมเลกุลและสารประกอบที่เกิดขึ้นภายในเซลล์หรือเมตาบอลิซึม (Metabolism) ระหว่างกระบวนการเพาะงอก ทำให้เกิดการสังเคราะห์ทางชีวภาพภายใน เมล็ดพืชได้ (Xia and Li, 2018)

เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวเปลือกจาก 24 h เป็น 36, 48, และ 60 h (รูปที่ 4.6) พบว่า อัตราการงอกของข้าวเปลือกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกทั้ง 2 และ 4 bar มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบระดับความดันต่อการงอกของข้าวเปลือก พบว่า การใช้ความดันที่ระดับ 2 bar ในการแช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และ 3 h และเพาะงอกนาน 36 h มีผลทำให้ได้ค่าอัตราการงอกของข้าวเปลือก (80.20 และ 73.63%) สูงกว่าการใช้ความดันที่ระดับ 4 bar (54.25 และ 29.67%) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และ การใช้ความดันที่ระดับ 2 bar ในการ แช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกนาน 48 h มีผลทำให้ได้ค่าอัตราการงอกของข้าวเปลือก (94.83%) สูงกว่าการใช้ความดันที่ระดับ 4 bar (71.00%) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจากระดับความดันที่สูงขึ้นมีผลทำลายโครงสร้างของเซลล์ตัวอ่อน (Embryo cells) และ รบกวนกระบวนการสร้างโปรตีนของ Gene expression ในการสร้างรากของเมล็ดได้ (Xia and Li, 2018; Liu et al., 2008) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xia and Li (2018) ที่พบว่า การเพาะงอกข้าว ที่ไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกนาน 52 h ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวกล้องเท่ากับ 95% แต่ การปรับสภาพข้าวกล้องก่อนกระบวนการเพาะงอกด้วยความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 30, 60 และ 90 MPa (300, 600, และ 900 bar) นาน 5 min มีผลทำให้เกิดการชะลอการงอกของข้าวกล้องงอก โดยทำให้ได้อัตราการงอกหลังสิ้นสุดกระบวนการเพาะงอกอยู่ระหว่าง 65 – 76% ทั้งนี้ยังเพิ่มระดับ ความดันยังมีผลทำให้อัตราการงอกลดลง แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสารกาบาและปริมาณสารออกฤทธิ์ ทางชีวภาพอื่น ๆ เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสภาวะความเครียดจากความดันไฮโดรสแตติก (Kim et al., 2017) ทั้งนี้หากเมล็ดพืชได้รับความเครียดจากความดันภายนอกมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวิถี การสังเคราะห์ทางชีวภาพและการสลายสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน และสตาρχ เป็นต้น ซึ่งถูกปรับเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่เนื่องจากพันธะทางเคมีต่าง ๆ ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน

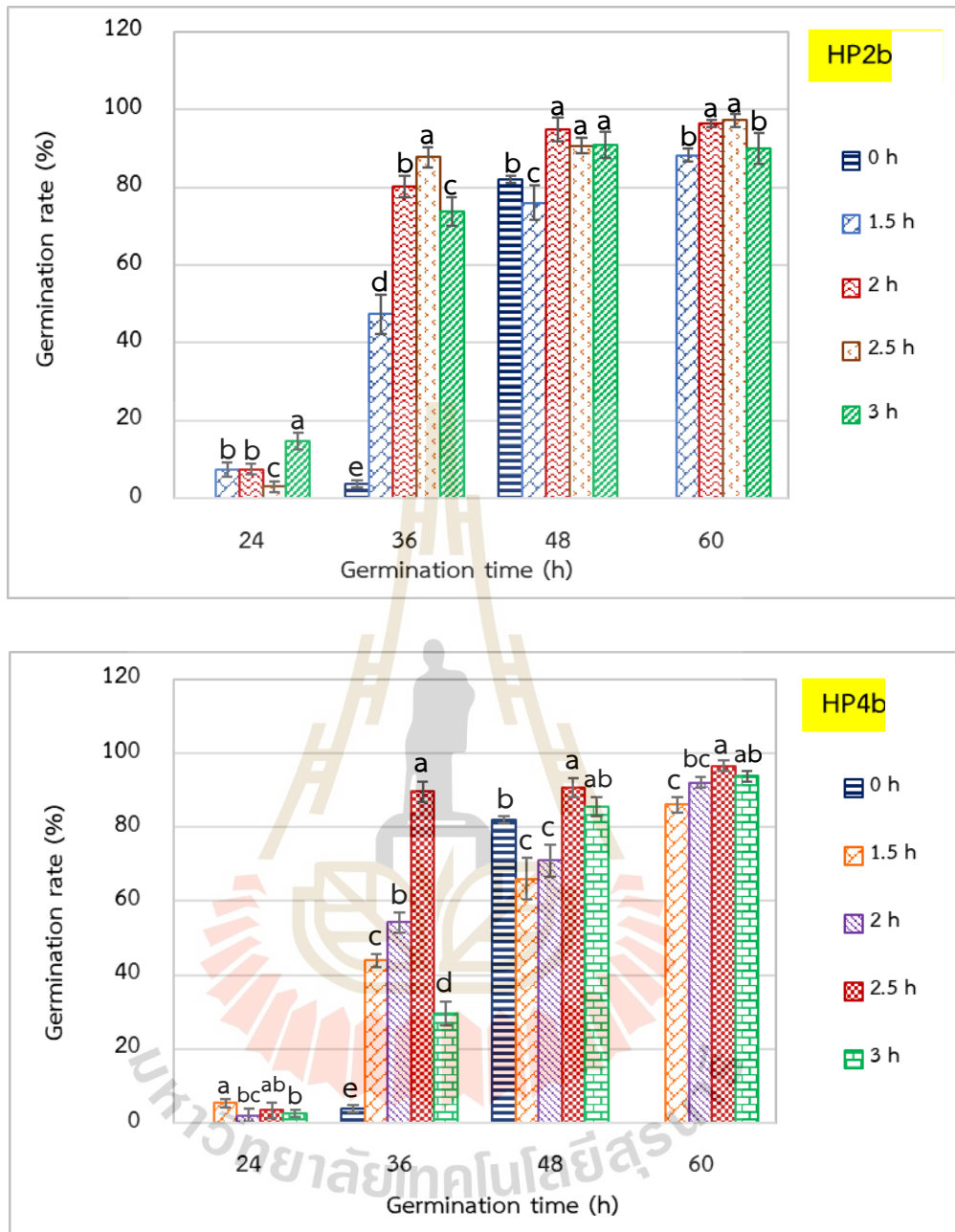
(Hydrogen bond) ไอออนิก (Ionic bond) และไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interaction) วัตถุประสงค์ของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน และมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเมล็ดพืชได้ (Xia and Li, 2018; Ding et al., 2021) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ พบว่า การเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวเป็นเวลา 60 h ระดับความดันทั้ง 2 และ 4 bar ที่ใช้ในการแช่ข้าวด้วยระยะเวลาเท่ากัน ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือกไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าวนาน 2 h และเพาะงอกต่อ 36 h ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 80.20% (สูงกว่า 80%) โดยใช้ระยะเวลาในการเตรียมข้าวเปลือกงอกสั้นที่สุด (38 h) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้เลือกสภาวะในการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกนี้ (2 bar, 2 h) เพื่อนำมาศึกษาอัตราการงอกของข้าวเปลือก (รูปที่ 4.7) การดูดซับความชื้นของข้าวเปลือกงอกระหว่างการแช่ข้าว (หัวข้อ 4.2.2 รูปที่ 4.8 และ 4.9) และคุณภาพของข้าวกล้องงอก (หัวข้อ 4.2.3) โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 4 bar แช่ข้าวนาน 2 h และเพาะงอกต่อ 36 h (4 bar, 2 h) และการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C นาน 8 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ และการเพาะงอกต่อ 36 h (ตัวอย่างควบคุม)

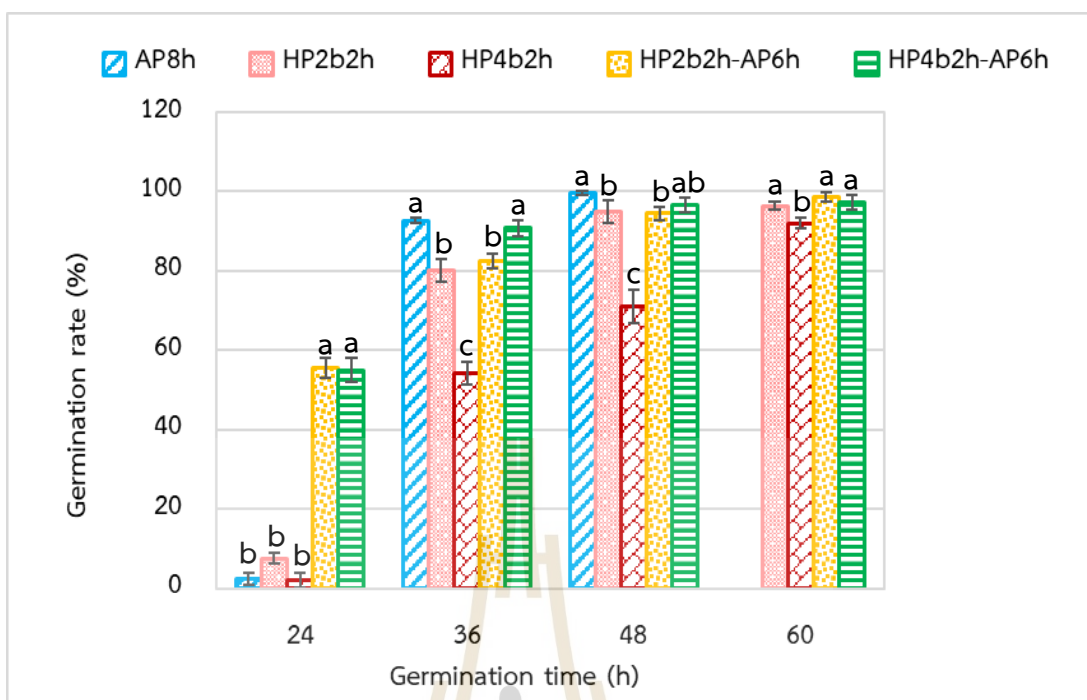
ตารางที่ 4.9 รหัสชื่อตัวอย่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด

Treatment ¹	Code
Brown rice	BR
Soaking 30°C (8 h)	AP8h
2 bar (2 h), soaking 30°C	HP2b2h
4 bar (2 h), soaking 30°C	HP4b2h
2 bar (2 h) extend 6 h, soaking 30°C	HP2b2h-AP6h
4 bar (2 h) extend 6 h, soaking 30°C	HP4b2h-AP6h
2 bar (2 h), soaking 30°C, germinated 36 h-I	HP2b2h-I

¹ BR คือ ข้าวกล้อง; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h; HP2b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h; HP4b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด; ข้าวกล้องงอกทุกอย่างหลังจากการแช่ข้าวจะถูกเพาะงอกอุณหภูมิ 30°C นาน 36 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ



รูปที่ 4.6 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกที่ระดับความดัน 2 bar (HP2b) และ 4 bar (HP4b) ต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยใช้อุณหภูมิการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ 30°C ระยะเวลาแช่ข้าว นาน 0 – 3 h และเพาะงอกข้าว นาน 24 – 60 h



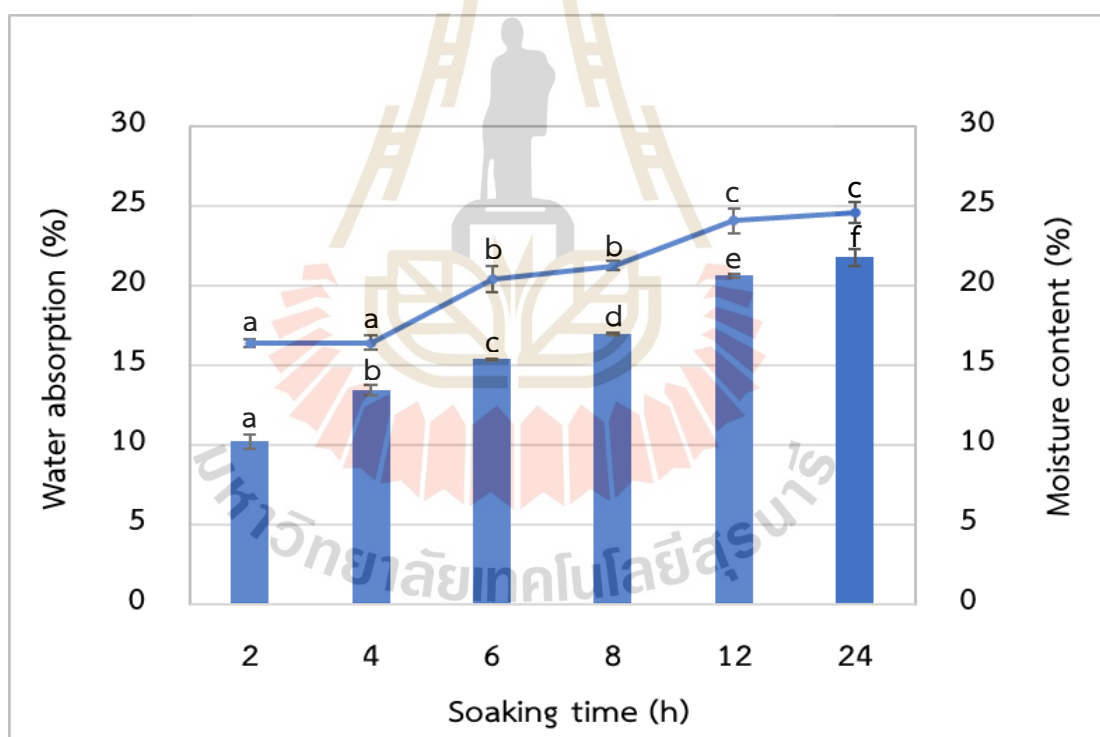
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของสภาวะในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก โดยใช้อุณหภูมิการแช่และการเพาะงอกข้าวเปลือกที่ 30°C

รูปที่ 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบสภาวะที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก พบว่า ข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการแช่นาน 8 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) และเพาะงอกต่อ 24 h มีอัตราการงอกต่ำมาก แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกเป็น 36 – 60 h พบว่า อัตราการงอกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราการงอกของข้าวเปลือกจากการเพาะงอกนาน 36 – 48 h ไม่แตกต่างกัน (92.67 – 99.60%) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก พบว่าระดับความดัน 2 และ 4 bar นาน 2 h (HP2b2h และ HP4b2h) ทำให้ได้อัตราการงอกต่ำกว่าการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) หลังจากการเพาะงอกนาน 36 – 48 h และเมื่อระดับความดันเพิ่มขึ้น (HP4b2h) มีผลทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความดันมีผลทำลายโครงสร้างของเซลล์และสลายสารชีวโมเลกุลรวมทั้งพันธะทางเคมีต่าง ๆ ซึ่งอาจไปชะลอเมตาบอลิซึม (Metabolism) ที่เกิดระหว่างกระบวนการเพาะงอกส่งผลทำให้การสร้างรากของเมล็ดช้าลง และระดับความดันสูงขึ้นยิ่งมีผลต่อการลดอัตราการงอกของข้าวเปลือก (Kim et al., 2017; Xia and Li, 2018) แต่อย่างไรก็ตามการใช้ความดันไฮโดรสแตติก 2 และ 4 bar นาน 2 h และนำไปแช่ข้าวเปลือกต่อที่สภาวะความดันบรรยากาศอีก 6 h

(ระยะเวลาแช่ข้าวรวม 8 h) (HP2b2h-AP6h และ HP4b2h-AP6h) พบว่า อัตราการงอกของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นหลังจากการเพาะงอก 24 h (55.00 – 55.40%) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มระยะเวลาการแช่ข้าวอีก 6 h และช่องว่างระหว่างเซลล์อันเนื่องมาจากผลของการใช้ความดันช่วยทำให้น้ำซึมเข้าไปภายในเมล็ดข้าวได้มากขึ้น ส่งผลให้กระบวนการสร้างรากของเมล็ดได้เร็วมากขึ้น

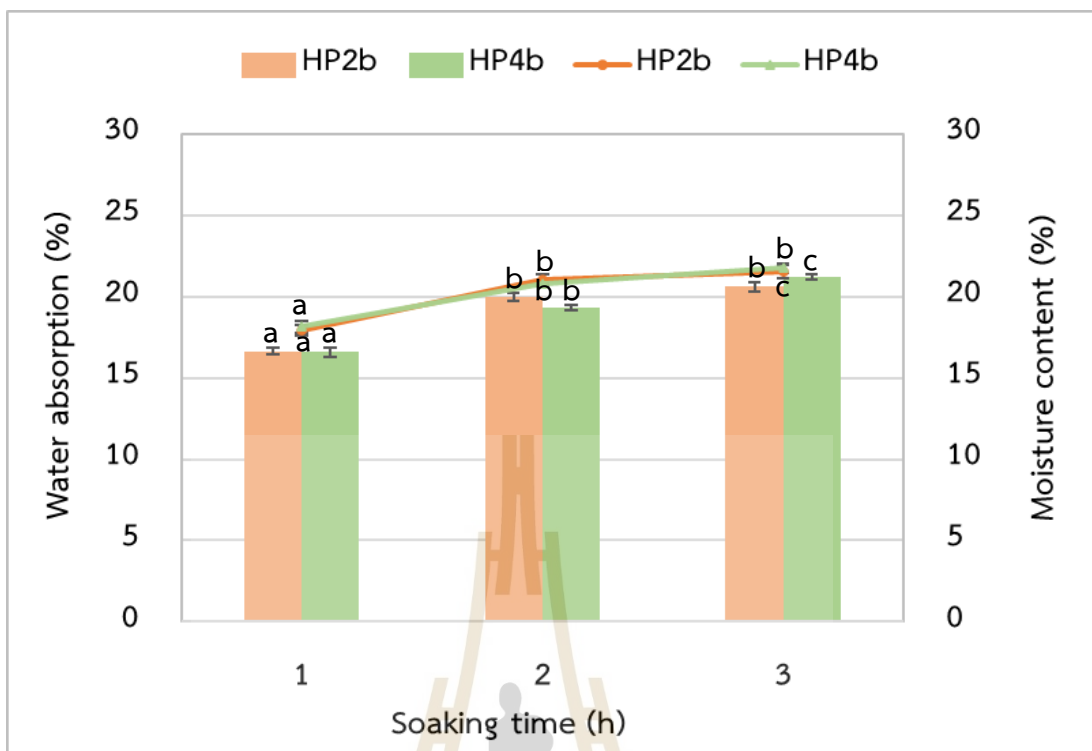
จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar นาน 2 h (HP2b2h และ HP4b2h) ทำให้ได้อัตราการงอกต่ำกว่าการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) หลังจากการเพาะงอกนาน 36 – 48 h และเมื่อระดับความดันเพิ่มขึ้น (HP4b2h) มีผลทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือกลดลง และการเพิ่มระยะเวลาแช่ข้าวเปลือกอีก 6 h หลังจากการแช่ข้าวโดยการใช้ความดัน (HP2b2h-AP6h และ HP4b2h-AP6h) มีผลกระทบต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกได้ดีเมื่อระยะเวลาการเพาะงอก 24 h

4.2.2.2 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือก



รูปที่ 4.8 ผลของระยะเวลาในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำ (Bar) และความชื้น (Lines) ของข้าวเปลือก โดยอุณหภูมิการแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C นาน 2 – 24 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อปริมาณการดูดซับน้ำของข้าวเปลือกงอก โดยรูปที่ 4.8 แสดงปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกหลังการแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C เป็นเวลานาน 2 – 24 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ พบว่า ปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าอยู่ระหว่าง 10.22 – 21.80% และ 16.40 – 24.40% ตามลำดับ การเพิ่มระยะเวลาการแช่ข้าวมีผลทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลการทดลองนี้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chen et al. (2016) ซึ่งพบว่า กับข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีการดูดซับความชื้นหลังจากแช่น้ำนาน 24 h เท่ากับ 26.6% และเมื่อเทียบกับการใช้พลาสมาความดันต่ำ (Low-pressure plasma) ในการปรับสภาพข้าวกล้องก่อนนำไปเพาะงอก พบว่า ข้าวกล้องมีอัตราการงอกสูงขึ้น โดยข้าวกล้องมีการดูดซับความชื้น (น้ำ) สูงสุด 30.2% หลังจากแช่น้ำนาน 24 h นอกจากนี้ Shittue et al. (2012) รายงานว่า อัตราการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเปลือกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่แช่โดยอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อัตราการดูดซับน้ำของเมล็ดข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 30°C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาการแช่ระหว่าง 0 – 50 นาที จากนั้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการแช่พบว่า อัตราการดูดซับน้ำค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งคงที่หลังจากแช่ข้าวเปลือกนาน 150 นาที



รูปที่ 4.9 ผลของระยะเวลาในการแช่ข้าวต่อปริมาณการดูดซับน้ำ (Bar) และความชื้น (Lines) ของข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดัน 2 และ 4 bar โดยอุณหภูมิการแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C นาน 1, 2 และ 3 h

รูปที่ 4.9 ปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกหลังการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 และ 4 bar ที่ 30°C นาน 1, 2 และ 3 h พบว่า ปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าอยู่ระหว่าง 16.63 – 21.23% และ 18.13 – 21.77% ตามลำดับ โดยระดับความดันที่ต่างกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับน้ำและความชื้นของข้าวเปลือกหลังจากแช่ข้าวด้วยระยะเวลาเท่ากัน ($p > 0.05$) จากผลการทดลองนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การแช่ข้าวเปลือกที่ 30°C เป็นเวลานาน 2 – 24 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ (รูปที่ 4.8) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ช่วยทำให้ข้าวเปลือกดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความดันไฮโดรสแตติกทำให้ความดันภายในและภายนอกเมล็ดข้าวมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดรูหรือช่องว่างระหว่างเซลล์และระหว่างเม็ดสตาร์ชได้ ทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายในเมล็ดข้าวได้ง่ายขึ้น (Wu et al., 2020) นอกจากนี้ Wu et al. (2020) ได้ศึกษาการใช้ความดันสูงในการแช่ข้าวกล้อง พบว่า เมื่อเพิ่มความดันในการแช่ข้าวจาก 0.1 ถึง 200 MPa (1 – 2000 bar) อัตราการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงระดับความดัน 300 MPa (3,000 bar) อัตราการ

ดูดซับน้ำลดลง อย่างไรก็ตามความดันที่เพิ่มขึ้นสามารถลดระยะเวลาการหุงข้าวลง รวมทั้งลดค่าความแข็งของข้าวสุกได้ เนื่องจากการเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์และเม็ดสตาร์ชนั่นเอง

4.2.3 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

หัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h และ HP4b2h) ต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก ซึ่งเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C นาน 8 h และการเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C นาน 36 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) โดยในขั้นตอนการเพาะงอกข้าว (Germinating) ของทุกตัวอย่างใช้อุณหภูมิ 30°C นาน 36 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ ในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี เนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM

4.2.3.1 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด ปริมาณข้าวต้น และรอยร้าวของข้าวกล้องงอก

จากงานวิจัยของ Ding et al. (2015) พบว่า ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ปริมาณข้าวต้น (Head rice yield, HRY) และปริมาณรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอกสามารถบ่งบอกถึงคุณภาพของวิธีการผลิตข้าวกล้องงอกได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ผลเปลี่ยนแปลงของ TRY, HRY และ FG ของข้าวกล้องงอกที่ได้จากการผลิตในแต่ละวิธีโดยเปรียบเทียบกับ TRY, HRY และ FG ของข้าวกล้องธรรมดา (BR) โดยตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณผลผลิตทั้งหมด (TRY) และรอยร้าว (FG) ซึ่งพบว่า ข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกที่ได้จากวิธีการเตรียมข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ภายในสภาวะความดันบรรยากาศ และความดันไฮโดรสแตติก มีค่า TRY และ FG อยู่ระหว่าง 55.40 – 73.76% และ 4.50 – 14.40% ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า BR มีค่า TRY สูงสุดเท่ากับ 73.76% ส่วนการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bar ระหว่างการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h) มีผลช่วยให้ TRY สูงกว่าที่ความดัน 4 bar อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) ทำให้ได้ TRY ใกล้เคียงกับการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก อย่างไรก็ตาม TRY ของข้าวกล้องงอกที่ได้จากงานวิจัยนี้ (55.40 – 62.95%) มีค่าต่ำกว่าจากงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) ที่มีค่า TRY ของข้าวกล้องงอกอยู่ระหว่าง 69.32 – 69.97% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวิธีการเพาะงอกข้าวเปลือกที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อค่า TRY

จากงานวิจัยของ Clossen et al. (2003) รายงานว่า FG ภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวเกิดการแตกหักระหว่างการกะเทาะเปลือกมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณข้าวต้น (HRY) มีค่าลดลง และมีผลต่อการลดคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก อย่างไรก็ตามเมล็ดข้าวที่มีรอยร้าวบางส่วนอาจไม่เกิดการแตกหักระหว่างการกะเทาะเปลือกข้าว ในงานวิจัยนี้ พบว่า FG ของ BR มี

ค่าต่ำสุด (4.50%) โดยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้เมล็ดข้าวเกิดรอยร้าวมากกว่าการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar ในการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7.71 – 11.60% โดยระดับความดัน 4 bar ในการแช่ข้าวเปลือก (HP4b2h) และเพาะงอกนาน 36 และ 48 h มีผลทำให้ FG สูงกว่า HP2b2h ที่เพาะงอกนาน 36 h อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความดันไฮโดรสแตติกที่สูงกว่ามีผลทำให้โครงสร้างของเซลล์เสียหายและเกิดช่องว่างระหว่างเซลล์และระหว่างเม็ดสตาร์ชซึ่งมีผลต่อการเกิดรอยร้าวภายนอกและภายในเมล็ดข้าวได้

ตารางที่ 4.10 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) และรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Germination time (h)	Parameters	
		TRY (%) ²	FG (%) ³
BR	-	73.76 ± 0.22 ^a	4.50 ± 0.58 ^d
	36	60.43 ± 6.36 ^{bc}	13.40 ± 1.34 ^a
AP8h	48	57.38 ± 3.09 ^{bc}	14.40 ± 0.55 ^a
	36	62.95 ± 1.67 ^b	7.71 ± 1.51 ^c
HP2b2h	48	61.12 ± 1.22 ^{bc}	11.60 ± 2.88 ^b
	36	55.40 ± 3.84 ^c	12.91 ± 2.65 ^{ab}
HP4b2h	48	56.40 ± 4.52 ^c	12.17 ± 3.06 ^{ab}

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 และ 48 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดทุกตัวอย่าง

^{2,3} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.11 ปริมาณข้าวต้น (Head rice yield, HRY) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	HRY (%) ²
BR	56.28 ± 1.06 ^b
AP8h	52.56 ± 1.88 ^c
HP2b2h	62.82 ± 0.01 ^a
HP4b2h	54.01 ± 2.12 ^{bc}

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดทุกตัวอย่าง

² ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณ HRY ของ BR และข้าวกล้องงอก ซึ่งพบว่า BR มี HRY เท่ากับ 56.28% ส่วน AP8h, HP2b2h และ HP4b2h มีค่า HRY อยู่ระหว่าง 52.56, 62.82, และ 54.01% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณ HRY สอดคล้องกับ Chatchavanthatri (2021), Borompichaichartkul et al. (2007), Ding et al. (2015) และ Tumpanuvat et al. (2018) ใน การวิจัยนี้การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar ในการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h) ช่วยทำให้ได้ HRY สูงกว่าการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) และการใช้ความดัน 4 bar ในการ แช่ข้าวเปลือก (HP4b2h) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลของปริมาณ HRY ของข้าวกล้องงอก สอดคล้องกับปริมาณ FG (ตารางที่ 4.9) ทั้งนี้ FG ภายในเมล็ดข้าวอาจเพิ่มการแตกหักของเมล็ดข้าว ระหว่างการกะเทาะเปลือกทำให้ปริมาณ HRY มีค่าลดลง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การ เพาะงอกข้าวเปลือกมีผลทำให้ TRY ลดลง และค่า FG เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อ เปรียบเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา แต่การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar ในการแช่ ข้าวเปลือก (HP2b2h) ก่อนการเพาะงอกนาน 36 h ทำให้ได้ HRY สูงที่สุด

4.2.3.2 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก

จากงานวิจัยของ Chatchavanthatri (2021) รายงานว่า สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) ช่วยส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภคและช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Free radicals) ซึ่งพบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้องงอกสูงกว่าใน ข้าวกล้องธรรมดา ได้แก่ สารกาบา สาร γ -Oryzanol สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสารต้าน อนุมูลอิสระอื่น ๆ เนื่องจากกระบวนการทางเคมีเกี่ยวกับการสร้างและสลายโมเลกุลและสารประกอบ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ขึ้นระหว่างกระบวนการเพาะงอก ทำให้เกิดการสังเคราะห์ทางชีวภาพภายใน

เมล็ด (Sirisoontaralak et al., 2015; Xia and Li, 2018; Huang et al., 2020; Xia et al., 2022) นอกจากนี้ ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพถูกสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น หากเมล็ดพืชได้รับความเครียดจากภายนอก เช่น ความดัน การขาดออกซิเจน ความแห้งแล้ง อุณหภูมิ และความเค็ม เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในวิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพและการสลายสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมัน และสตาร์ช เป็นต้น (Kim et al., 2017; Wang et al., 2018)

จากตารางที่ 4.12 แสดงผลปริมาณสารกาบา และสาร γ -Oryzanol ของข้าวกล้องธรรมชาติ (BR) และข้าวกล้องงอกที่ได้จากวิธีการเตรียมข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ภายในสภาวะความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติก พบว่า ปริมาณสารกาบาของ BR มีค่าเท่ากับ 1.08 mg/100 g ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของ Chatchavanthatri (2021) (1.16 mg/100 g) และ Jongyingcharoen and Cheevitsopon (2016) (1.31 mg/100 g) ในงานวิจัยนี้พบว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาระหว่าง 11.67 – 13.31 mg/100 g โดยปริมาณสารกาบาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาทางชีวเคมี (Biochemical reaction) และการสังเคราะห์สารกาบาระหว่างการเพาะงอก (Sirisoontaralak et al., 2015; Huang et al., 2020) ปริมาณสารกาบามีค่าใกล้เคียงกับ Chatchavanthatri (2021) (13.59 mg/100 g) และ Jongyingcharoen and Cheevitsopon (2016) (11.08 – 19.71 mg/100 g)

เมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการแช่ข้าวต่อปริมาณสารกาบา พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar ในการแช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกนาน 36 h (HP2b2h และ HP4b2h) มีผลทำให้สารกาบาในข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ AP8h ($p > 0.05$) แต่การเพิ่มระยะเวลาแช่ข้าวเปลือกอีก 6 h ของตัวอย่าง HP2b2h-AP6h และ HP4b2h-AP6h พบว่า ปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ AP8h ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวเป็น 48 h ในทุกตัวอย่าง พบว่า ปริมาณสารกาบาลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2018) ที่รายงานว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการแช่ข้าวจาก 30°C เป็น 35°C และการเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกจาก 36 h เป็น 48 h มีผลทำให้ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกลดลง จากงานวิจัยของ Xia and Li (2018) พบว่า ข้าวกล้องงอกได้จากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกก่อนการเพาะงอกมีปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบการไม่ใช้ความดันร่วมด้วย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความเครียดจากความดันที่เมล็ดข้าวได้รับ ทำให้มีการปรับตัวและเกิดการสังเคราะห์สารทางชีวภาพและมีการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Wang et al., 2018; Xia et al., 2022) นอกจากนี้ Huang et al. (2020) รายงานว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติก (300 MPa, 10 min) ในกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องทำให้มีปริมาณสารชีวภาพพร้อมใช้ (Bio-accessibility) ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย

(Resistant starch) และกรดอะมิโนอิสระเพิ่มมากขึ้น โดยการใช้ความดันไฮโดรสแตติกมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาของเอนไซม์และเร่งการสังเคราะห์สารชีวภาพ โดยเฉพาะสารกาบา นอกจากนี้ความดันไฮโดรสแตติก (50 MPa, 20 min) ทำให้ปริมาณสารกาบาเพิ่มมากขึ้น 25% ในข้าวกล้องงอก

ตารางที่ 4.12 ปริมาณสารกาบา (GABA) และปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol) ของข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	GABA (mg/100 g) ²		γ -Oryzanol (mg/100 g) ³	
	36-h Germination	48-h Germination	36-h Germination	48-h Germination
BR	1.08 ± 0.15 ^c	1.08 ± 0.15 ^c	47.47 ± 1.76 ^c	47.47 ± 1.76 ^d
AP8h	11.67 ± 0.76 ^b	7.38 ± 0.16 ^b	51.95 ± 0.89 ^{bc}	55.71 ± 1.04 ^c
HP2b2h	12.83 ± 0.72 ^{ab}	10.29 ± 0.71 ^a	58.11 ± 0.66 ^a	60.22 ± 2.80 ^{bc}
HP4b2h	12.11 ± 0.03 ^{ab}	11.32 ± 0.41 ^a	60.40 ± 1.58 ^a	64.78 ± 2.70 ^{ab}
HP2b2h-AP6h	13.31 ± 0.60 ^a	10.39 ± 0.39 ^a	61.63 ± 4.40 ^a	61.31 ± 0.63 ^{abc}
HP4b2h-AP6h	13.10 ± 0.33 ^a	10.26 ± 0.60 ^a	55.67 ± 2.56 ^{ab}	67.19 ± 3.64 ^a

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h; HP2b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h; HP4b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 และ 48 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดทุกตัวอย่าง

^{2,3} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ BR มีค่าเท่ากับ 47.47 mg/100 g (ตารางที่ 4.12) ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Srichamnong et al. (2016) ที่พบว่า BR ของข้าวพันธุ์ KDML105 มีค่า 50 mg/100 g ในงานวิจัยนี้พบว่า การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีปริมาณสาร γ -Oryzanol เมื่อเพาะงอกนาน 36 และ 48 h (55.67 – 61.63 mg/100 g และ 55.71 – 67.19 mg/100 g ตามลำดับ) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับ BR

อย่างไรก็ตามการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณสาร γ -Oryzanol เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (51.95 mg/100 g) เมื่อเทียบกับ BR จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar ในการแช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกนาน 36 h (HP2b2h และ HP4b2h) มีผลทำให้สาร γ -Oryzanol ปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก ความดันไฮโดรสแตติกมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาของเอนไซม์ และเร่งการสังเคราะห์สารชีวภาพ รวมทั้งช่วยทำให้การสังเคราะห์สารชีวภาพและเกิดการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเมล็ดพืช ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพทางคุณค่าทางโภชนาการให้กับเมล็ดที่ผ่านการเพาะงอก (Huang et al., 2020; Xia et al., 2022) ปริมาณสาร γ -Oryzanol ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับ Srichamnong et al. (2016) ที่มีปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ PGBR (KDML105) เท่ากับ 60 mg/100 g แต่ต่ำกว่าของ Moonngarm & Saetung (2010) ที่รายงานว่ามีปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ PGBR (RD-6) เท่ากับ 84 mg/100 g

ตารางที่ 4.13 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Total phenolic compounds ² (mg GA/g)	
	36-h Germination	48-h Germination
BR	0.37 ± 0.04 ^c	0.37 ± 0.04 ^c
AP8h	0.46 ± 0.03 ^{abc}	0.51 ± 0.02 ^b
HP2b2h	0.51 ± 0.01 ^{ab}	0.51 ± 0.04 ^b
HP4b2h	0.50 ± 0.01 ^{ab}	0.68 ± 0.01 ^a
HP2b2h-AP6h	0.53 ± 0.09 ^a	0.54 ± 0.02 ^b
HP4b2h-AP6h	0.41 ± 0.03 ^{bc}	0.35 ± 0.02 ^c

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h; HP2b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h; HP4b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 และ 48 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดทุกตัวอย่าง

² ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกที่ได้จากวิธีการเตรียมข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ภายในสภาวะความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติก พบว่า ผลวิเคราะห์ TPC เมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน Gallic acid มีค่าอยู่ระหว่าง 0.37 – 0.68 mg GA/g โดยข้าวกล้องงอกที่ผ่านการเพาะงอกนาน 36 h และ 48 h มี TPC ระหว่าง 0.46 – 0.53 mg GA/g และ 0.35 – 0.68 mg GA/g ตามลำดับ ปริมาณ TPC ที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าจาก Moongngarm & Saetung (2010) ที่พบว่า BR และ ข้าวกล้องงอก มีปริมาณสาร TPC เท่ากับ 0.703 และ 0.843 mg GA/g ตามลำดับ และ Chatchavanthatri et al. (2021) พบว่า BR และ ข้าวกล้องงอก มีปริมาณสาร TPC เท่ากับ 0.67 และ 0.88 0.843 mg GA/g ตามลำดับ แต่ปริมาณ TPC ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tumpanuvat et al. (2018) ที่มีปริมาณ TPC อยู่ระหว่าง 0.31 – 0.46 mg GA/g อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กระบวนการเพาะงอกข้าว โดยแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก (HP2b2h และ HP4b2h) และเพาะงอกนาน 36 h มีผลทำให้ปริมาณ TPC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา (BR) ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกจาก 36 h เป็น 48 h พบว่า ปริมาณ TPC ไม่เปลี่ยนแปลง ยกเว้น HP4b2h ทำให้ TPC เพิ่มขึ้น และ HP4b2h-AP6h มีผลทำให้ TPC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จาก Cáceres et al. (2014) รายงานว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยผนังเซลล์ด้วยเอนไซม์ระหว่างการเพาะงอก ซึ่งส่งผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกที่ยึดกับผนังเซลล์สามารถหลุดออกมาได้ นอกจากนี้ Kim et al. (2017) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวที่ระดับความดันระหว่าง 0.1 – 100 MPa (1 – 1,000 bar) ที่อุณหภูมิ 37°C นาน 24 h มีผลทำให้ TPC เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพาะงอกข้าวและความดันไฮโดรสแตติกทำให้เกิดการรวมตัวกันของสารประกอบฟีนอลิก โดยความดันไฮโดรสแตติกเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสาร ส่งผลให้เพิ่มการเคลื่อนที่ของตัวทำละลาย (น้ำ) ไปยังเซลล์โดยผ่านช่องว่างระหว่างผนังเซลล์ซึ่งทำให้การซึมผ่านของตัวทำละลาย (น้ำ) ได้ดีขึ้น ซึ่งมีผลเร่งการสังเคราะห์สารชีวภาพและเกิดการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเมล็ดพืช และ Lee et al. (2019) การใช้ความดันไฮโดรสแตติกระดับ 400 MPa (4,000 bar) *Lonicera japonica* Thunb. เพิ่มปริมาณ TPC เนื่องจากความดันทำให้ผนังเซลล์เสียหายส่งผลให้เกิดการสลายพันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกซึ่งทำให้ได้สารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในรูปอิสระมากขึ้น (ไม่จับกับผนังเซลล์)

4.2.3.4 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระของข้าวกล้องงอก

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ของข้าวกล้องธรรมชาติ (BR) และข้าวกล้องงอกที่ได้จากวิธีการเตรียมข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ภายในสภาวะความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติก พบว่า ความสามารถในการยับยั้งสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox ของ BR มีค่า 0.45 และ 0.47 mg TE/g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Chatchavanthatri (2021) ที่พบว่า BR และ GBR มีความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เท่ากับ 1.13 และ 1.21 mg TE/g ตามลำดับ การเพาะงอกข้าวเปลือกโดยการแช่น้ำภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่เพิ่มความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH เพียงเล็กน้อย ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองพบว่า การเพาะงอกข้าวโดยแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก (HP2b2h และ HP4b2h) และเพาะงอกนาน 36 และ 48 h มีผลทำให้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบ BR และ AP8h ($p < 0.05$) จากงานวิจัยของ Cáceres et al. (2017) พบว่า ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดดมีปริมาณ TPC และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ของ GBR สูงกว่า BR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Cáceres et al., 2014; Tumpanuvat et al., 2018)



ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Antioxidant activity (mg TE/g) ²			
	DPPH		ABTS	
	36-h Germination	48-h Germination	36-h Germination	48-h Germination
BR	0.45 ± 0.01 ^b	0.45 ± 0.01 ^d	0.47 ± 0.01 ^c	0.47 ± 0.01 ^c
AP8h	0.51 ± 0.03 ^b	0.51 ± 0.02 ^{cd}	0.56 ± 0.01 ^b	0.58 ± 0.01 ^b
HP2b2h	0.64 ± 0.04 ^a	0.72 ± 0.05 ^b	0.64 ± 0.02 ^a	0.64 ± 0.03 ^a
HP4b2h	0.66 ± 0.02 ^a	0.87 ± 0.08 ^a	0.64 ± 0.05 ^a	0.65 ± 0.02 ^a
HP2b2h-AP6h	0.69 ± 0.06 ^a	0.59 ± 0.01 ^c	0.66 ± 0.04 ^a	0.63 ± 0.01 ^a
HP4b2h-AP6h	0.53 ± 0.01 ^b	0.55 ± 0.03 ^c	0.63 ± 0.01 ^a	0.63 ± 0.01 ^a

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h; HP2b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h; HP4b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 และ 48 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดทุกตัวอย่าง

² ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

จากผลการทดลองผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวด้วยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้ปริมาณสารกาบาและความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS ของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สาร γ -Oryzanol, TPC, และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา (BR) ($p > 0.05$) นอกจากนี้ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar ในการแช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกนาน 36 h (HP2b2h และ HP4b2h) มีผลทำให้สารกาบา และ TPC ของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ($p > 0.05$) แต่ความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำให้ได้สาร γ -

Oryzanol และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับ การแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h)

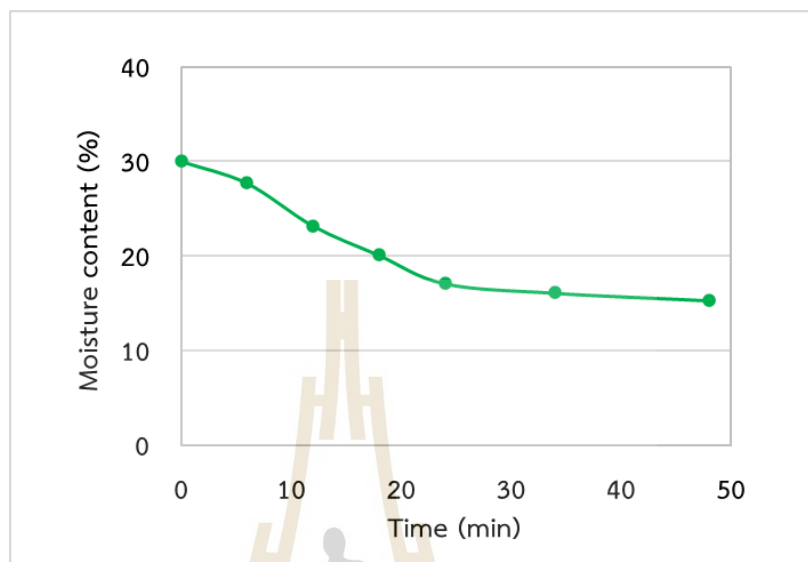
จากการศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือกเพื่อกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าว นาน 2 h และเพาะงอกต่อ นาน 36 h (HP2b2h) ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 80.20% (สูงกว่า 80%) โดยใช้ระยะเวลาในการเตรียมข้าวเปลือกงอกสั้นที่สุด (38 h) ปริมาณข้าวต้น (HRY) สูงกว่าและปริมาณรอยร้าว (FG) ของข้าวกล้องงอกต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการแช่ข้าว นาน 8 h ภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) และการใช้ความดัน 4 bar ในการแช่ข้าว (HP4b2h) นอกจากนี้คุณภาพของข้าวกล้องงอกด้านปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ สาร γ -Oryzanol และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ปริมาณสารกาบาและ TPC ของข้าวกล้องงอกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับ AP8h ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้เลือกการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar นาน 2 h ในการแช่ข้าวเปลือก เพาะงอกข้าว นาน 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดด(HP2b2h) ซึ่งนำมาศึกษาและเปรียบเทียบผลของวิธีในการทำแห้งระหว่างการตากแดดและการใช้รังสีอินฟราเรดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกต่อไป

4.2.3.5 ผลของการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก (ที่ได้จากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการกระตุ้นการงอกของข้าว) โดยเปรียบเทียบการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (Sun drying) (HP2b2h) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying, IR) (HP2b2h-I) โดยได้เปรียบเทียบคุณภาพของ GBR ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี และเนื้อสัมผัส

รูปที่ 4.10 แสดงผลการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรดต่อเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของข้าวเปลือก พบว่า ข้าวเปลือกงอกมีความชื้นเริ่มต้น 30% โดยความชื้นของข้าวเปลือกงอกลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงระยะเวลาการทำแห้งในช่วงแรก (0 – 20 นาที) จนมีความชื้นอยู่ 17% และเมื่อทำแห้งต่อไปความชื้นของข้าวเปลือกงอกค่อยๆ ลดลง จนเหลือ 14.6% จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราการทำแห้ง (Drying rate, DR) ของข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรดมีค่าสูงในช่วงแรกของการทำแห้ง ซึ่งมี DR เท่ากับ 0.84 และ DR ค่อย ๆ ลดลงเมื่อความชื้นของข้าวเปลือกต่ำกว่า 18% ผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Saelim et al. (2018) ซึ่งใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือก โดยมีความชื้นของข้าวเปลือก

เริ่มต้นประมาณ 25% และ DR ของข้าวเปลือกอยู่ระหว่าง 0.9 – 1.1 โดย DR ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการบ่อนข้าวเปลือกระหว่างการทำแห้ง



รูปที่ 4.10 การลดความชื้นของข้าวเปลือกหลังการเพาะงอกโดยการใช้รังสีอินฟราเรด

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตทั้งหมด (TRY) รอยร้าว (FG) และข้าวตัน (HRY) ของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h) และการใช้รังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ซึ่งพบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกงอกมีผลช่วยให้ TRY (71.93%) และ HRY (67.19%) ของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้น และ FG (1.60%) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) ($p < 0.05$) โดย HP2b2h-I มีปริมาณ TRY และ FGใกล้เคียงกับข้าวกล้องธรรมดา (BR) แต่มี HRY สูงกว่า ($p < 0.05$) นอกจากนี้ AP8h ทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มี TRY (60.43%) และ HRY (52.56%) ต่ำที่สุด แต่ FG (13.40%) สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ ($p < 0.05$) ทั้งนี้ TRY ของ HP2b2h-I (71.93%) มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) ที่มีค่า TRY ของข้าวกล้องงอกผ่านการทำแห้งด้วย IR อยู่ระหว่าง 69.32% ในงานวิจัยนี้พบว่า FG และ HRY มีความสัมพันธ์เชิงลบ กล่าวคือ ปริมาณ FG ที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลทำให้ HRY ลดลง ทั้งนี้ Cnossen et al. (2003) รายงานว่า FG ภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวเกิดการแตกหักระหว่างการกะเทาะเปลือกมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณข้าวตัน (HRY) มีค่าลดลง

หลักการในการทำแห้งด้วยรังสีอินฟรา คือการแผ่รังสีอินฟราเรดไปยังข้าวเปลือกงอก ซึ่งเกิดการดูดซับรังสีอินฟราเรดของโมเลกุลภายในเมล็ดข้าวบางส่วน ทำให้เกิดการสั่น (Vibration) และการหมุน (Rotation) ของโมเลกุล การสั่นและหมุนนี้ทำให้เกิดความร้อนขึ้น

ภายในเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดจึงมีประสิทธิภาพในการให้ความร้อนสูง สม่ำเสมอ และใช้ระยะเวลาสั้นในการทำแห้งซึ่งอาจช่วยลดการเกิดรอยร้าว (FG) ของเมล็ดข้าวได้ (Chatchavanthatri et al., 2021) จากรายงานของ Semwal & Meera (2020) พบว่าการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสีข้าว (Rice milling) เนื่องจากรังสีอินฟราเรดช่วยทำให้อุณหภูมิระหว่างการทำให้แห้งมีความสม่ำเสมอและเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมล็ดข้าวซึ่งทำให้ทนต่อการแตกหักเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีการตากแดด นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง (70°C) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ของข้าวซึ่งมีค่า Tg เท่ากับ 60°C ซึ่งอาจช่วยป้องกันการเกิดรอยร้าว (FG) ภายในเมล็ดข้าว เนื่องจากเมล็ดข้าวอยู่ในสถานะยาง (Rubbery state) ที่มีความยืดหยุ่นได้ดี (Cnossen et al., 2003)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าวนาน 2 h เพาะงอกต่อนาน 36 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตทั้งหมดและข้าวตัน รวมทั้งลดปริมาณรอยร้าวของข้าวกล้องงอกได้

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield, TRY) ปริมาณข้าวตัน (Head rice yield, HRY) และรอยร้าว (Fissure grain, FG) ของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำให้แห้งแต่ละวิธี

Treatment ¹	TRY (%) ²	FG (%) ³	HRY (%) ⁴
BR	73.76 ± 0.22 ^a	2.33 ± 0.58 ^c	56.28 ± 1.06 ^c
AP8h	60.43 ± 6.36 ^d	13.40 ± 1.34 ^a	52.56 ± 1.88 ^d
HP2b2h	62.95 ± 1.67 ^c	7.71 ± 1.51 ^b	62.82 ± 0.01 ^b
HP2b2h-I	71.93 ± 0.00 ^b	1.60 ± 0.89 ^c	67.19 ± 1.05 ^a

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยวิธีรังสีอินฟราเรด

^{2,3,4} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ p<0.05

ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Chemical composition (%) ²				
	Protein	Fat	Fiber	Ash	Carbohydrate
BR	10.74 ± 0.04 ^a	2.92 ± 0.18 ^a	0.75 ± 0.02 ^a	0.85 ± 0.05 ^b	84.72 ± 0.16 ^b
AP8h	8.54 ± 0.11 ^c	3.04 ± 0.06 ^a	0.38 ± 0.04 ^b	1.24 ± 0.03 ^a	86.79 ± 0.11 ^a
HP2b2h	8.60 ± 0.20 ^c	2.86 ± 0.50 ^a	0.43 ± 0.08 ^b	1.28 ± 0.12 ^a	86.83 ± 0.43 ^a
HP2b2h-I	9.25 ± 0.14 ^b	2.81 ± 0.21 ^a	0.34 ± 0.05 ^b	1.21 ± 0.04 ^a	86.38 ± 0.22 ^a

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยหลังจากแช่ข้าวแล้ว ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h ข้าวเปลือกถูกนำมาเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยวิธีรังสีอินฟราเรด

² ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h) และการใช้รังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ซึ่งพบว่า ข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดมีปริมาณโปรตีนระหว่าง 8.54 – 8.60% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าจากงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) (11.22 – 11.34%) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ ข้าวกล้องงอกมีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกับ Moongarm and Saetung (2010) ที่พบว่า มีปริมาณโปรตีนเท่ากับ 8.98% จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าว (HP2b2h) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับ AP8h อย่างไรก็ตาม Xia and Li (2018) พบว่า ปริมาณกรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิด ลดลงเมื่อข้าวนั้นได้ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกก่อนการเพาะงอกข้าว (300 – 900 bar นาน 5 min) แต่ข้าวกล้องงอกที่ได้รับความดันไฮโดรสแตติกก่อนการเพาะงอกมีปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการใช้ความดัน ทั้งนี้เนื่องจากการปรับตัวจากสภาวะเครียดจากความดันที่ได้รับก่อนการเพาะงอกมีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนระหว่างกระบวนการเพาะงอก (Wang et al., 2018) แต่จากงานวิจัยของ Xia et al. (2022) การใช้ความดันไฮโดรสแตติกร่วมกับกระบวนการเพาะงอกข้าวช่วยให้การสังเคราะห์สารชีวภาพและการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืช ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพทางคุณค่าทางโภชนาการให้กับเมล็ดที่ผ่านการเพาะงอก นอกจากนี้ Huang et al. (2020)

รายงานว่าการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (300 MPa, 10 min) ในกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องทำให้มีปริมาณสารชีวภาพพร้อมใช้ (Bio-accessibility) ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch) และกรดอะมิโนอิสระเพิ่มมากขึ้น โดยการใช้ความดันไฮโดรสแตติกมีประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาของเอนไซม์และเร่งการสังเคราะห์สารชีวภาพโดยเฉพาะสารกาบา นอกจากนี้ความดันไฮโดรสแตติก (50 MPa, 20 min) ทำให้ปริมาณสารกาบาเพิ่มมากขึ้น 25% ในข้าวกล้องงอก

ในงานวิจัยนี้ พบว่า การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-l) ช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีน (9.25%) ของข้าวกล้องงอกได้เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) (8.60%) ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดมีผลทำให้เมล็ดข้าวมีรูพรุนมากขึ้นซึ่งอาจเพิ่มความสามารถในการสกัดของโปรตีนได้มากขึ้น (Aboud et al., 2019)

ปริมาณไขมัน โยอาหาร และเถ้าของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกที่ได้จากวิธีการเตรียมข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ด้วยการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและทำแห้งแต่ละวิธี มีค่าระหว่าง 2.81-3.04, 0.34 – 0.75% และ 0.85 – 1.28% ตามลำดับ ปริมาณไขมันมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณไขมันของข้าวในรายงานของ Oli et al. (2014) และ Chatchavanthatri et al. (2021) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2.9 – 3.4% และ 2.42 – 2.92% ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ ปริมาณคาร์โบไฮเดรตของ BR และข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดมีค่าระหว่าง 84.72 – 86.79% ซึ่งใกล้เคียงกับของ Chatchavanthatri et al. (2021) (84.30 – 86.51%) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวด้วยการแช่ข้าวเปลือกภายใต้สภาวะและวิธีการทำแห้งแตกต่างกัน ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันของข้าวกล้องงอก จากรายงานวิจัยของ Moongngarm and Saetung (2010) พบว่า การเพาะงอกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมัน (1.19 – 1.23%), เส้นโยอาหาร (1.13 – 1.27%), เถ้า (1.96 – 2.19%) และคาร์โบไฮเดรต (76.8 – 79.2%) ของ GBR เมื่อเปรียบเทียบกับ BR อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยของ Xia and Li (2018) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 30 และ 60 MPa (300 และ 600 bar) นาน 5 min ในการปรับสภาพข้าวกล้องก่อนการเพาะงอกทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 90 MPa มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงอย่างมาก Xia, Wang, Yu et al. (2017) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 150 – 450 MPa (1500 และ 4500 bar) นาน 10 min ในการเพาะงอกข้าวกล้อง มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระและกรดไทโอบาร์บิฟูริก (Thiobarbituric acid) ซึ่งเป็นสารที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกได้ แต่อย่างไรก็ตาม Xia and Li (2018) พบว่า การปรับสภาพข้าวด้วยความดันไฮโดรสแตติกก่อนนำไปผ่านกระบวนการเพาะงอก มีผลช่วยทำให้คุณภาพของข้าวกล้องงอกดีขึ้น ได้แก่ การเพิ่มปริมาณสารกาบา การเพิ่มความคงตัวของสีและไขมันระหว่างการเก็บรักษา

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าวนาน 2 h เพาะงอกต่อนาน 36 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องงอก แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมัน โยอาหาร ถั่ว และคาร์โบไฮเดรตเมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h)

ตารางที่ 4.17 ปริมาณสารกาบา (GABA) และปริมาณสารแกมมา-โอไรซานอล (γ -Oryzanol) ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	GABA (mg/100 g) ²	γ -Oryzanol (mg/100 g) ³
BR	1.08 \pm 0.15 ^d	47.47 \pm 1.76 ^d
AP8h	11.67 \pm 0.44 ^c	51.95 \pm 0.89 ^c
HP2b2h	12.83 \pm 0.70 ^b	58.11 \pm 0.66 ^b
HP2b2h-I	18.40 \pm 0.60 ^a	59.57 \pm 0.32 ^a

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำเพาะงอกเป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา และสาร γ -Oryzanol ของข้าวกล้องงอกที่ได้จากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการกระตุ้นการงอกของข้าว โดยเปรียบเทียบการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (Sun drying) (HP2b2h) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying, IR) (HP2b2h-I) จากผลการทดลองพบว่า HP2b2h-I มีปริมาณสารกาบา เท่ากับ 18.40 mg/100 g ซึ่งมากกว่า HP2b2h, AP8h, และ BR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และปริมาณสารกาบานี้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jongyingcharoen and Cheevitsopon (2016) ที่พบว่า ข้าวกล้องงอกมีสารกาบา เท่ากับ 19.71 mg/100 g แต่อย่างไรก็ตาม HP2b2h-I มีปริมาณสารกาบาต่ำกว่าที่พบในงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) (29.76 mg/100 g) นอกจากนี้การใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกงอกมีผลช่วยให้ปริมาณ γ -Oryzanol (59.57 mg/100 g) เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h), AP8h, และ BR อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ปริมาณสาร γ -Oryzanol ที่ได้จาก

งานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับ Srichamnong et al. (2016) ที่มีปริมาณสาร γ -Oryzanol ของ PGBR (KDML105) เท่ากับ 60 mg/100 g

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกงอกมีผลช่วยให้ปริมาณสารกาบาเพิ่มและ γ -Oryzanol มากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรังสีอินฟราเรดทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในเมล็ดข้าวอย่างรวดเร็ว และใช้ระยะเวลาการทำแห้งสั้น ส่งผลทำให้ปริมาณสารกาบามีค่าเพิ่มขึ้นได้ รังสีอินฟราเรดยังทำให้เมล็ดข้าวมีรูพรุนมากขึ้นซึ่งอาจเพิ่มความสามารถในการสกัดของสารกาบาและ γ -Oryzanol ออกมาจากเมล็ดข้าวได้มากขึ้น (Aboud et al., 2019; Semwal & Meera, 2020)

ตารางที่ 4.18 ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	Antioxidant activity (mg TE/g) ²		Total phenolic compounds (mg GA/g) ³
	DPPH	ABTS	
BR	0.45 ± 0.01 ^c	0.47 ± 0.01 ^c	0.37 ± 0.04 ^b
AP8h	0.51 ± 0.03 ^b	0.56 ± 0.01 ^b	0.46 ± 0.03 ^a
HP2b2h	0.64 ± 0.04 ^a	0.64 ± 0.02 ^a	0.50 ± 0.01 ^a
HP2b2h-I	0.67 ± 0.01 ^a	0.47 ± 0.01 ^c	0.19 ± 0.02 ^c

¹ BR คือ ข้าวกล้องธรรมดา; AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำเพาะงอกเป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอก AP8h, HP2b2h และ HP2b2h-I พบว่า การเพาะงอกข้าวและการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวมีผลทำให้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS และ TPC ของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ BR และ AP8h แต่ปริมาณ TPC ระหว่าง HP2b2h และ AP8h ไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Kim et al. (2017) ที่พบว่า การ

ใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวระดับความดันระหว่าง 0.1 – 100 MPa (1 – 1000 bar) ที่อุณหภูมิ 37°C นาน 24 h มีผลทำให้ TPC เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพาะงอกข้าวและความดันไฮโดรสแตติกทำให้เกิดการรวมตัวกันของสารประกอบฟีนอลิก นอกจากนี้ความดันไฮโดรสแตติกเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสาร ส่งผลให้เพิ่มการเคลื่อนที่ของตัวทำละลายไปยังเซลล์โดยผ่านช่องว่างระหว่างผนังเซลล์ซึ่งทำให้การซึมผ่านของตัวทำละลายได้ดีขึ้น และ Lee et al. (2019) การใช้ความดันไฮโดรสแตติกระดับ 400 MPa (4000 bar) *Lonicera japonica* Thunb. เพิ่มปริมาณ TPC เนื่องจากความดันทำให้ผนังเซลล์เสียหายส่งผลให้เกิดการสลายพันธะระหว่างสารประกอบฟีนอลิกซึ่งทำให้ได้สารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในรูปอิสระมากขึ้น

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ความสามารถในการยับยั้งสารอนุมูลอิสระ DPPH ของ HP2b2h-I (0.67 mg TE/g) มีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HP2b2h ($p > 0.05$) และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS และ TPC ของ HP2b2h-I (0.47 mg TE/g และ 0.19 mg GA/g) มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับ HP2b2h และ AP8h ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Aboud et al. (2019) พบว่า การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดช่วยส่งผลให้ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระมีสูง เนื่องจากรังสีอินฟราเรดช่วยกระตุ้นการสลายพันธะโควาเลนต์ของสารประกอบฟีนอล ซึ่งส่งผลทำให้มีสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้ ปริมาณ TPC ของ BR, AP8h และ HP2b2h มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hu et al. (2017) และ Junyusen et al. (2022) อย่างไรก็ตามปริมาณ TPC และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS ของ HP2b2h-I ไม่สอดคล้องกับความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดใน HP2b2h-I ที่แสดงความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH เช่น สาร γ -Oryzanol และสาร α -Tocopherol จากรายงานวิจัยของ Junyusen et al. (2022) พบว่า ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ γ -Oryzanol, α -Tocopherol, TPC และ Total flavonoid content

จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าว นาน 2 h เพาะงอกต่อ นาน 36 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณสารกาบาเพิ่ม และ γ -Oryzanol ของข้าวกล้องงอกมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และลดปริมาณ TPC และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS ของข้าวกล้องงอก เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h)

ตารางที่ 4.19 ค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ความเป็นสีขาว (Whiteness, W) และความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE) ของข้าวกล้องงอก

Treatment ¹	L^* ²	W ³	ΔE ⁴
AP8h	57.96 ± 2.25 ^a	53.51 ± 1.97 ^a	-
HP2b2h	57.31 ± 1.26 ^a	51.76 ± 1.65 ^b	3.09 ± 0.35 ^a
HP2b2h - I	51.62 ± 0.69 ^b	46.04 ± 0.49 ^c	6.64 ± 0.34 ^b

¹ AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3,4} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 5-10 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันในคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ โดยค่า L^* คือค่าความสว่าง (lightness) และค่า W คือค่าความเป็นสีขาว (whiteness)

⁴ ΔE คำนวณได้จาก $\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$

ตารางที่ 4.19 แสดงผลของค่าความสว่าง (Lightness, L^*) ค่าความเป็นสีขาว (Whiteness, W) และความแตกต่างของสีทั้งหมด (ΔE) ของข้าวกล้องงอก AP8h, HP2b2h และ HP2b2h-I จากผลการทดลองข้าวกล้องงอกมีค่า L^* และค่า W อยู่ระหว่าง 51.62 – 57.96 และ 46.04 – 53.51 ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่า ΔE ของข้าวกล้องงอก HP2b2h มีค่าต่ำกว่า HP2b2h-I อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การทำแห้งด้วยการตากแดดข้าวเปลือกงอกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (HP2b2h) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* แต่ค่า W ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยการตากแดดข้าวเปลือกงอกที่ไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (AP8h) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการแพร่ของสีจากส่วนเปลือกนอกของข้าวไปยังเอนโดสเปิร์มเนื่องจากความดัน จากรายงานของ Oey et al. (2008) พบว่า ความดันไฮโดรสแตติกมีผลต่อรงควัตถุ (Pigment) ซึ่งทำให้สีของข้าวกล้องงอกเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความดันทำลายโครงสร้างของเซลล์และยังคงมีปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี ในงานวิจัยนี้ การใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกงอกผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (HP2b2h-I) มีผลทำให้ค่า L^* และค่า W ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับ HP2b2h และ AP8h ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวและการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสีของข้าวกล้องงอก ผลการทดลองในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Irakli et al. (2018) ซึ่งรายงานว่า รำข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดจะมีค่า L^* น้อยลง เนื่องจาก รังสีอินฟราเรดมีผลต่อการสร้างพอลิเมอร์สีน้ำตาลจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดข้าวทำให้เมล็ดข้าวร้อนขึ้นได้อย่าง

รวดเร็ว ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลมากขึ้น อย่างไรก็ตาม Xia and Li (2018) และ Ding et al. (2021) พบว่า ความดันไฮโดรสแตติกช่วยลดการเปลี่ยนแปลงของสี (เพิ่มความคงตัวของสี) กลิ่น และกลิ่นรสรระหว่างการรักษาข้าวกล้องงอก รวมทั้งช่วยลดการเกิดกรดไขมันอิสระ และคุณค่าทางโภชนาการ แต่จากรายงานของ Wu et al. (2020) พบว่า ความดันไฮโดรสแตติกส่งผลให้ผิวข้าวมีความสว่างมากขึ้น แต่ลดค่าความเป็นสีเหลืองลงเมื่อเพิ่มระดับความดันสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากความดันมีผลไปยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatic reaction) โดยการลดแก๊สออกซิเจนและทำลายเอนไซม์ที่ทำให้เกิดสีน้ำตาล

จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าวนาน 2 h มีผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีค่าความเป็นสีขาวลดลง แต่ไม่เปลี่ยนแปลงค่าความสว่าง แต่การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) มีผลทำให้ค่าความสว่างและค่าความเป็นสีขาวของข้าวกล้องงอกลดลง เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h)

ตารางที่ 4.20 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกสุก

Treatment ¹	Germination time (h)	Hardness (N) ²	Adhesiveness (N.sec) ³	Springiness (%) ⁴	Cohesiveness (%) ⁵
AP8h		82.27 ± 2.26 ^a	12.90 ± 1.65 ^a	35.04 ± 2.16 ^b	20.38 ± 1.19 ^c
HP2b2h	36	60.10 ± 5.45 ^b	13.15 ± 0.29 ^a	36.96 ± 0.99 ^b	23.76 ± 1.12 ^b
HP2b2h - I		62.06 ± 2.61 ^b	3.68 ± 0.25 ^b	43.58 ± 4.22 ^a	30.60 ± 2.13 ^a

¹ AP8h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสถานะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; HP2b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสถานะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสถานะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

^{2,3,4,5} ค่าเฉลี่ยของการทดลองจำนวน 10 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่ต่างกันใบคอลัมน์แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกสุก AP8h, HP2b2h และ HP2b2h-I ด้วยวิธี Texture profile analysis (TPA) โดยทำการวิเคราะห์ข้าวสุกที่อุณหภูมิระหว่าง 25 – 30°C ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ซึ่งได้วิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) ความเหนียวติดกัน (Adhesiveness) ความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าการยึดตัว

กันเอง (Cohesiveness) ดังแสดงในตารางที่ 4.20 โดยที่ค่าความแข็ง คือ การวัดแรงสูงสุดในระหว่างการกดตัวอย่างครั้งแรก ซึ่งเป็นปริมาณแรงที่ใช้ในการเคี้ยวข้าวสุกในช่วงครั้งแรก หรือบอกเป็นความนุ่ม ความเหนียวติดกัน (Adhesiveness) หมายถึง ปริมาณแรงที่ใช้ในการดึง แยก หรือการติดกันเองของข้าวสุก ความยืดหยุ่น (Springiness) หากความยืดหยุ่นสูงมีลักษณะพฤติกรรมคล้ายยาง ความยืดหยุ่นต่ำพฤติกรรมคล้ายของไหลหนืด และค่าความยึดตัวกันเองแสดงถึงความสามารถในการรักษาสภาพเดิมหลังการเคี้ยวไว้ได้ โดยลักษณะข้าวสุกและแฉะ (ความเกาะติดกันต่ำ) ข้าวสุกนุ่ม (เกาะติดกันปานกลาง) และข้าวสุกแข็ง (ความเกาะติดกันน้อย) และมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของพันธะทางเคมีภายในของวัสดุ (ปานมนัส ศิริสมบุญ, 2555; Ma and Sun, 2009; Junyusen et al., 2017; Chatchavanthatri et al., 2021)

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความแข็ง ความเหนียวติดกัน ความยืดหยุ่น และค่าการยึดตัวกันเอง มีค่าอยู่ระหว่าง 60.10 – 82.27, 3.68 – 13.15 N.sec, 35.04 – 43.58% และ 20.38 – 30.60% เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของข้าวกล้องสุก พบว่า AP8h มีค่าความแข็งสูงสุด เมื่อเทียบกับ HP2b2h และ HP2b2h-I ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าว มีผลทำให้ข้าวกล้องสุกมีความแข็งแรงลดลง หรือมีความนุ่มเพิ่มมากขึ้น จากรายงานวิจัยของ Chungcharoen et al. (2015) และ Sirisoontaralak et al. (2015) ระบุว่า การลดค่าความแข็งของข้าวสุกลงมีผลทำให้คะแนนการยอมรับด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความแข็งของข้าวกล้องสุกในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับรายงานของ Wu et al. (2020) ซึ่งพบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าว กล่าวคือ ค่าความแข็งและความยืดหยุ่นของข้าวลดลง เนื่องจากความดันไฮโดรสแตติกสามารถทำลายผิวนอกของเอนโดสเปิร์มของเมล็ดข้าว ส่งผลให้ลักษณะผิวของข้าวเปลี่ยนแปลงไปโดยเพิ่มรอยร้าวที่ผิวและภายในของเมล็ดข้าว รวมถึงอาจทำให้สตาร์ชเกิดเจลลิตีในเซชันได้ นอกจากนี้ความดันไฮโดรสแตติกยังทำให้เม็ดสตาร์ชจับกับโปรตีนซึ่งช่วยทำให้ข้าวมีความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกช่วยชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันเนื่องจากทำให้ไขมันในเมล็ดข้าวจับกับสตาร์ชเกิดเป็น Starch-lipid complexes ขึ้น นอกจากนี้ Xia and Li (2018) ความดันไฮโดรสแตติกช่วยทำให้คุณภาพของข้าวกล้องดีขึ้นโดยช่วยลดระยะเวลาการหุงข้าว การเพิ่มความนุ่มหรือลดความแข็งของข้าวกล้องสุก และปรับปรุงคุณภาพสารอาหารหลัก (Macronutrients) เช่น คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน เป็นต้น และจากผลการวิเคราะห์ SEM และ FTIR แสดงให้เห็นว่า ความดันไฮโดรสแตติกทำให้สตาร์ชเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมาเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous form) ซึ่งช่วยทำให้การย่อยสลายสตาร์ชเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเพาะงอก นอกจากนี้ Xia et al. (2022) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกร่วมกับกระบวนการเพาะงอกข้าวช่วยทำให้การสังเคราะห์สารชีวภาพและมีการสะสมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืช ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพทางคุณค่าทางโภชนาการให้กับเมล็ดที่

ผ่านการเพาะงอก และช่วยปรับปรุงสมบัติด้านรีโอโลยี (Rheology) ด้านความหนืด (Pasting) และด้านโครงสร้างของข้าว

แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ การใช้รังสีอินฟราในการทำให้ข้าวเปลือกงอก (HP2b2h-I) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวกล้องงอกสุกเมื่อเทียบกับการทำให้แห้งด้วยวิธีการตากแดด (HP2b2h) ทั้งนี้การใช้รังสีอินฟราเรตอาจไม่ส่งผลต่อการเพิ่มรูพรุนภายในโครงสร้างของข้าวกล้องงอก และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องงอก (รูปที่ 4.23 และ 4.24) พบว่า เม็ดสตาร์ชของ HP2b2h และ HP2b2h-I มีลักษณะคล้ายกัน โดยมีผิวเรียบ ไม่ขรุขระ และเม็ดสตาร์ชจัดเรียงตัวกันแน่น อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al., 2021 พบว่า รังสีอินฟราเรตสามารถลดความชื้นในเมล็ดข้าวได้อย่างรวดเร็ว อาจส่งผลทำให้ภายในเมล็ดมีช่องว่างและรูพรุนมากขึ้น และภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM พบว่า เม็ดข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำให้แห้งด้วยรังสีอินฟราเรตมีรูพรุนจำนวนมาก เมื่อเทียบกับการทำให้แห้งด้วยการตากแดด ซึ่งช่วยทำให้ข้าวกล้องงอกสุกมีความนุ่มมากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ รายงานวิจัยของ Semwal and Meera (2020) พบว่า รังสีอินฟราเรตสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสตาร์ชข้าวได้ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติเชิงหน้าที่ (Functional properties) เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงเพิ่มความสามารถการดูดซับน้ำและการพองตัวของสตาร์ชข้าวมากขึ้น นอกจากนี้ Tumpunuvatr et al. (2018) รายงานว่า การทำให้ข้าวเปลือกด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดรอยร้าว (FG) ของเมล็ดข้าวมากขึ้น โดย FG มีผลทำให้ปริมาณข้าวตัน (HRY) มีค่าลดลง เนื่องจาก FG ภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวเกิดการแตกหักระหว่างการกะเทาะเปลือกมากขึ้น นอกจากนี้ FG ยังส่งผลเสียต่อคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุกอีกด้วย

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเหนียวติดกัน (Adhesiveness) ความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าการยึดตัวกันเอง (Cohesiveness) พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรต (HP2b2h-I) มีผลต่อการเพิ่มค่า ความยืดหยุ่นและค่าการยึดตัวกันเอง แต่ลดค่าความเหนียวติดกัน ของข้าวกล้องงอกสุก เมื่อเทียบกับการทำให้แห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) ($p < 0.05$) ซึ่งอาจเกิดจากรังสีอินฟราเรตสามารถทำลายโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของพันธะทางเคมีภายในเมล็ดข้าว จากรายงานของ Aboud et al. (2019) พบว่า รังสีอินฟราเรตสามารถช่วยกระตุ้นการสลายพันธะเคมี เช่น พันธะโควาเลนต์ของสารประกอบพินอล ซึ่งส่งผลทำให้มีสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบพินอลเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ผลการทดลองของค่าการยึดตัวกันเองของข้าวกล้องสุก HP2b2h สูงกว่าของ AP8h ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องจาก ความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำลายโครงสร้างของเซลล์และทำให้เกิดการสลายตัวของสารชีวโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน และสตาร์ช เป็นต้น ซึ่งถูกปรับเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติเชิงหน้าที่เนื่องจากพันธะทางเคมีต่าง ๆ ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ไอออนิก (Ionic bond) และไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic

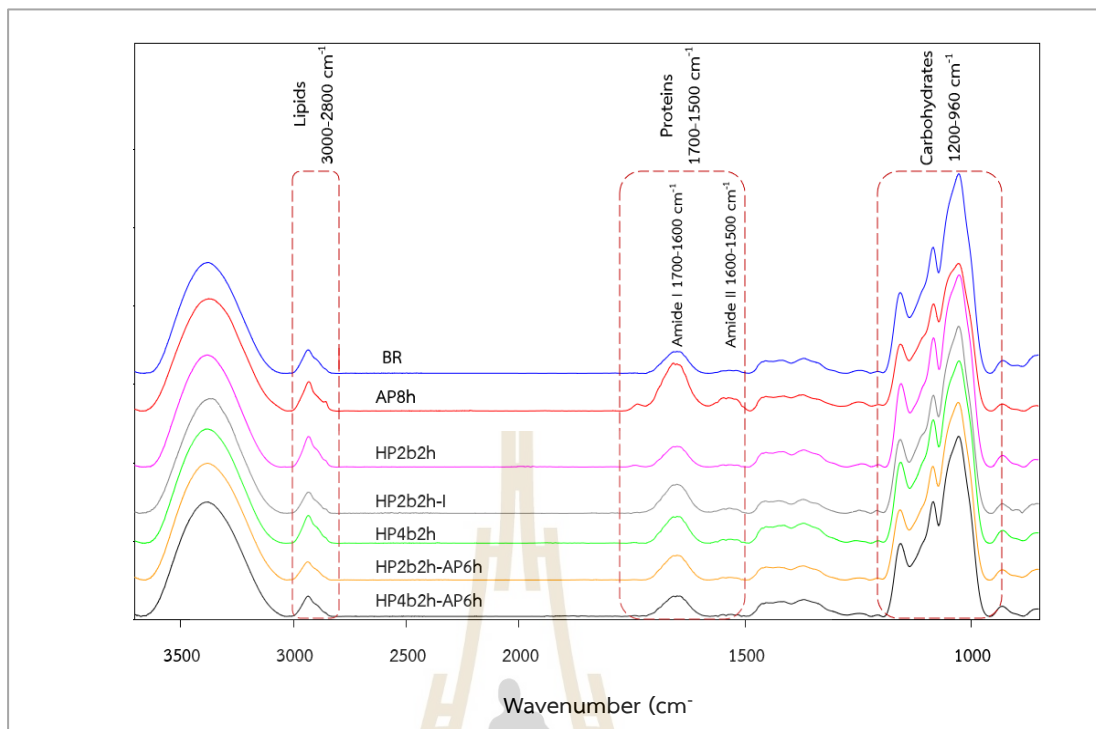
interaction) ซึ่งพันธะเหล่านี้ไวต่อการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดัน และมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเมล็ดพืชได้ (Kim et al., 2017; Xia and Li, 2018; Ding et al., 2021)

จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าวนาน 2 h (HP2b2h) มีผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีค่าความแข็งลดลง และเพิ่มค่าการยืดตัวกันเอง แต่ไม่เปลี่ยนแปลงค่าความเหนียวติดกันและความยืดหยุ่น เมื่อเทียบกับการไม่ใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก อย่างไรก็ตาม การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) มีผลทำให้ความยืดหยุ่นและค่าการยืดตัวกันเองของข้าวกล้องงอกเพิ่มมากขึ้น และลดค่าความเหนียวติดกันลง เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h) ทั้งนี้อาจเนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถทำลายโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของพันธะทางเคมีภายในเมล็ดข้าว

4.2.3.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกด้วย SR-FTIR

หัวข้อนี้ได้การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h และ HP4b2h) ต่อลักษณะโครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิค SR-FTIR โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวกล้องธรรมชาติ (BR) และข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (AP8h) นอกจากนี้ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบผลของการทำแห้งข้าวเปลือกงอกได้แก่การตากแดด (HP2b2h) และการใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying, IR) (HP2b2h-I) ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอก





รูปที่ 4.11 สเปกตรัม SR-FTIR ของข้าวกล้องธรรมดาและข้าวกล้องงอก ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1}

ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลและองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared absorption, IR) โดยหลักการนี้ได้วิเคราะห์การสั่นของพันธะทางเคมี (Chemical bonding vibration) ทั้งการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) และการสั่นแบบงอ (Bending vibration) ทั้งนี้การสั่นของพันธะเคมีเกิดจากการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดที่มีความถี่เฉพาะ ซึ่งจะทำให้ทราบชนิดของหมู่หน้าที่ (Functional group) ของโมเลกุลภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์ โดยแสดงลักษณะสเปกตรัม (Spectrum) ที่มีการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) แตกต่างกัน (Kongmon et al., 2020) นอกจากนี้เทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ถูกนำมาใช้ศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลในอาหารและองค์ประกอบทางชีวภาพ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง และสามารถใช้กับตัวอย่างที่แห้งหรือมีความชื้นสูงในปริมาณน้อยได้ (Fetouhi et al., 2019)

งานวิจัยนี้ได้ใช้แสงซินโครตรอนย่านพลังงานอินฟราเรดกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Synchrotron-radiation-based Fourier transform infrared, SR-FTIR) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องธรรมดาและข้าวกล้องงอก โดยศึกษาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1} ดังแสดงสเปกตรัม

เฉลี่ย SR-FTIR ในรูปที่ 4.11 ซึ่งพบว่า สเปกตรัม SR-FTIR ของข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (AP8h, HP2b2h, HP2b2h-I, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h) มีลักษณะคล้ายกัน ในทุกตัวอย่าง โดยมีพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เด่นชัดในเลขคลื่น 3374, 2929, 2855, 1650, 1535, 1154, 1083, 1026 และ 930 cm^{-1} และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kongmon et al., 2020 (ข้าวขาวดอกมะลิ 105) ทั้งนี้พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเลขคลื่น $3500 - 3000\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) (Erturk and Meral, 2019) พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 2929 และ 2855 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ C-H หมู่เมทิลีน (Methylene group, CH_2) ของการดูดกลืนของไขมัน (Lipids) (ช่วง $3000 - 2800\text{ cm}^{-1}$) (Junyusen et al., 2022) นอกจากนี้สเปกตรัม SR-FTIR ของโปรตีน (Proteins) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) แสดงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น $1700 - 1500\text{ cm}^{-1}$ และ $1200 - 930\text{ cm}^{-1}$ ตามลำดับ (Kongmon et al., 2020; Junyusen et al., 2022) นอกจากนี้ Lim et al. (2014) รายงานว่า ลักษณะพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ $3,321\text{ cm}^{-1}$ และ $1,638\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และการสั่นของโมเลกุลน้ำ ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.11 พบว่า ความเข้มของพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 2929 และ 2855 cm^{-1} ของข้าวกล้องงอกทุกตัวอย่างเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ BR โดยยอดพีค 2855 cm^{-1} ของ AP8h สูงขึ้นเล็กน้อย ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับ Xia and Li (2018) ซึ่งพบว่า การใช้ความดันไฮดรอสแตติกที่ระดับ 300 และ 600 bar นาน 5 min ในการปรับสภาพข้าวกล้องก่อนการเพาะงอกทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 900 bar มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระลดลงอย่างมาก แต่ในงานวิจัยนี้ความเข้มของพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 1650 และ 1535 cm^{-1} (โปรตีน) ของ AP8h เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับพีคของ BR แสดงว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกงอกด้วยการแช่ข้าวภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องงอก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระหว่างการเพาะงอกข้าวเปลือก กระบวนการทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและสลายสารภายในเซลล์ ซึ่งทำให้เกิดการสังเคราะห์ทางชีวภาพภายในเมล็ดข้าว และส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้น (Sirisoontaralak et al., 2015) อย่างไรก็ตามพีคการดูดกลืนนี้ลดลง (1650 และ 1535 cm^{-1}) เมื่อการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮดรอสแตติก นอกจากนี้การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น $1200 - 930\text{ cm}^{-1}$ (คาร์โบไฮเดรต) ของข้าวกล้องงอกทุกตัวอย่างมีความเข้มลดลงเมื่อเทียบกับ BR ทั้งนี้ การเพาะงอกข้าวเปลือกและการใช้ความดันในการแช่ข้าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความดันมีผลทำลายโครงสร้างของเซลล์และสลายสารชีวโมเลกุล รวมทั้งพันธะทางเคมีต่าง ๆ ซึ่งอาจไปชะลอเมตาบอลิซึม (Metabolism) ที่เกิดระหว่างกระบวนการเพาะงอก นอกจากนี้ความดันมีผลทำลายโครงสร้างของ

เซลล์ตัวอ่อน (Embryo cells) และรบกวนกระบวนการสร้างโปรตีนของ Gene expression ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำ (Kim et al., 2017; Xia and Li, 2018) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xia and Li (2018) พบว่า ปริมาณกรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิด ลดลงเมื่อข้าวขึ้นได้ผ่านการให้ความดันไฮโดรสแตติกก่อนการเพาะงอกข้าว (300 – 900 bar นาน 5 min) เนื่องจากการปรับตัวจากสภาวะเครียดจากความดันที่ได้รับก่อนการเพาะงอกมีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนระหว่างกระบวนการเพาะงอก (Wang et al., 2018) และ Xia and Li (2018) รายงานว่า ความดันไฮโดรสแตติกทำให้สตาρχเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline form) มาเป็นแบบอสัญฐาน (Amorphization) ซึ่งช่วยทำให้การย่อยสลายสตาρχเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเพาะงอก

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศมีผลช่วยทำให้ปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องงอกเพิ่มขึ้น แต่ความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำให้ปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องงอกลดลง และการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศและความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำให้โครงสร้างและปริมาณคาร์โบไฮเดรต (สตาρχ) เปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตามปริมาณไขมันของข้าวกล้องงอกไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับข้าวกล้อง

ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA), Second derivative SR-FTIR, และการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Hierarchical cluster analysis, HCA) โดยสร้างแผนภาพต้นไม้หรือเดนโดแกรม (Dendrogram) ของข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (AP8h, HP2b2h, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h) จากสเปกตรัมของ SR-FTIR ช่วงเลขคลื่นระหว่าง $3700 - 800 \text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยผลการวิเคราะห์ PCA พบว่า องค์ประกอบรวม 2 องค์ประกอบได้แก่ องค์ประกอบรวมที่ 1 (PC1) และ 2 (PC2) ของตัวอย่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอกเป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 72% โดย PC1 ได้จำแนก AP8h ออกจาก BR, HP2b2h, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h อย่างชัดเจน ส่วน PC2 ได้แยก HP2b2h ออกจาก HP2b2h-AP6h ค่อนข้างชัดเจน (รูปที่ 4.12A) และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ Second derivative SR-FTIR (รูปที่ 4.12B) พบว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 1650 และ 1535 cm^{-1} (โปรตีน) มีความแตกต่างกันระหว่าง AP8h กับ BR, HP2b2h, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h นอกจากนี้ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในเลขคลื่น $1200 - 930 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงสเปกตรัม SR-FTIR ของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) มีความแตกต่างกันโดย AP8h และ BR ต่างจาก HP2b2h, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h จากการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มข้อมูล (HCA) โดยแสดงแผนภาพต้นไม้หรือเดนโดแกรม (Dendrogram) (รูปที่ 4.12C) ซึ่งจะช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่า สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ (1) AP8h,

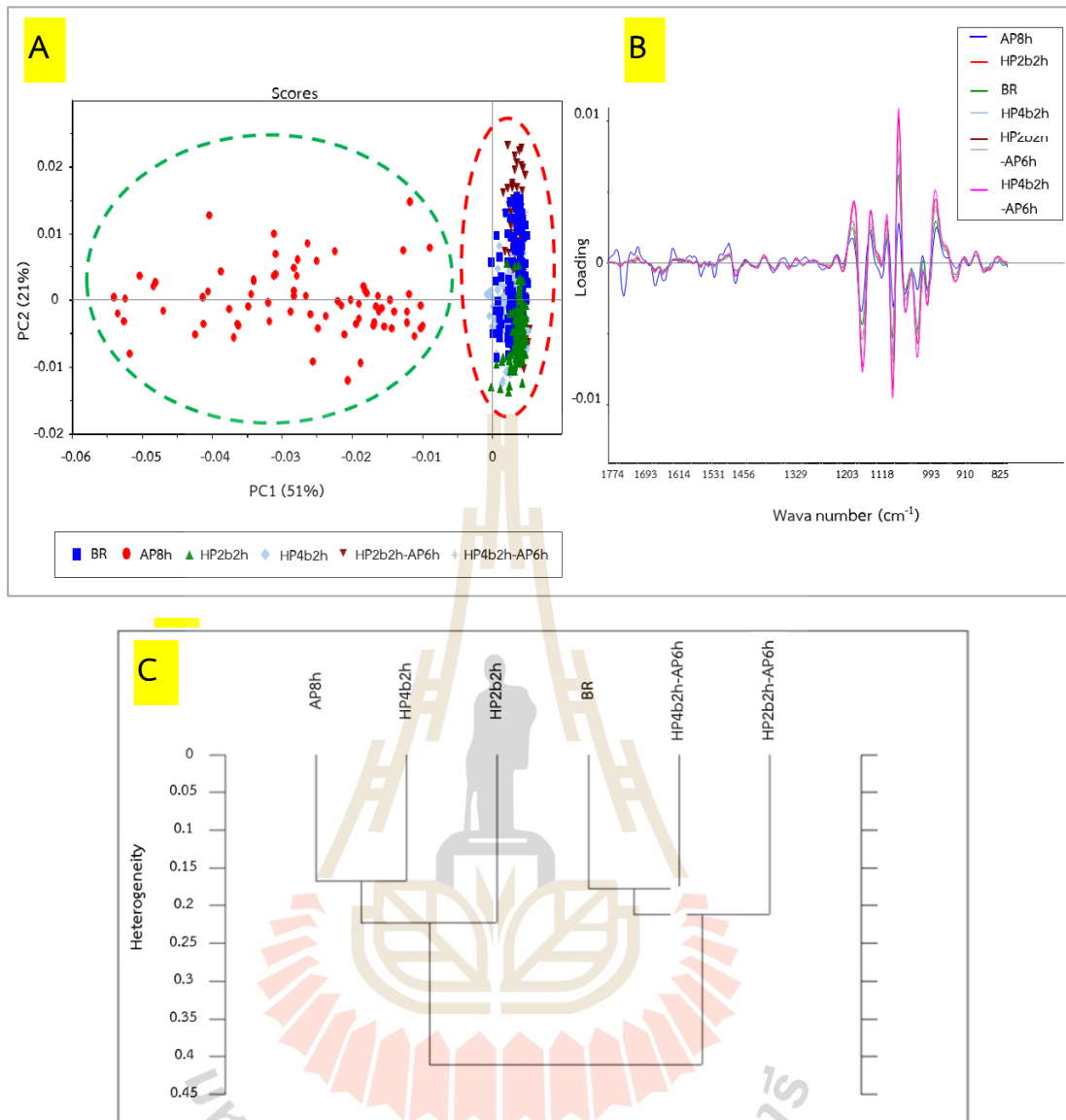
HP2b2h, และ HP4b2h โดย AP8h มีความใกล้เคียงกับ HP4b2h มากกว่า HP2b2h และ (2) BR, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h โดย BR มีความใกล้เคียงกับ HP4b2h-AP6h มากกว่า HP2b2h-AP6h

รูปที่ 4.13 แสดงการวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA ของ BR, AP8h, HP2b2h, และ HP4b2h จากสเปกตรัมของ SR-FTIR ช่วงเลขคลื่นระหว่าง $3700 - 800 \text{ cm}^{-1}$ โดยผลการวิเคราะห์ PCA คล้ายกับการวิเคราะห์ที่ได้ในรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่า องค์ประกอบร่วมที่ 1 (PC1) และ 2 (PC2) เป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 71% โดย PC1 (57%) ได้จำแนก AP8h ออกจาก BR, HP2b2h, และ HP4b2h อย่างชัดเจน ส่วน PC2 (14%) ได้แยก BR ออกจาก HP2b2h ค่อนข้างชัดเจน (รูปที่ 4.13A) และเมื่อพิจารณา Second derivative SR-FTIR (รูปที่ 4.13B) พบว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 1650 และ 1535 cm^{-1} (โปรตีน) และ $1200 - 930 \text{ cm}^{-1}$ (คาร์โบไฮเดรต) มีความแตกต่างกันระหว่าง AP8h กับ BR, HP2b2h, และ HP4b2h จากการวิเคราะห์ HCA โดยแสดงภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) (รูปที่ 4.13C) พบว่า ข้าวกล้องธรรมดา (BR) ถูกแบ่งกลุ่มแยกออกจากข้าวกล้องงอก และภายในกลุ่มของข้าวกล้องงอกนั้น AP8h ถูกแบ่งออกจาก HP2b2h และ HP4b2h โดย HP2b2h และ HP4b2h มีความใกล้เคียงกันมาก

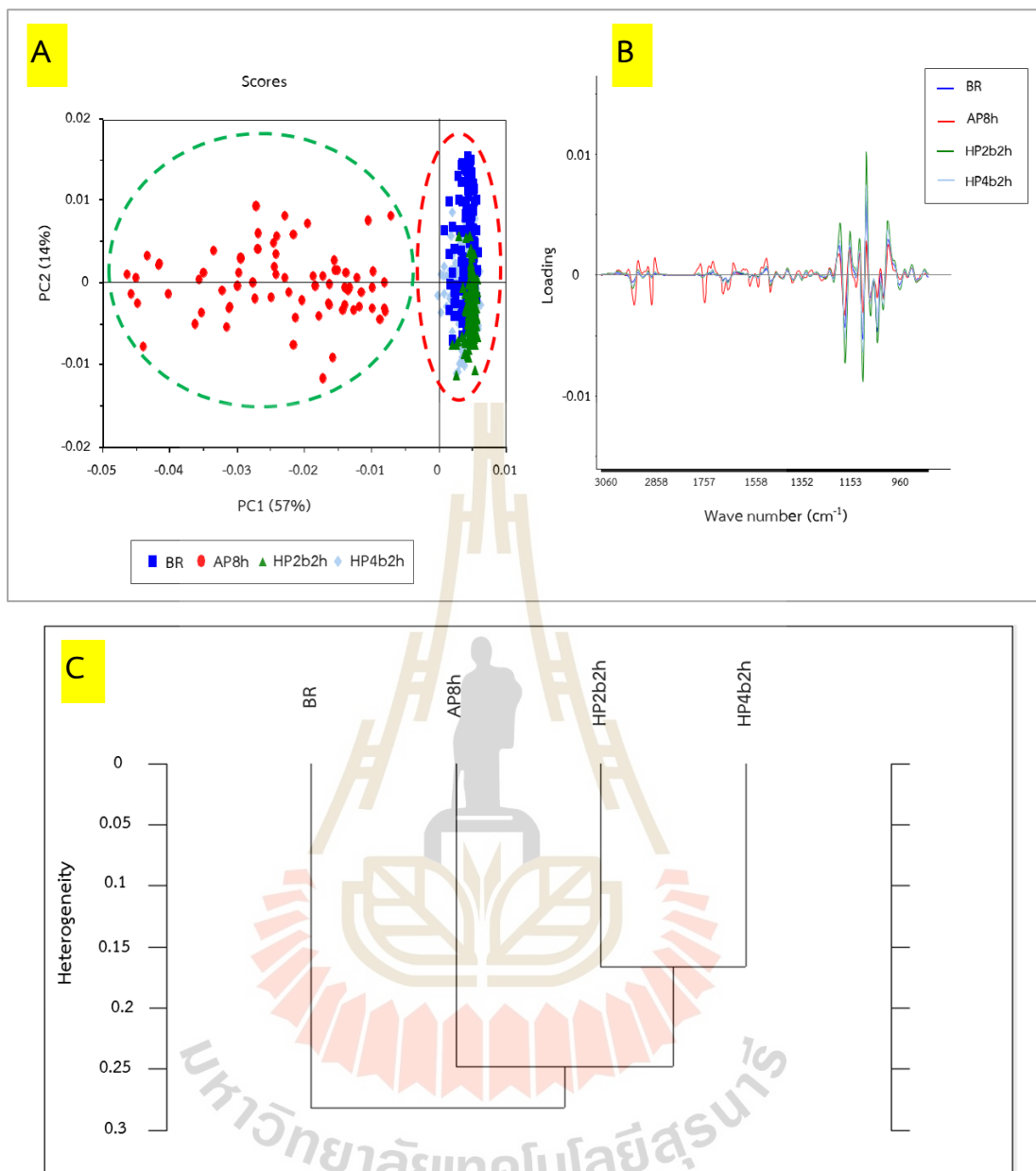
จากรายงานของ Wu et al. (2020) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวที่ระดับความดันระหว่าง $0.1 - 500 \text{ MPa}$ ($1 - 5000 \text{ bar}$) ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหมู่หน้าที่ (Functional group) ใหม่ของโมเลกุลของข้าวกล้อง โดยมีพีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เด่นชัดในเลขคลื่น $2925, 2855, 1653, 1540, 1081, 1022,$ และ 760 cm^{-1} ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความเข้มของการดูดกลืนของพีคของคาร์โบไฮเดรตลดลงซึ่งแสดงถึงการเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัวของสตาร์ช และพีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 1652 และ 1545 cm^{-1} (โปรตีน) ลดลงหลังจากการใช้ความดันไฮโดรสแตติก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างแบบ β -sheet ของสายพอลิเพปไทด์ถูกทำลายไประหว่างการให้ความดัน นอกจากนี้ Xia and Li (2018) พบว่า พีการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1046 cm^{-1} ลดลงหลังจากการเพาะงอก ซึ่งเกี่ยวข้องกับสตาร์ชในเมล็ดข้าว แต่การดูดกลืนที่ 1025 cm^{-1} มีความเข้มของพีคเพิ่มสูงขึ้นหลังจากปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการให้ความดัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความดันที่ใช้ในการปรับสภาพก่อนการเพาะงอกมีผลในการเพิ่มโครงสร้างแบบบอสันฐานของสตาร์ช He et al. (2021) พบว่า เพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวกล้อง (0, 12, 24, 36, และ 48 h) ทำให้ค่าความเป็นผลึก (Relative crystallinity) ของข้าวกล้องงอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์ Amylase ย่อยสลายโครงสร้าง Double helix ของ สตาร์ช ซึ่งทำให้สตาร์ชมีโครงสร้างแบบบอสันฐานมากขึ้น (ลดโครงสร้างแบบผลึก) และได้ยืนยันผลโดยการวิเคราะห์ด้วย FTIR ซึ่งพบว่า

อัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟระหว่างพีคการดูดกลืน 1047 cm^{-1} และ 1022 cm^{-1} มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการเพาะงอก แสดงว่า การเพาะงอกส่งผลต่อการเพิ่มโครงสร้างของสตาร์ชแบบอสัณฐานนั่นเอง นอกจากนี้ Xia, Wang, Li (2018) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติก (50 - 350 MPa, 20 min) ช่วยเพิ่มปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องงอกได้ 21.9 -m, 27.4% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ไม่ผ่านการใช้ความดัน) และช่วยเพิ่มการย่อยสตาร์ช ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก (Crystalline form) ของสตาร์ชไปเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous form) นอกจากนี้ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับข้าวกล้องงอกระหว่างการเก็บรักษาเนื่องจากลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิดลง และ Xia, Wang, Li (2018) พบว่า ความเข้มของพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1050 cm^{-1} ลดลงและความเข้มของพีค 1026 cm^{-1} เพิ่มขึ้นหลังจากการเพาะงอก แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างแบบผลึก (Crystalline form) ของสตาร์ชเปลี่ยนไปเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous form) ระหว่างการแช่ข้าวกล้อง โดยความเข้มของพีค 1026 cm^{-1} เพิ่มขึ้นตามระดับความดันที่เพิ่มมากขึ้นด้วย

ในงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีน และการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของสตาร์ช



รูปที่ 4.12 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): (BR) ข้าวกล้องธรรมดา; (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; (HP2b2h-AP6h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h; (HP4b2h-AP6h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด



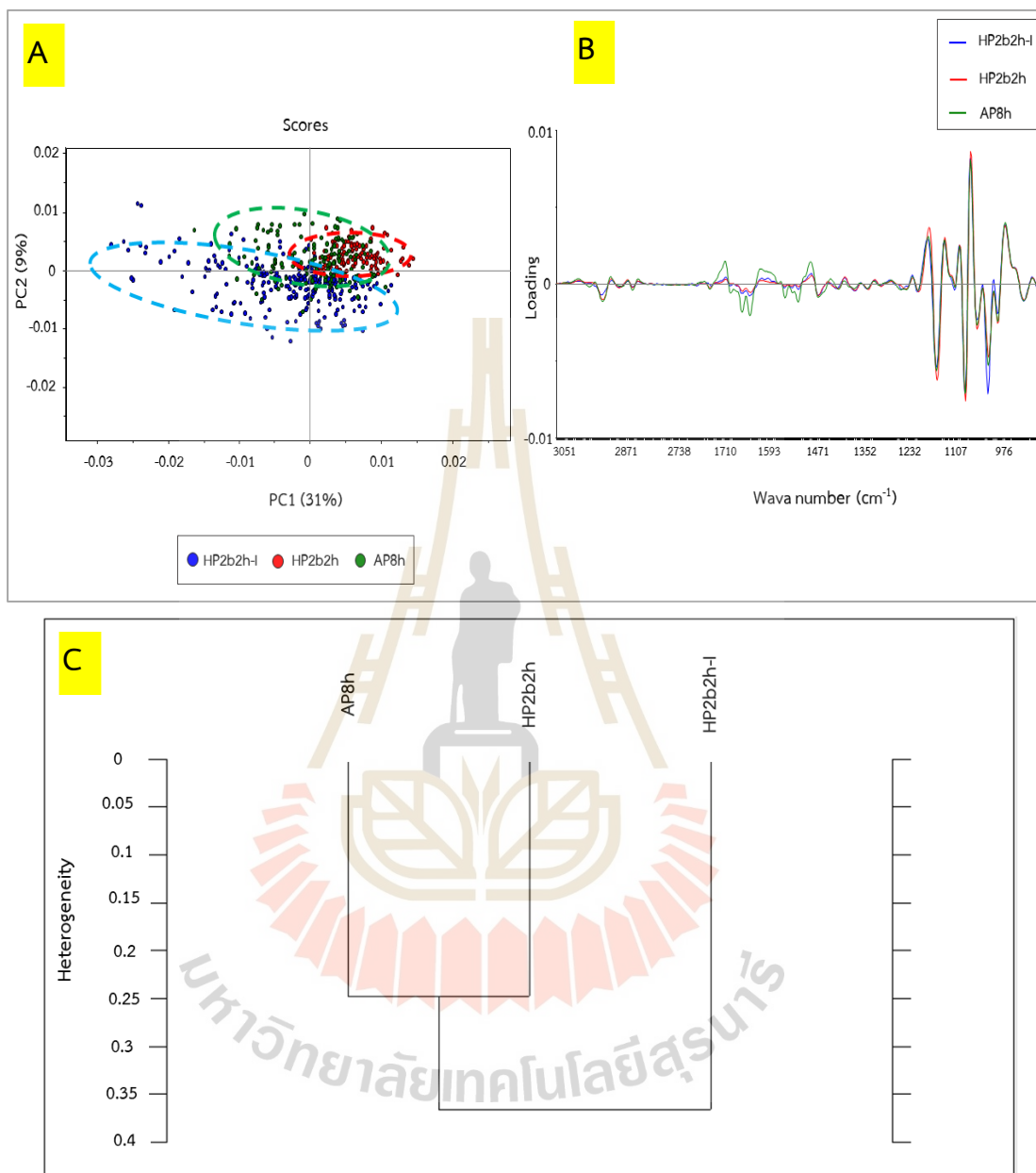
รูปที่ 4.13 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): (BR) ข้าวกล้องธรรมชาติ; (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; (HP4b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด

เมื่อพิจารณาผลของวิธีการเพาะงอกและทำแห้งข้าวเปลือก ได้แก่ สภาวะในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศและทำแห้งด้วยการตากแดด (AP8h), ความดันไฮโดร

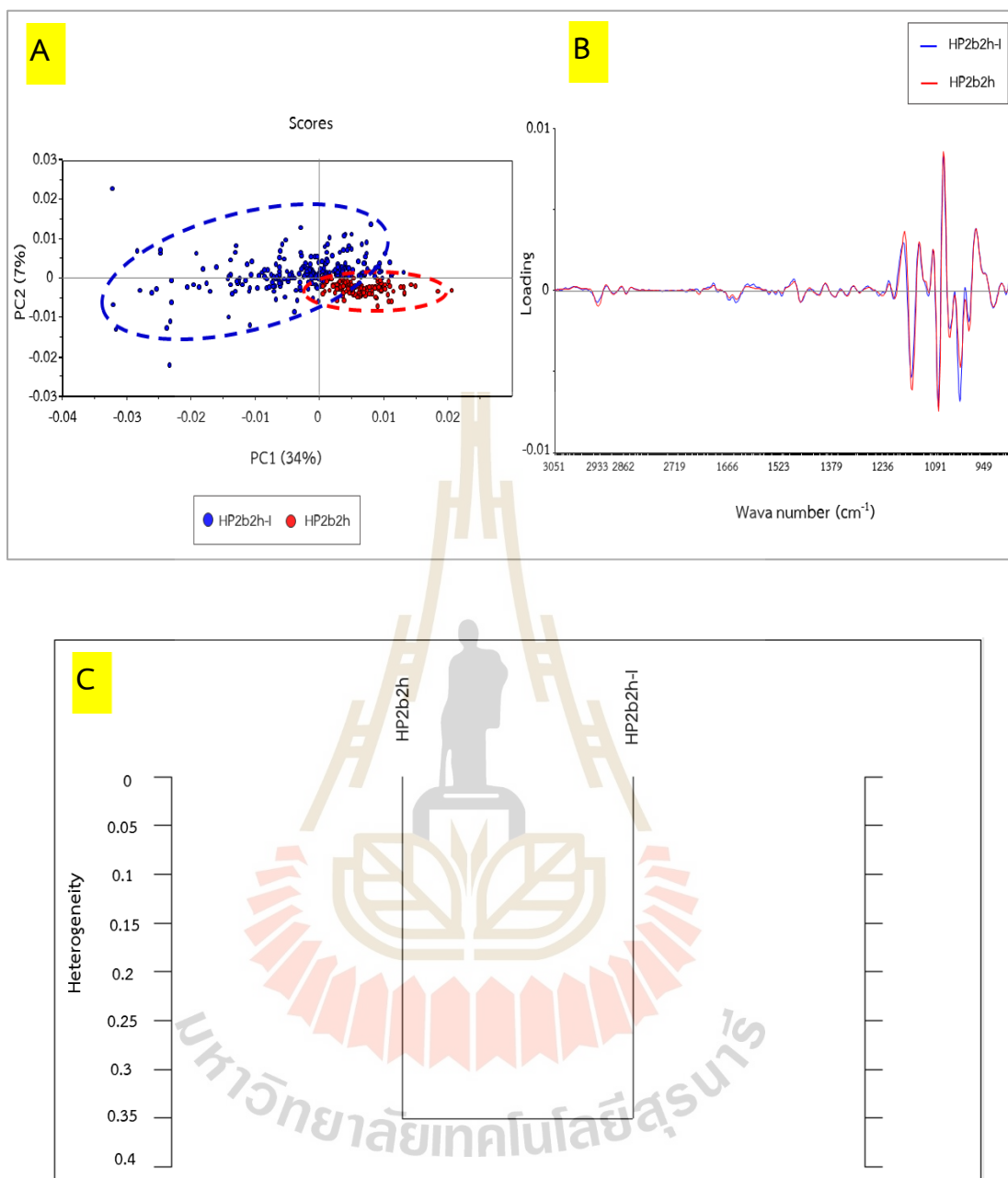
สแตติกในการแช่ข้าวและทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) และความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอก ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA ของ AP8h, HP2b2h, และ HP2b2h-I จากสเปกตร้าของ SR-FTIR ช่วงเลขคลื่นระหว่าง $3700 - 800 \text{ cm}^{-1}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่า องค์ประกอบรวมที่ 1 (PC1) และ 2 (PC2) เป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 40% โดย PC1 (31%) และ PC2 (9%) ได้จำแนก HP2b2h-I ออกจาก AP8h อย่างชัดเจน (รูปที่ 4.14A) และเมื่อพิจารณา Second derivative SR-FTIR (รูปที่ 4.13B) พบว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น $1700 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ (โปรตีน) มีความแตกต่างกันระหว่าง AP8h กับ HP2b2h และ HP2b2h-I และการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น $1200 - 930 \text{ cm}^{-1}$ (คาร์โบไฮเดรต) มีความแตกต่างกันระหว่าง HP2b2h-I กับ AP8h และ HP2b2h อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ HCA โดยแสดงภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) (รูปที่ 4.14C) พบว่า การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ถูกแบ่งกลุ่มแยกออกจาก AP8h และ HP2b2h ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรังสีอินฟราเรดมีผลต่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกเมื่อเทียบกับวิธีการตากแดด โดยรูปที่ 4.15 แสดงผลวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA ระหว่าง HP2b2h และ HP2b2h-I จากสเปกตร้าของ SR-FTIR ช่วงเลขคลื่นระหว่าง $3700 - 800 \text{ cm}^{-1}$ พบว่า องค์ประกอบรวมที่ 1 (PC1) และ 2 (PC2) เป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 31% (รูปที่ 4.15A) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15B พบความแตกต่างกันของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น $1200 - 930 \text{ cm}^{-1}$ (คาร์โบไฮเดรต) ของ HP2b2h และ HP2b2h-I จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า การทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชของข้าวกล้องงอก

นอกจากนี้ รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA ระหว่าง HP2b2h กับ HP2b2h-AP6h และ HP4b2h กับ HP4b2h-AP6h ตามลำดับ โดยเมื่อวิเคราะห์ PCA ของ HP2b2h กับ HP2b2h-AP6h พบว่า องค์ประกอบรวมที่ 1 (PC1) และ 2 (PC2) เป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 82% โดย PC1 (77%) และ PC2 (5%) (รูปที่ 4.16A) และ PCA ของ HP4b2h กับ HP4b2h-AP6h พบว่า องค์ประกอบรวมที่ 1 (PC1) และ 2 (PC2) เป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 65% โดย PC1 (53%) และ PC2 (12%) (รูปที่ 4.17A) โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 4.16B และ 4.17B พบความแตกต่างกันของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่นระหว่าง $1200 - 930 \text{ cm}^{-1}$ (คาร์โบไฮเดรต) อย่างชัดเจน จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะเวลาการแช่ข้าวเปลือกภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศอีก 6 h หลังจากแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันที่

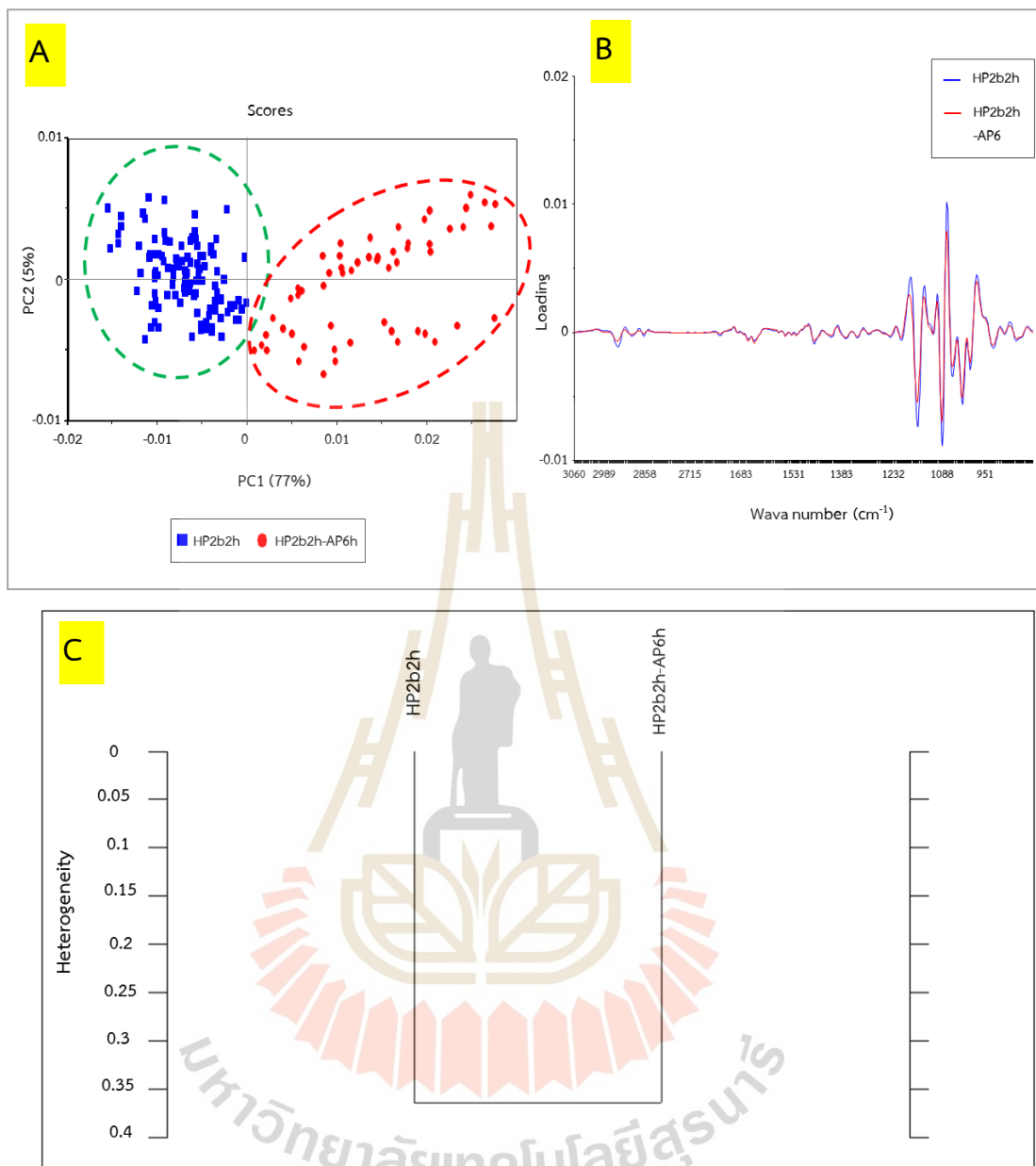
ระดับ 2 และ 4 bar นาน 2 h มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชของข้าวกล้องงอก



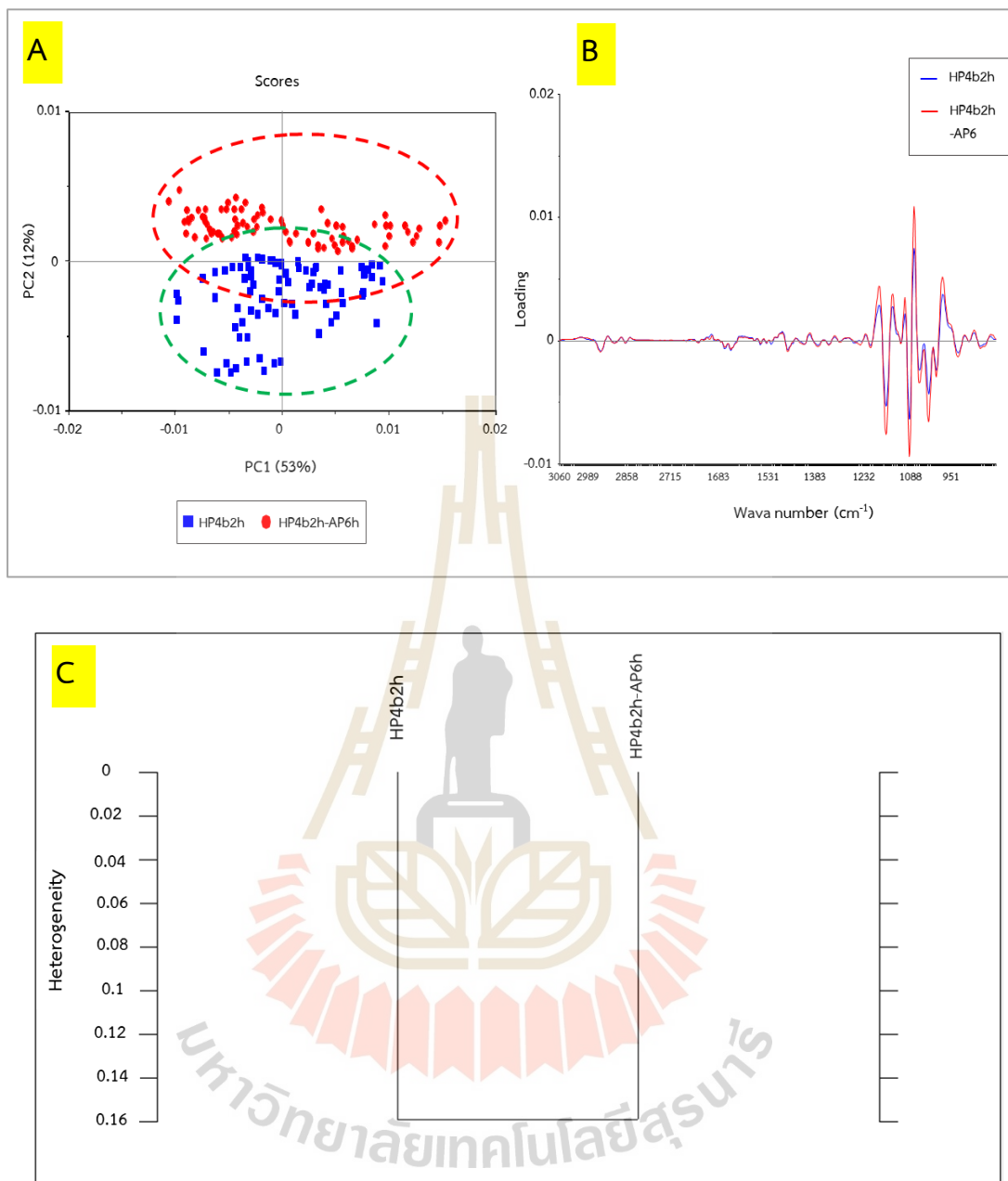
รูปที่ 4.14 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; (HP2b2h-I) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด



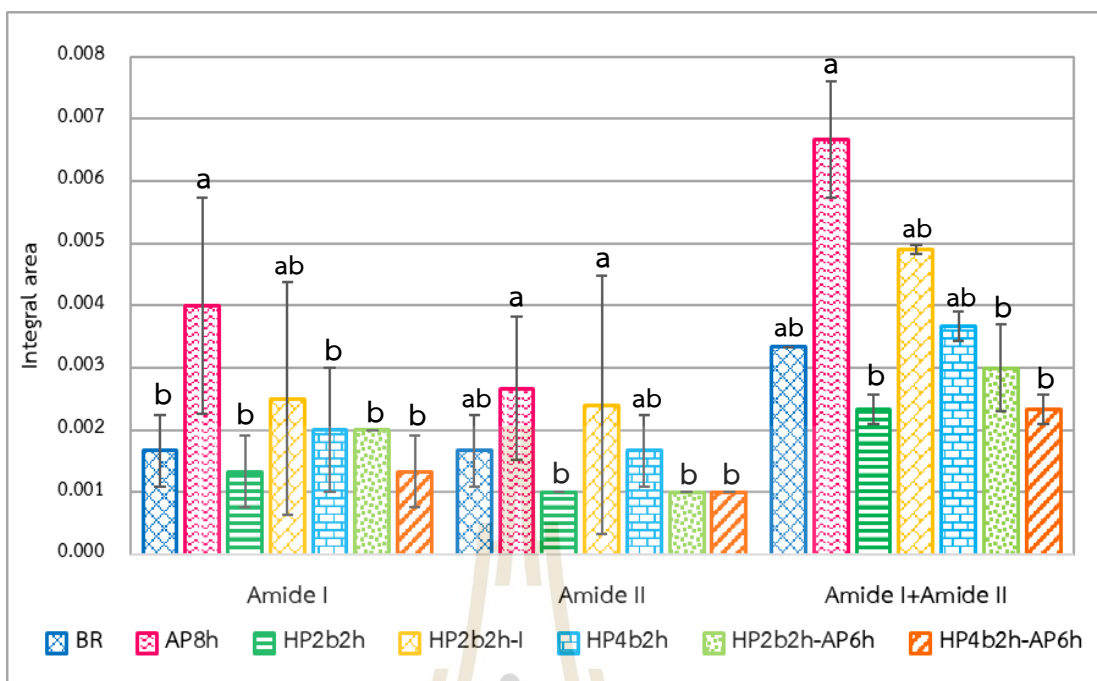
รูปที่ 4.15 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยการตากแดด; (HP2b2h-I) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด



รูปที่ 4.16 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; (HP2b2h-AP6h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด



รูปที่ 4.17 Score plot (A); 2nd derivative loading (B) และ Dendrogram (C): (HP4b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h; (HP4b2h-AP6h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด



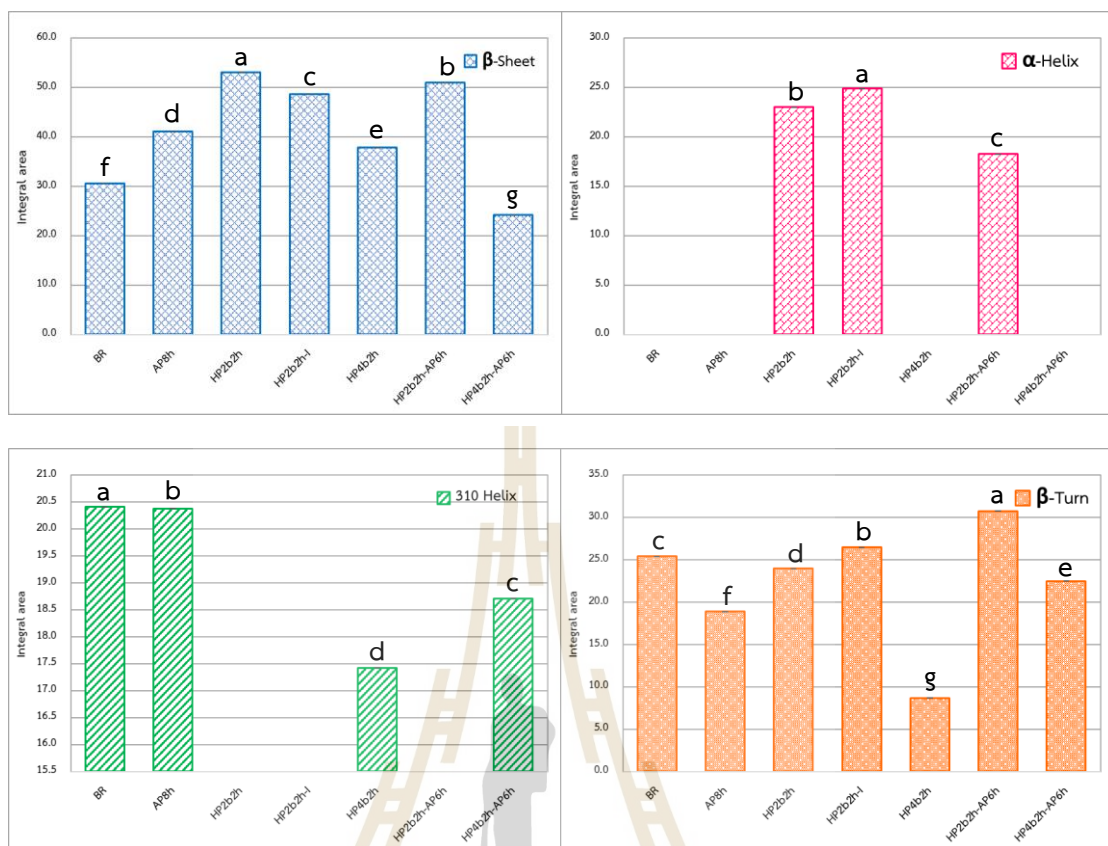
รูปที่ 4.18 พื้นที่ใต้กราฟ (Integral area) ของ Second derivative SR-FTIR ในช่วง $1700-1500\text{ cm}^{-1}$ ของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

จากรายงานวิจัยของ Kong & Yu (2007) ระบุว่า สเปกตรัมของโปรตีนและเพปไทด์ประกอบด้วยหมู่เอไมด์ (Amide) A, B, และ I-IV ทั้งนี้ Amide I และ Amide II ถูกพบการสั่น (Vibration) เนื่องจากการดูดกลืนแสงมากกว่า Amide อื่น ๆ โดยการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ Amide I อยู่ในช่วงเลขคลื่น $1690 - 1600\text{ cm}^{-1}$ ทำให้เกิดการสั่นแบบยืดของพันธะ $\text{C}=\text{O}$ ประมาณ 80% ซึ่งพบมากในโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน (Secondary structure of protein) ส่วนการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ Amide II อยู่ในช่วงเลขคลื่น $1575 - 1480\text{ cm}^{-1}$ ทำให้เกิดการสั่นแบบงอของพันธะ N-H ประมาณ 40 - 60% นอกจากนี้การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ Amide A และ B ที่เลขคลื่น $3600 - 3300\text{ cm}^{-1}$ และ $3100 - 2600\text{ cm}^{-1}$ โดยการสั่นแบบยืดของ N-H ตามลำดับ (Fetouhi et al., 2019; Kong & Yu, 2007)

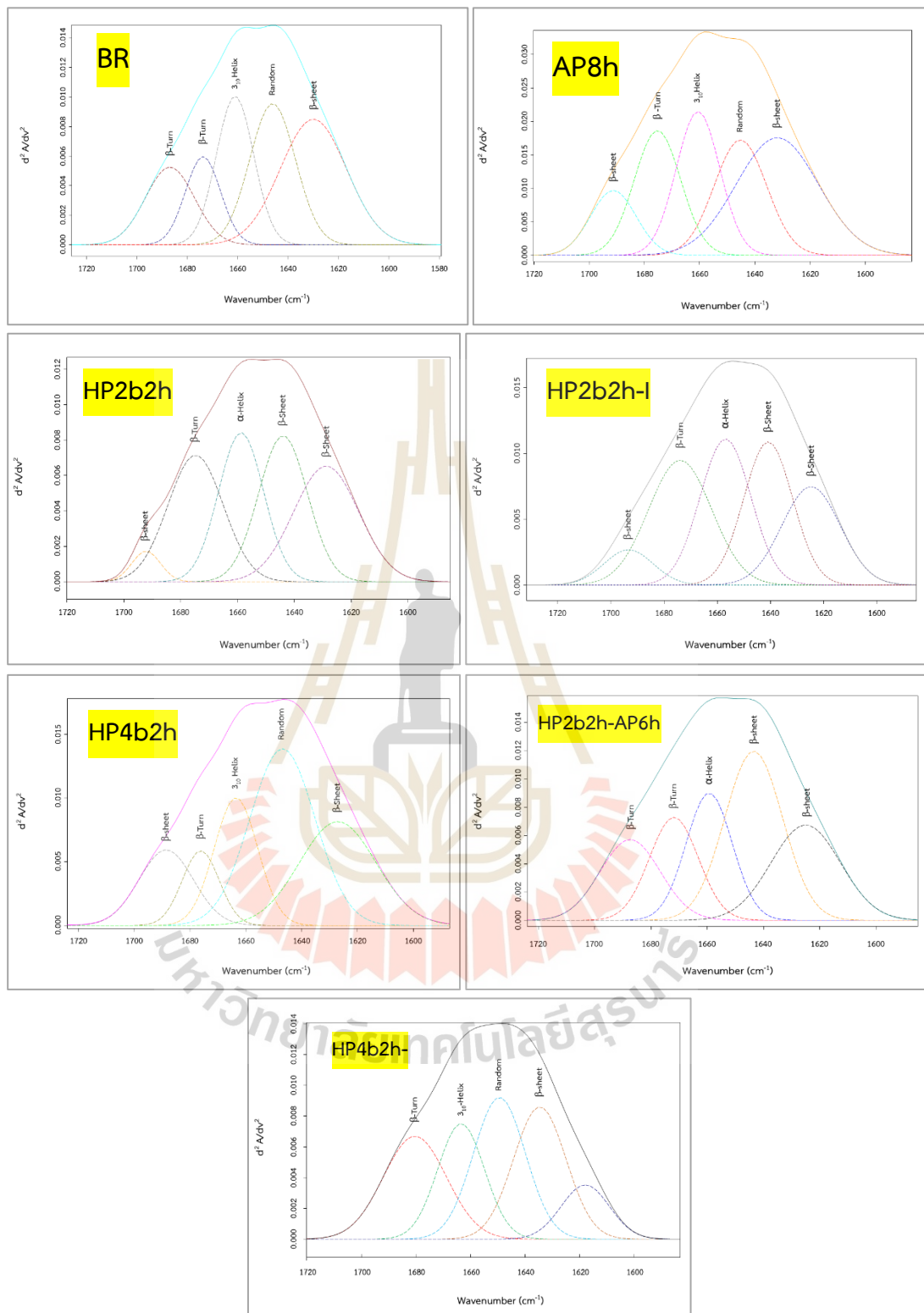
ในงานวิจัยนี้ รูปที่ 4.18 แสดงการวิเคราะห์ผลพื้นที่ใต้พีคของสเปกตรัม SR-FTIR ของ Amide I และ Amide II ในช่วงเลขคลื่น $1700 - 1600\text{ cm}^{-1}$ และ $1600 - 1490\text{ cm}^{-1}$ และผลรวมพื้นที่ของ Amide I และ Amide II (Protein) ของข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (AP8h, HP2b2h, HP2b2h-I, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h) พบว่า AP8h และ HP2b2h-I มีพื้นที่ใต้พีคของ Amide I, Amide II, และผลรวมของ Amide I และ Amide II ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยมีค่าสูงกว่า BR, HP2b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยผลรวมของ Amide I และ Amide II ช่วยบ่งบอกถึง

ปริมาณโปรตีนในข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอกได้ จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวมีผลทำให้ปริมาณ Amide I และ Amide II ของข้าวกล้องงอก (AP8h) เพิ่มขึ้น การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าว (HP2b2h) มีผลต่อการลดปริมาณ Amide I และ Amide II ซึ่งสอดคล้องกับ Xia and Li (2018) พบว่า ปริมาณกรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิด ลดลงเมื่อข้าวนั้นได้ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกก่อนการเพาะงอกข้าว อย่างไรก็ตาม Huang et al. (2020) รายงานว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติก (300 MPa, 10 min) ในกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องทำให้มีปริมาณสารชีวภาพพร้อมใช้ (Bio-accessibility) ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch) และกรดอะมิโนอิสระเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีน (9.25%) ของข้าวกล้องงอกได้เมื่อเทียบกับการทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) (8.60%) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 4.15 อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัยของ Kongmon et al. (2020) พบว่า ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีพื้นที่ใต้สเปกตรัมของ Amide I และ Amide II ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย SR-FTIR สูงกว่าที่ได้จากงานวิจัยนี้

รูปที่ 4.19 แสดงพื้นที่ใต้กราฟ (Integral area) โครงสร้างระดับทุติยภูมิ (Secondary structure) ของ Amide I ในช่วงเลขคลื่น 1700 – 1600 cm^{-1} ของข้าวกล้อง (BR) และข้าวกล้องงอก (AP8h, HP2b2h, HP2b2h-I, HP4b2h, HP2b2h-AP6h, และ HP4b2h-AP6h) โดยมีโครงสร้างโปรตีนแบบ β -sheet, α -helix, 3_{10} -helix และ β -turn ซึ่งได้จากสเปกตรัมของ Second derivative SR-FTIR ของ Deconvoluted Amide I ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพาะงอกข้าว (AP8h) มีผลทำให้โครงสร้างโปรตีนแบบ β -sheet เพิ่มขึ้น แต่ลดโครงสร้างโปรตีนแบบ β -turn อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับ BR การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าว (HP2b2h) มีผลทำให้ โครงสร้างโปรตีนแบบ β -sheet เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) และเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างของโปรตีนจาก 3_{10} -helix เป็น α -helix เมื่อเทียบกับ BR และ AP8h และเมื่อใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกงอก (HP2b2h-I) พบว่า โครงสร้างโปรตีนแบบ β -sheet ลดลง แต่โครงสร้างโปรตีนแบบ α -helix และ β -turn เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จากงานวิจัยของ Fetouhi et al. (2019) รายงานว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ Amide I ในช่วงเลขคลื่น 1620 – 1644 cm^{-1} แสดงถึงโครงสร้างโปรตีนแบบ β -sheet ช่วงเลขคลื่น 1649 – 1659 cm^{-1} แสดงถึงโครงสร้างโปรตีนแบบ α -helix และช่วงเลขคลื่น 1660 – 1688 cm^{-1} แสดงถึงโครงสร้างโปรตีนแบบ β -turn นอกจากนี้พบว่า โครงสร้างโปรตีนในข้าวกล้องงอกดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 1622, 1649, และ 1673 cm^{-1} เป็นแบบ β -sheet, α -helix และ β -turn ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวเปลือก การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าว และการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดข้าวเปลือกงอก มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน (Amide I)



รูปที่ 4.19 พื้นที่ใต้กราฟ (Integral area) โครงสร้างระดับทุติยภูมิ (Secondary structure) ของโปรตีน ในช่วงของ Amide I ($1700-1600\text{ cm}^{-1}$) ของขั้วกึ่งและขั้วกึ่งงอก



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของ Second derivative SR-FTIR ของ Deconvoluted Amide I ของข้าวกล้อง (BR) และ ข้าวกล้องงอก (AP8h; HP2b2h; HP2b2h-I; HP4b4h; HP2b2h-AP6h and HP4b4h-AP6h)

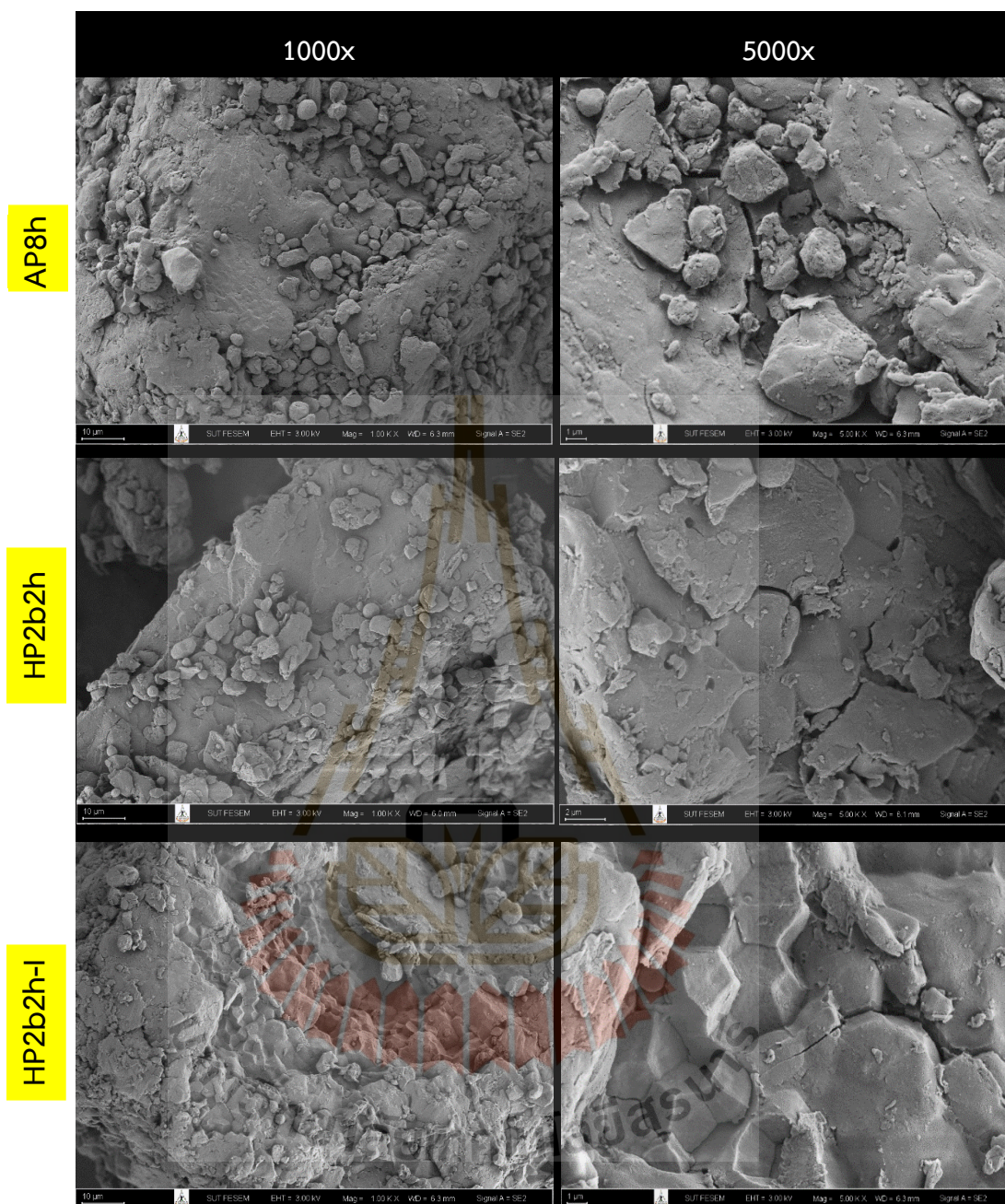
4.2.3.7 โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอก

หัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกระหว่างการแช่ข้าวเปลือกและวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกต่อลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิค FE-SEM และ SR-XTM โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและทำแห้งด้วยการตากแดด (HP2b2h) และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared irradiation drying, IR) (HP2b2h-I)

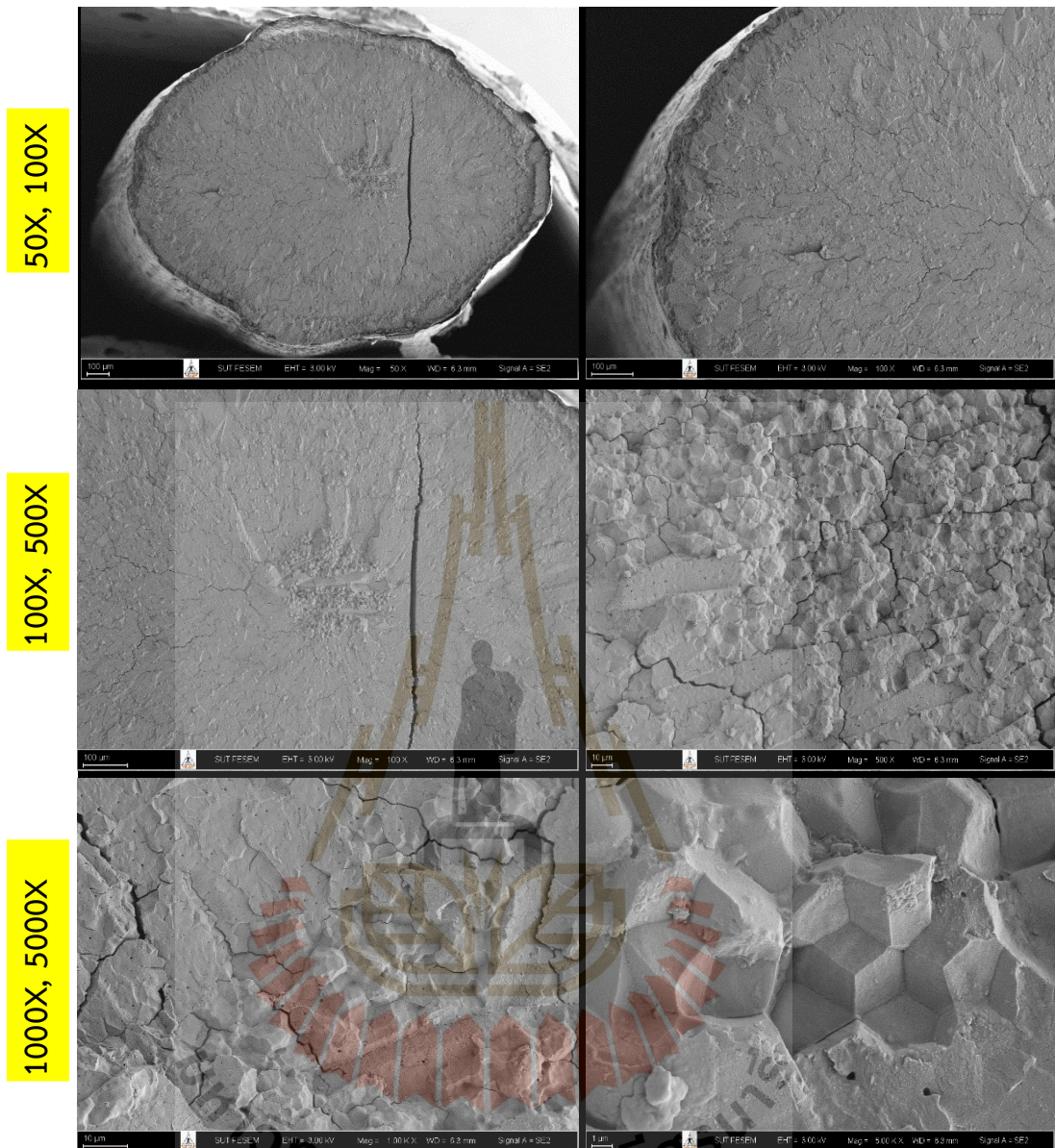
ในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอก AP8h, HP2b2h และHP2b2h-I ซึ่งผ่านการบดละเอียด ด้วย Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) ที่ขนาดกำลังขยายภาพ 1000 และ 5000 เท่า (รูปที่ 4.21) และลักษณะโครงสร้างตามแนวขวาง (Cross-sections) ของเมล็ดข้าวกล้องงอก AP8h, HP2b2h และHP2b2h-I ขนาดกำลังขยายภาพ 50, 100, 500, 1000 และ 5000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.22, 4.23, และ 4.24 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่า ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการบดละเอียดทั้ง 3 ตัวอย่าง มีลักษณะผิวเรียบ ไม่ขรุขระ และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ช ซึ่งพบใน HP2b2h-I ค่อนข้างแน่น (รูปที่ 4.21) และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางของเมล็ดข้าวกล้องงอกทั้ง AP8h, HP2b2h และHP2b2h-I (รูปที่ 4.22 – 4.24) พบว่า ลักษณะโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวกล้องงอกคล้ายกัน กล่าวคือ ชั้นที่ผิวของเมล็ดข้าวมีความหนาใกล้เคียงกัน มีรอยร้าวเล็ก ๆ กระจายอยู่บนพื้นผิวหน้าตัดของข้าวกล้องงอก นอกจากนี้ลักษณะของเม็ดสตาร์ชนั้นมีผิวเรียบและการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ชค่อนข้างแน่น ทั้งนี้เม็ดสตาร์ชมีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยม และขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชอยู่ระหว่าง 4 – 6 μm คล้ายกับลักษณะของเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องธรรมดา (BR) และข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด (GBR) ที่พบในงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) และ Chungcharoen et al. (2015) ซึ่งรายงานไว้ว่า ลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องมีรูปทรงหลายเหลี่ยมเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นโดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 3 – 5 μm ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก และการทำแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟราเรด ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิว โครงสร้าง และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องงอก ทั้งนี้อาจเนื่องจาก ระดับความดันไฮโดรสแตติกที่ใช้ค่อนข้างต่ำ (Mild hydrostatic pressure) ซึ่งจากงานวิจัยของ Xia, Wang, Li (2018) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติก (50 – 350 MPa, 20 min) มีผลทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสตาร์ช (Starch digestibility) และลดปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยของข้าวกล้องงอก ทั้งนี้เนื่องจาก ความดันไฮโดรสแตติกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ช นอกจากนี้ผล SEM พบว่า ผิวของเม็ดสตาร์ชขรุขระ และเป็นหลุม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (ไม่ผ่านการใช้ความดัน) โดยลักษณะผิวที่ขรุขระ

และเป็นหลุมเหล่านี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ได้ นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างของสตาρχแบบอสัณฐาน (Amorphous form) ทำให้การย่อยสลายง่ายขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันผลด้วย FTIR นอกจากนี้ He et al. (2021) พบว่า เพิ่มระยะเวลาการเพาะงอกข้าวกล้อง (0, 12, 24, 36, และ 48 h) ทำให้ค่าความเป็นผลึก (Relative crystallinity) ของข้าวกล้องงอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์ Amylase ย่อยสลายโครงสร้าง Double helix ของ สตาρχ ซึ่งทำให้สตาρχมีโครงสร้างแบบอสัณฐานมากขึ้น (ลดโครงสร้างแบบผลึก) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการนำข้าวกล้องงอกทั้ง 3 ตัวอย่าง (AP8h, HP2b2h และ HP2b2h-I) ไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นผลึกของสตาρχภายในเมล็ดข้าวด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering ซึ่งจะช่วยอธิบายผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมีและโครงสร้างของสตาρχต่อไป

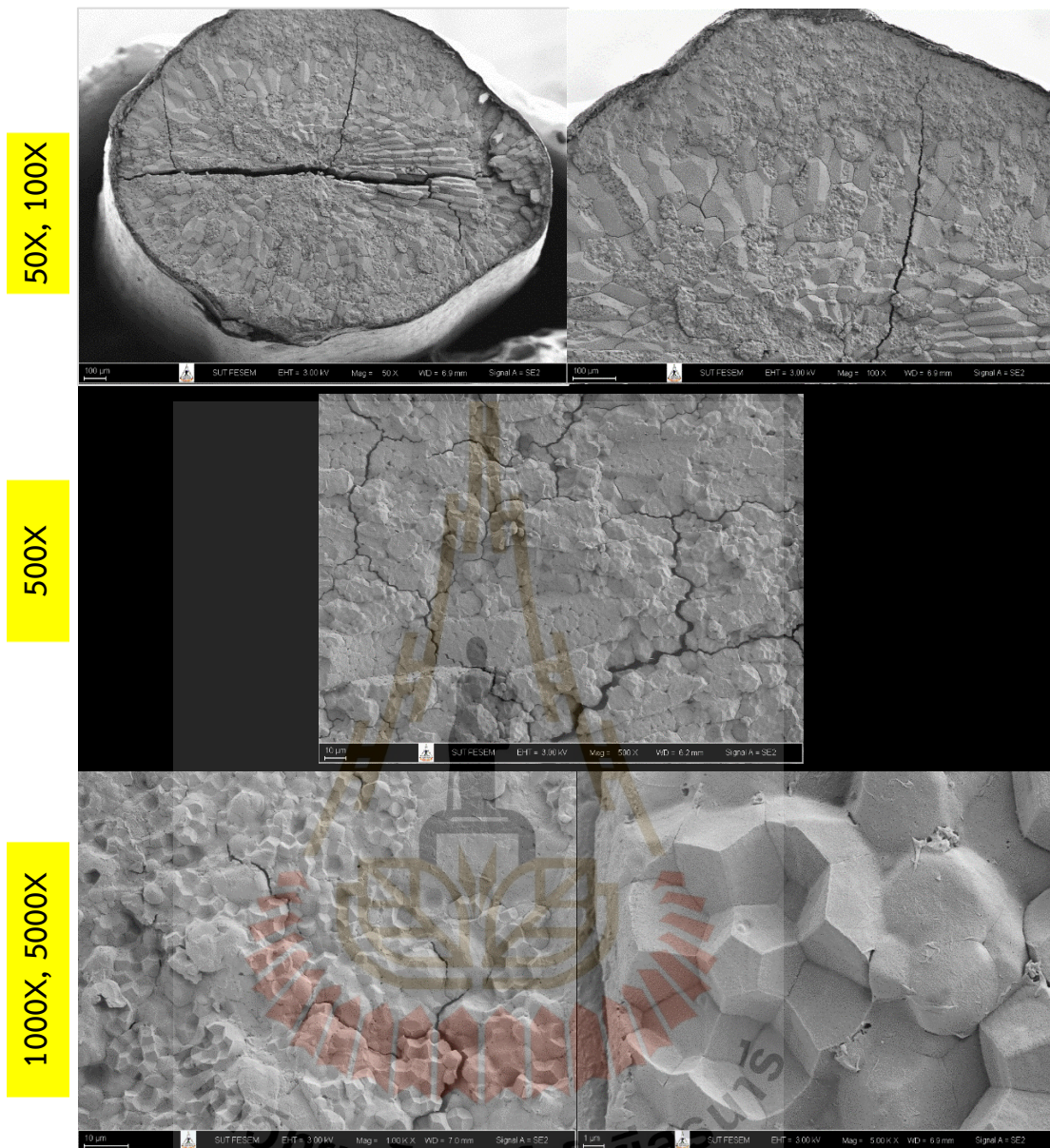
ในงานวิจัยนี้ ได้วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติผ่านกล้องจุลทรรศน์ (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy, SR-XTM) โดยสามารถอธิบายลักษณะช่องว่าง รูพรุน และรอยร้าวบนพื้นผิวและภายในแกนของเมล็ดข้าวได้ อีกทั้ง SR-XTM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและไม่ทำลายตัวอย่างให้เสียหาย (Tiozon et al., 2020) จากรูปที่ 4.25 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคของ BR, AP8h, HP2b2h, HP4b2h และ HP2b2h-AP6h โดยสีเขียวแสดงถึงอากาศภายในเมล็ดข้าว ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะรูพรุน และรอยร้าวภายในเมล็ดข้าวได้ จากผลการวิเคราะห์ พบว่า โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวกล้องธรรมดาและข้าวกล้องงอกมีรอยร้าวตามแนวขวางของเมล็ดในทุกตัวอย่าง และลักษณะรูพรุนภายในเมล็ดข้าวคล้ายกัน จากผลการวิเคราะห์นั้นแสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวกล้องและการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะรอยร้าวและรูพรุนภายในเมล็ดข้าว เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา จากงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) พบว่า การใช้รังสีอินฟราเรดในการทำแห้งข้าวเปลือกมีผลทำให้เกิดลักษณะรูพรุนภายในเมล็ดข้าวมากกว่าการทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด ทั้งนี้เนื่องจากรังสีอินฟราเรดสามารถลดความชื้นภายในเมล็ดข้าวได้อย่างรวดเร็วซึ่งทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเซลล์มากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้เมล็ดข้าวมีความเป็นรูพรุนและเปราะมากขึ้น นอกจากนี้ รังสีอินฟราเรดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและกายภาพของเมล็ดข้าวเนื่องจากเกิดการเจลาติไนเซชันของสตาρχหรือทำให้เกิดรอยร้าวเนื่องจากความร้อน (Semwal and Meera, 2020) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดในการนำ HP2b2h-I ไปวิเคราะห์โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวกล้องงอกด้วยเทคนิค SR-XTM ต่อไป



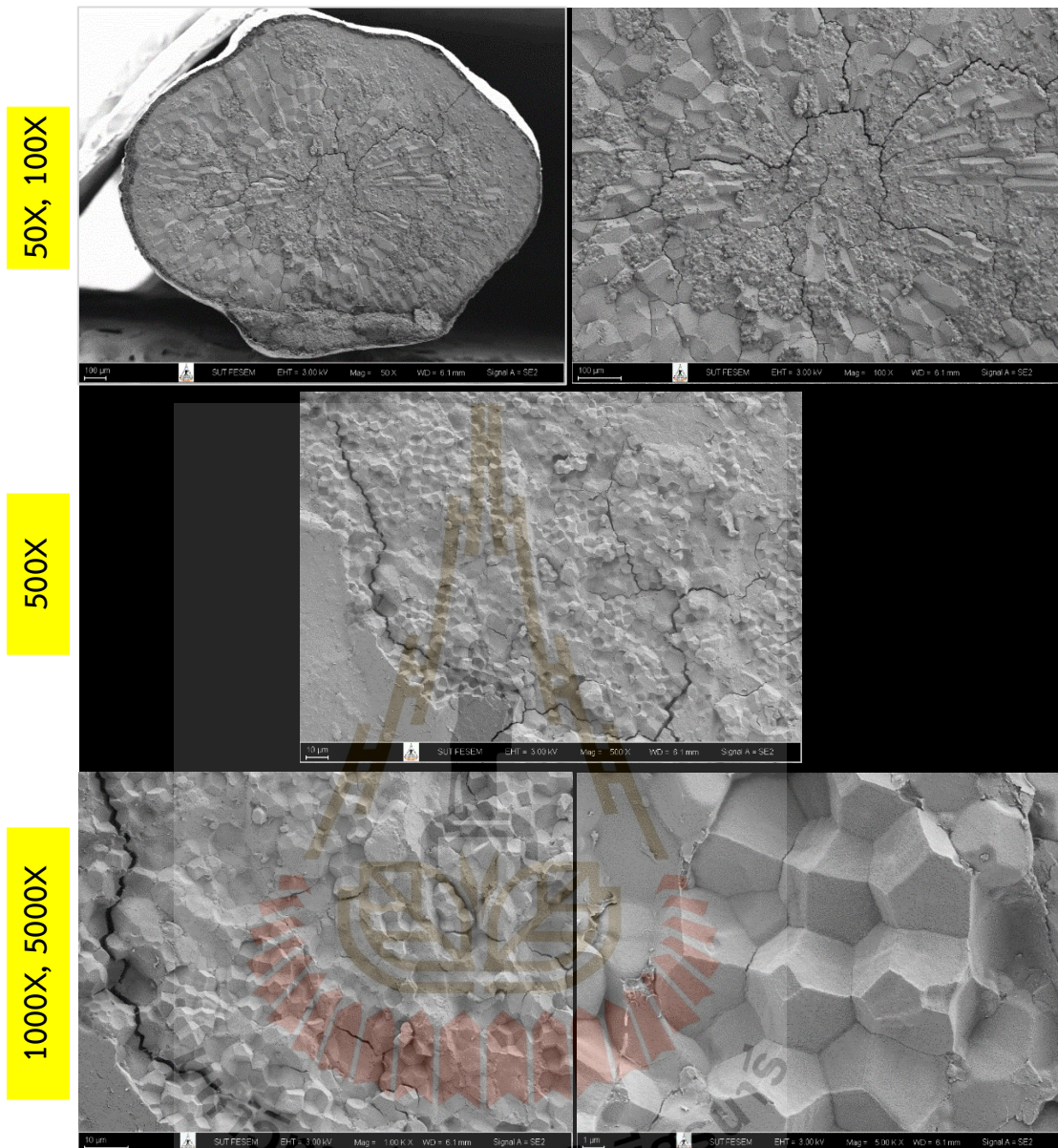
รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย FE-SEM ของข้าวบดละเอียด: (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำเพาะงอกเป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด; HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (ระดับกำลังขยายของภาพ 1000x และ 5,000x)



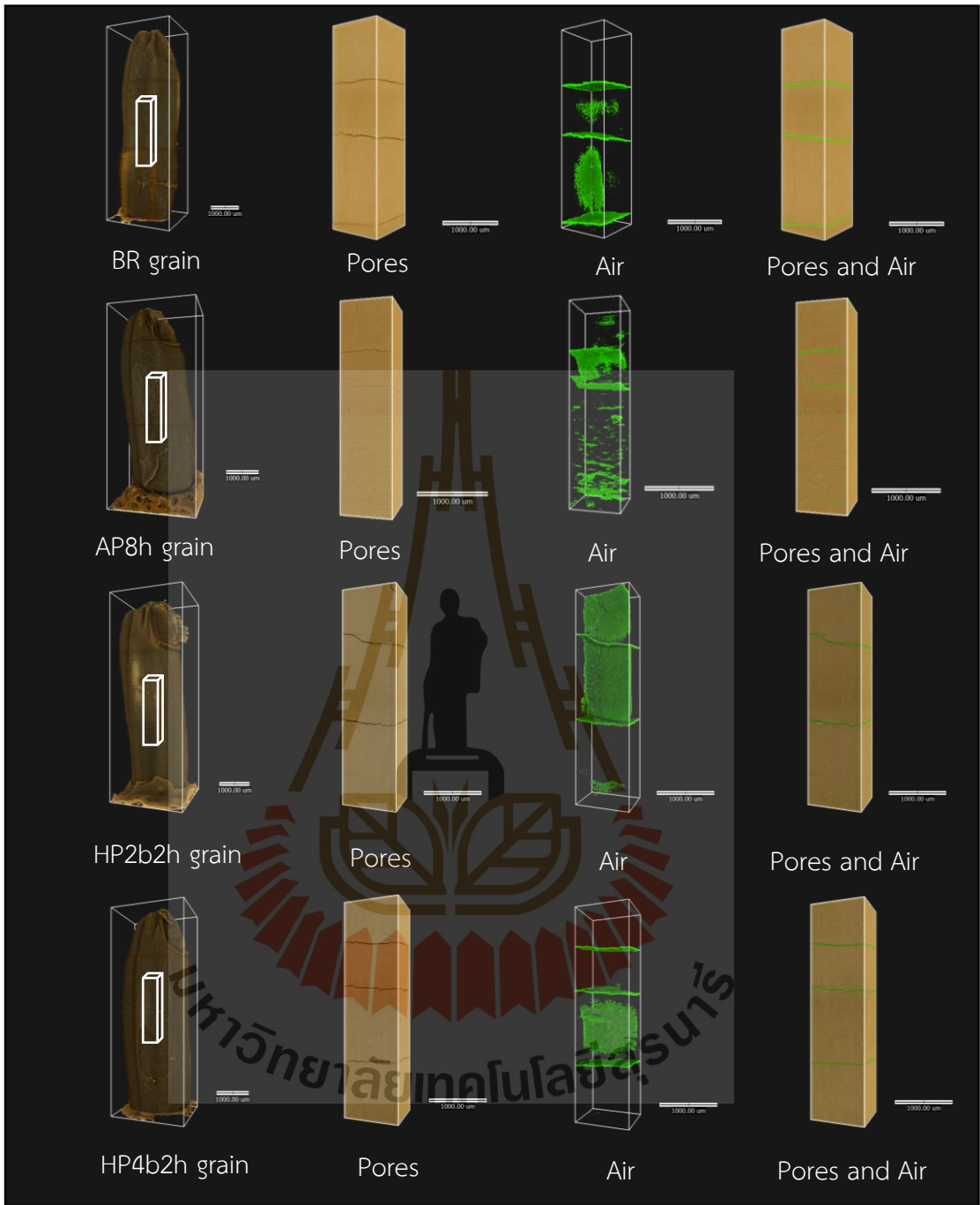
รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย FE-SEM แนวขวางของเมล็ดข้าวและเม็ดสตาร์ช: (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำเพาะงอกเป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมดและทำแห้งด้วยการตากแดด (ระดับกำลังขยายของภาพ 50x, 100x, 500x, 1,000x และ 5,000x)

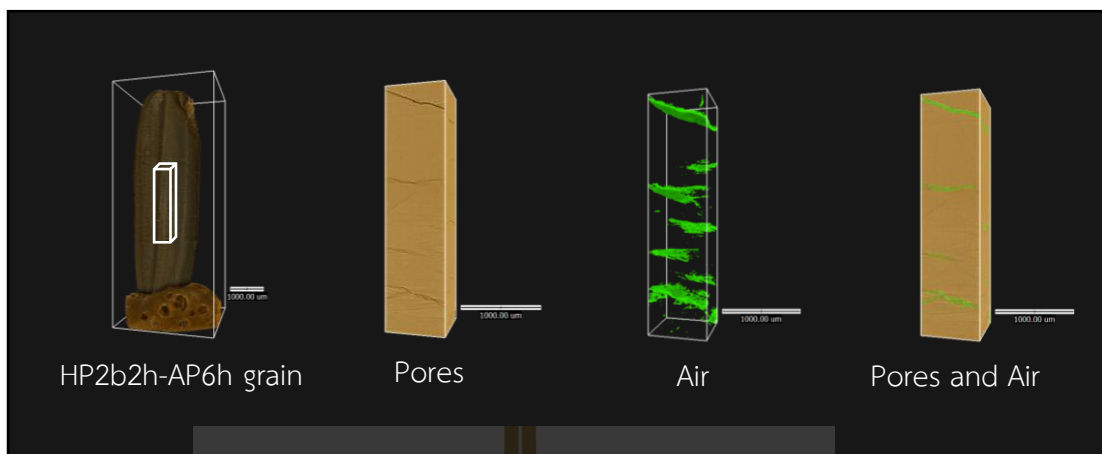


รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย FESEM แนวขวางของเมล็ดข้าวและเมล็ดสตาร์ช: (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h โดยข้าวกล้องงอกจะถูกนำเพาะงอกเป็นเวลา 36 h และทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด (ระดับกำลังขยายของภาพ 50x, 100x, 500x, 1,000x และ 5,000x)



รูปที่ 4.24 ภาพถ่าย FE-SEM แนวขวางของเมล็ดข้าวและเม็ดสตาร์ช: HP2b2h-I คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (ระดับกำลังขยายของภาพ 50x, 100x, 500x, 1,000x และ 5,000x)





รูปที่ 4.25 ภาพถ่าย SRXTM: (BR) ข้าวกล้องธรรมชาติ; (AP8h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 8 h; (HP2b2h) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h; HP4b2h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 4 bar เป็นเวลา 2 h; HP2b2h-AP6h คือ ข้าวกล้องงอกที่ผ่านสภาวะการแช่ข้าวที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก 2 bar เป็นเวลา 2 h และแช่ข้าวต่อที่ความดันบรรยากาศ เป็นเวลา 6 h โดยข้าวกล้องงอกแต่ละชนิดจะถูกนำมาทำแห้งด้วยการตากแดดทั้งหมด (ส่วนที่เป็นสีเขียวแทนอากาศภายในเมล็ดข้าว)

4.2.4 สรุปผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก (GBR) ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ สี เนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR และโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM และ SR-XTM โดยแบ่งหัวข้อการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ผลของสภาวะการแช่และการเพาะงอกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือก (2) ผลของการกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกด้วยความดันไฮโดรสแตติก และ (3) ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวกล้องงอก ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้อุณหภูมิ 40°C ในการแช่ข้าวเปลือกมีผลทำให้อัตราการงอกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการใช้อุณหภูมิ 30°C โดยสภาวะในการเพาะงอกข้าวเปลือกที่เหมาะสม คือ การแช่ข้าวเปลือกนาน 8 h ที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ และเพาะงอกเป็นเวลา 36 h ที่อุณหภูมิ 30°C (AP8h) ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 92.67%

2. การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 และ 4 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 1.5 – 3 h สามารถกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกหลังจากเพาะงอกนาน 24 h และ 36 h แต่การเพิ่มระดับความดันมีผลทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือกลดลง

3. การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกต่อ นาน 36 h ทำให้ได้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 80.20% ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเตรียมข้าวเปลือก งอกเพียง 38 h (HP2b2h)

4. การเพาะงอกข้าวเปลือกมีผลทำให้ TRY ลดลง และค่า FG เพิ่มขึ้นอย่างมี นัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา แต่การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar ในการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h) ก่อนการเพาะงอกนาน 36 h ทำให้ได้ HRY สูงที่สุด

5. การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 และ 4 bar ในการแช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกนาน 36 h (HP2b2h และ HP4b2h) มีผลทำให้สารกาบา และ TPC ของข้าวกล้อง งอกเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำให้ได้สาร γ -Oryzanol และความสามารถ ในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ ความดันบรรยากาศ (AP8h)

6. การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าว นาน 2 h เพาะงอกต่อ นาน 36 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตทั้งหมด ข้าวต้น และ ปริมาณโปรตีนรวมทั้งลดปริมาณรอยร้าวของข้าวกล้องงอกได้ เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือก งอกด้วยการตากแดด (HP2b2h)

7. การทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) ช่วยเพิ่มปริมาณสาร กาบามาเพิ่ม และ γ -Oryzanol ของข้าวกล้องงอกมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถ ในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และลดปริมาณ TPC ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ABTS และค่าความสว่างของข้าวกล้องงอกลง เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตาก แดด (HP2b2h)

8. การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าว นาน 2 h (HP2b2h) และทำ แห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I) มีผลทำให้ข้าวกล้องงอกมีค่าความแข็งลดลง เมื่อเทียบกับการไม่ ใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก (AP8h)

9. การวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณโปรตีน และการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวและการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสี อินฟราเรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของสตาร์ชและโครงสร้างของโปรตีน (Amide I)

10. การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือก และการทำแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟราเรด ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิว โครงสร้าง และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ช ลักษณะรอยร้าวและรูพรุนภายในเมล็ดข้าว

ดังนั้นจากตารางที่ 4.21 สามารถสรุปผลของการศึกษาดังกล่าวในรูปแบบของตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.21 สรุปผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

Treatment	Quality alteration
การเพาะงอก	- เพิ่มปริมาณรอยร้าว
ข้าวเปลือก	- ลดปริมาณผลผลิตทั้งหมด
การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด	- เพิ่มปริมาณสารกาบา และสาร γ -oryzanol - ลดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ABTS และค่าความสว่าง
ความดันไฮโดรสแตติก HP2b2h	- เพิ่มสาร γ -oryzanol และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ - ลดค่าความแข็ง
ความดันไฮโดรสแตติก HP2b2h-I	- เพิ่มปริมาณผลผลิตทั้งหมด ข้าวต้น และปริมาณโปรตีน - ลดปริมาณรอยร้าว และค่าความแข็ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

บทนี้สรุปผลการศึกษาวิธีการผลิตข้าวเปลือกงอกต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ (1) ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก และ (2) ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก

5.1.1 ผลของการนึ่งและวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

5.1.1.1 การเพาะงอกข้าวเปลือก

มีผลทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ ปริมาณสารกาบา, α -Tocopherol และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่การนึ่งข้าวเปลือกงอกทำให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก ได้แก่ ปริมาณสารกาบา, α -Tocopherol และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด รวมทั้งความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม การนึ่งข้าวเปลือกงอกทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีลักษณะหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน และช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้นและลดการเกิดรอยร้าวของเมล็ดข้าว

5.1.1.2 การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

ช่วยลดปริมาณรอยร้าวของข้าวกล้องงอกที่ผ่านการนึ่ง (PGBR-I) และใช้ระยะเวลาการทำแห้งสั้น ซึ่งช่วยในคงปริมาณสารกาบาและ α -Tocopherol ของข้าวกล้องงอกได้ นอกจากนี้รังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเพิ่มรูพรุนภายในเมล็ดข้าวทำให้ข้าวกล้องงอกสุกมีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่ม สอดคล้องกับภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM และ FE-SEM

5.1.1.3 ค่าสี

ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีขาว (W) ของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (GBR-O) มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่งและทำแห้งด้วยการตากแดด (GBR-S) และรังสีอินฟราเรด (GBR-I) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.1.1.4 การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด

เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มปริมาณข้าวต้น และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกที่ไม่ผ่านการนึ่ง (GBR-I) และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกให้มีความนุ่มมากขึ้น

5.1.2 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอก

5.1.2.1 การใช้อุณหภูมิสูงในการแช่ข้าวเปลือก

การใช้อุณหภูมิสูงในการแช่ข้าวเปลือกมีผลทำให้อัตราการงอกลดลง โดยสถานะในการเพาะงอกข้าวเปลือกที่เหมาะสม คือ การแช่ข้าวเปลือกนาน 8 h ที่อุณหภูมิ 30°C ภายใต้ความดันบรรยากาศ และเพาะงอกเป็นเวลา 36 h ที่อุณหภูมิ 30°C (AP8h) ทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 92.67%

5.1.2.2 การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 และ 4 bar

การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 และ 4 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 1.5 – 3 h สามารถกระตุ้นการงอกของข้าวเปลือกหลังจากเพาะงอกนาน 24 h และ 36 h แต่การเพิ่มระดับความดันมีผลทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือกลดลง โดยสถานะที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติกคือ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 2 h และเพาะงอกต่อนาน 36 h ทำให้อัตราการงอกของข้าวเปลือก 80.20% ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเตรียมข้าวเปลือกงอกเพียง 38 h (HP2b2h)

5.1.2.3 การเพาะงอกข้าวเปลือก

มีผลทำให้ปริมาณผลผลิตทั้งหมดลดลง และค่า รอยร้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องธรรมดา แต่การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar ในการแช่ข้าวเปลือก (HP2b2h) ก่อนการเพาะงอกนาน 36 h ทำให้ได้ปริมาณข้าวต้นสูงสุด และลดค่าความแข็งของข้าวกล้องงอกสุก รวมทั้งทำให้ปริมาณสาร γ -Oryzanol และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

5.1.2.4 การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bar แช่ข้าวเปลือกนาน 2 h เพาะงอกนาน 36 h และทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (HP2b2h-I)

ช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตทั้งหมด ข้าวต้น และปริมาณโปรตีนรวมทั้งลดปริมาณรอยร้าวของข้าวกล้องงอกได้ นอกจากนี้การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเพิ่มปริมาณสารกาบาเพิ่ม และ γ -Oryzanol ของข้าวกล้องงอก เมื่อเทียบกับวิธีการทำแห้งข้าวเปลือกงอกด้วยการตากแดด (HP2b2h)

5.1.2.5 การวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA

จากการวิเคราะห์ PCA, Second derivative SR-FTIR และ HCA แสดงให้เห็นว่า การเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันบรรยากาศ (AP8h) มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโปรตีน และการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวและการทำแห้งข้าวเปลือกด้วยรังสีอินฟราเรดมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของสตาร์ชและโครงสร้างของ Amide I นอกจากนี้ FE-SEM และ SR-XTM แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกและการทำแห้งด้วยการใช้รังสีอินฟราเรด ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิว โครงสร้าง และการจัดเรียงตัวของเม็ดสตาร์ช ลักษณะรอยร้าวและรูพรุนภายในเมล็ดข้าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาการใช้ความดันในการเพาะงอกข้าวเปลือก

จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกต่ออัตราการงอกของข้าวเปลือกและคุณภาพของข้าวกล้องงอกซึ่งพบว่า การใช้ความดันช่วยกระตุ้นการงอกและเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอก โดยการศึกษาที่น่าสนใจเพิ่มเติมของการผลิตข้าวกล้องงอกคือ การเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้ความดันไฮโดรสแตติก และการเพาะงอกข้าวเปลือกภายใต้สภาวะสุญญากาศ ซึ่งการเพิ่มความเครียดด้วยความดันภายนอกให้กับเมล็ดข้าวอาจส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้

5.2.2 การศึกษาเพิ่มเติมของปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการงอกและคุณภาพของข้าวกล้องงอก

จากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกในการแช่ข้าวเปลือกสามารถศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการงอกและคุณภาพของข้าวกล้องงอกเพิ่มเติม เช่น การใช้สารละลายกรดกลูตามิก การใช้ น้ำสะอาดที่มีค่าความเป็นกรดต่างแตกต่างกัน รวมถึงการใช้เอนไซม์ในขั้นตอนการแช่ข้าวเปลือก

5.2.3 การเพิ่มมูลค่า

การนำข้าวกล้องงอกไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคได้บริโภคอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงต่อไป เช่นผลิตภัณฑ์ซีเรียลบาร์สำหรับผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพ

รายการอ้างอิง

- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2555). **มาตรฐานสินค้าเกษตรข้าวกล้องงอก**. หน้า 1-2.
- กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). **มาตรฐานสินค้าเกษตรข้าวไทย**. หน้า 1-2.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรกฎ เพ็ชรหัสธนะโยธิน, สุชน เสถียรยานนท์, และธิดา อมร. (2561). นวัตกรรมการผลิตข้าวกล้องงอกให้สารกาบาสูง. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 27(1), 115-129.
- กรมวิชาการเกษตรและกรมส่งเสริมสหกรณ์. (2541). **เทคโนโลยีการผลิตข้าวหอมมะลิคุณภาพดี**. เอกสารการบรรยายหลักสูตร หน้า 172.
- ชาญ มงคล. (2536). ข้าว. กรุงเทพฯ: คุรุสภา.
- ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. (2544). **เครื่องมือวิทยาศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. ขอนแก่น: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.
- นงนุช วงศ์สินชวน. (2555). การเพาะข้าวกล้องงอก. *วารสารรัฐสมิแล*, 33(2), 57-62.
- ปราณี อ่านเปรื่อง. (2557). **หลักการวิเคราะห์อาหารด้วยประสาทสัมผัส**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานมนัส ศิริสมบุญ. (2555). **เทคโนโลยีเนื้อสัมผัสของผลผลิตเกษตรและอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: มีน เซอร์วิส ซัพพลาย.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. (2555). การทำแห้งด้วยแสงอาทิตย์. สืบค้นจาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/002341/sun-drying>
- ภัสจันท์ หิรัญ, อรพิน เกิดชูชื่น, และณัฐฐา เล่าหกุลจิตต์. (2558). อิทธิพลของกระบวนการทางชีวภาพที่ส่งผลต่อการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้องหอมมะลิ 105 และข้าวฟ่างเฮกการ์. *วารสารวิจัย มสค สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 8(2), 67-85.
- ระบบคลังข้อมูลทางวิชาการ BRU. (2016). *บทที่ 5 กรดอะมิโนและโปรตีน*. สืบค้นจาก <http://dspace.bru.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/6970>
- วรรณวิไล ฤทธิเดช. (2550). *ผลของการงอกที่มีต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ คุณภาพการหุงต้มและคุณภาพการรับประทานของข้าวกล้องหอมมะลิ ข้าวมันปู (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต)*. มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

- สุรียา ทุดปอ, และจิตรา สิงห์ทอง. (2560). สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของแก่นตะวันที่มีอายุการเก็บเกี่ยวต่างกัน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 19(3), 45-57.
- อริญา ลาภโคกสูง. (2555). ผลของปริมาณอะมิโลสและโครงสร้างอะมิโลเพคตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ 3 (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- อินทาวุธ สรรพพรสถิตย์, กรุณาพร ปานวรรณ, ชุตติกา เกียรติเรืองไกร, และสายวรุฬ ชัยวานิชศิริ. (2558). ผลของวิธีการหุงต่อปริมาณกรดแกมมาอะมิโนบิวทีริก (กาบา) และสมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, 10(1), 30-41.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2538). *เคมีัญญาอาหาร*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). *ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Aboud, S. A., Altemimi, A. B., Al-Hilphy, A. R. S., Chen, L. Y., & Cacciola, F. (2019). A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. *Molecules*, 24(22), 4125. doi.org/10.3390/molecules24224125
- Amarowicz, R. (2009). Antioxidant activity of Maillard reaction products. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 111(2), 109–111. doi.org/10.1002/ejlt.200900011
- AOAC. (2000). Cereal foods. In W. Horwitz (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC international* (17th ed., pp. 24–46). Arlington, VA: AOAC International.
- Barbosa-Canovas, G. V., Pothakamury, U. R., Palou, E., & Swanson, B. G. (1998). *Nonthermal preservation of foods*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
- Borompichaichartkul, C., Wiset, L., Tulayatum, V., Tuntratean, S., Thetsupamorn, T., Impaprasert, R., & Waedalor, I. (2007). Comparative study of effects of drying methods and storage conditions on aroma and quality attributes of Thai jasmine rice. *Drying Technology*, 25(7), 1185–1192. doi.org/10.1080/07373930701438550
- Bualuang, O., Tirawanichakul, Y., & Tirawanichakul, S. (2012). Comparative study between hot air and infrared drying of parboiled rice: Kinetics and qualities

- aspects. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(6), 1119–1132. doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00813.x
- Cáceres, P. J., Peñas, E., Martínez-Villaluenga, C., Amigo, L., & Frias, J. (2017). Enhancement of biologically active compounds in germinated brown rice and the effect of sun-drying. *Journal of Cereal Science*, 73, 1–9. doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.001
- Cáceres, P. J., Villaluenga, C. M., Amigo, L., & Frias, J. (2014). Maximising the phytochemical content and antioxidant activity of Ecuadorian brown rice sprouts through optimal germination conditions. *Food Chemistry*, 152, 407–414. doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.156
- Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Arjharn, W., Treemnuk, T., Junyusen, P., & Pakawanit, P. (2021). Effects of parboiling and infrared radiation drying on the quality of germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11), e15892. doi.org/10.1111/jfpp.15892
- Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Moolkaew, P., Arjharn, W., & Junyusen, P. (2020). Effect of soaking and sprouting treatment on germination rate of paddy. *E3S Web of Conferences*, 187, 04016. doi.org/10.1051/e3sconf/202018704016
- Cheetangdee, N. (2019). Rice phenolics: Extraction, characterization, and utilization in foods. In R. R. Watson (Ed), *Polyphenols in plants* (2nd ed., pp. 217-242). Academic Press.
- Cheevitsopon, E., & Noomhorm, A. (2011). Effects of parboiling and fluidized bed drying on the physicochemical properties of germinated brown rice. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(12), 2498–2504. doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02773.x
- Cheevitsopon, E., & Noomhorm, A. (2015). Effects of superheated steam fluidized bed drying on the quality of parboiled germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(4), 349–356. doi.org/10.1111/jfpp.12239
- Chen, H. H., Chang, H. C., Chen, Y. K., Hung, C. L., Lin, S. Y., & Chen, Y. S. (2016). An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low-pressure plasma. *Food chemistry*, 191, 120-127. doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.083

- Chungcharoen, T., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P., & Soponronnarit, S. (2015). Effects of germination time and drying temperature on drying characteristics and quality of germinated paddy. *Food and Bioproducts Processing*, *94*, 707–716. doi.org/10.1016/j.fbp.2014.09.013
- Cnossen, A. G., Jiménez, M. J., & Siebenmorgen, T. J. (2003). Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering*, *59*(1), 61–69. doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00431-4
- Ding, J., Hou, G. G., Dong, M., Xiong, S., Zhao, S., & Feng, H. (2018). Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment. *Ultrasonics-Sonochemistry*, *41*, 484-491. doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.010
- Ding, C., Khir, R., Pan, Z., Wood, D.F., Venkitasamy, C., Tu, K., ... Berrios, J. (2018). Influence of infrared drying on storage characteristic of brown rice. *Food Chemistry*, *264*, 149-156. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.042
- Ding, C., Khir, R., Pan, Z., Zhao, L., Tu, K., Mashad, H. E., & McHugh, T. H. (2015). Improvement in shelf life of rough and brown rice using infrared radiation heating. *Food Bioprocess Technol*, *8*(5), 1149-1159. doi.org/10.1007/s11947-015-1480-5
- Ding, Y., Ban, Q., Wu, Y., Sun, Y., Zhou, Z., Wang, Q., ... Xiao, H. (2021). Effect of high hydrostatic pressure on the edible quality, health and safety attributes of plant-based foods represented by cereals and legumes: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-19. doi.org/10.1080/10408398.2021.2005531
- Dong, A., Caughey, B., Caughey, W. S., Bhat, K. S., & Coe, J. E. (1992a). Secondary structure of the pentraxin female protein in water determined by infrared spectroscopy: effects of calcium and phosphorylcholine. *Biochemistry*, *31*(39), 9364-9370.
- Dong, A., Huang, P., & Caughey, W. S. (1992b). Redox-dependent changes in beta-extended chain and turn structures of cytochrome c in water solution determined by second derivative amide I infrared spectra. *Biochemistry*, *31*(1), 182-189.

- Dongbang, W., & Matthujak, A. (2013). Anchovy drying using infrared radiation. *American Journal of Applied Sciences*, 1(4), 353-360. doi:10.3844/ajassp.2013.353.360
- Dupuis, J. H., Liu, Q., & Yada, R. Y. (2014). Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(6), 1219-1234.
- Eamarjarn, A., Theerakulkait, C., & Thanachasai, S. (2016). Effect of incubation time, buffer type and concentration on gamma-aminobutyric acid (GABA) production using Khao Dawk Mali 105 rice bran. *Agriculture and Natural Resources*, 5(1), 80-84. doi.org/10.1016/j.anres.2015.04.001
- Earnshaw, R. (1996). High pressure food processing. *Nutrition and Food Science*, 9(2): 8-11. doi.org/10.1108/00346659610108966
- Ertürk, B., & Meral, R. (2019). The impact of stabilization on functional, molecular and thermal properties of rice bran. *Journal of cereal science*, 88, 71-78. doi.org/10.1016/j.jcs.2019.05.011
- Farkas, D. F., & Hoover, D. G. (2000). High pressure processing. *Journal of Food Science Supplement*, 65(s8), 47-64. doi.org/10.1111/j.1750-3841.2000.tb00618.x
- Fetouhi, A., Benatallah, L., Nawrocka, A., Szymańska-Chargot, M., Bouasla, A., Tomczyńska-Mleko, M., ... Sujak, A. (2019). Investigation of viscoelastic behaviour of rice-field bean gluten-free dough using the biophysical characterization of proteins and starch: a FT-IR study. *Journal of food science and technology*, 5(3), 1316-1327. doi.org/10.1007/s13197-019-03602-2
- Galanakis, C. M. (2017). Introduction. In *Nutraceutical and Functional Food Components* (pp. 1-14). USA: Academic Press inc.
- Gonzalez-Aguilar, G. A., Kader, A. A., Brecht, J. K., & Toivonen, P. M. A. (2011). Fresh cut tropical and subtropical fruit products. In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 381-419). UK: Woodhead-Publishing inc.
- He, L. Y., Yang, Y., Ren, L. K., Bian, X., Liu, X. F., Chen, F. L., ... Zhang, N. (2021). Effects of germination time on the structural, physicochemical and functional properties of brown rice. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(4), 1902-1910. doi.org/10.1111/ijfs.15118

- Hu, Z. , Tang, X. , Liu, J. , Zhu, Z. , & Shao, Y. (2017). Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. *Food Chemistry*, *214*, 285- 292. doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.097
- Huang, H. W., Hsu, C. P., & Wang, C. Y. (2020). Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry. *Journal of Food and Drug Analysis*, *28*(1), 1-13. doi.org/10.1016/j.jfda.2019.10.002
- Irakli, M., Kleisaris, F., Mygdalia, A., & Katsantonis, D. (2018). Stabilization of rice bran and its effect on bioactive compounds content, antioxidant activity and storage stability during infrared radiation heating. *Journal of Cereal Science*, *80*, 135–142. doi.org/10.1016/j.jcs.2018.02.005
- Jongyingcharoen, J. S., & Cheevitsopon, E. (2016). Development of UV-treated cooked germinated brown rice and effect of UV-C treatment on its storability, GABA content, and quality. *LWT - Food Science and Technology*, *71*, 243–248. doi.org/10.1016/j.lwt.2016.03.044
- Junyusen, T., Chatchavanthatri, N., Liplap, P., Junyusen, P., Phan, V. M., & Nawong, S. (2022). Effects of Extraction Processes on the Oxidative Stability, Bioactive Phytochemicals, and Antioxidant Activity of Crude Rice Bran Oil. *Foods*, *11*(8), 1143. doi.org/10.3390/foods11081143
- Junyusen, T., Ngampang, N., Sangmuang, A., Suthada, S., & Chatchavanthatri, N. (2017). The effects of inulin on the textural, thermal, and microstructural properties of reduced-fat cheese. *Suranaree Journal of Science and Technology*, *24*(1), 23–30.
- Kim, H. S., Lee, E. J., Lim, S. T., & Han, J. A. (2015). Self-enhancement of GABA in rice bran using various stress treatments. *Food Chemistry*, *172*, 657-662.
- Kim, M. Y., Lee, S. H., Jang, G. Y., Li, M., Lee, Y. R., Lee, J. S., & Jeong, H.S. (2017). Changes of phenolic-acids and vitamin E profiles on germinated rough rice (*Oryza sativa* L.) treated by high hydrostatic pressure. *Food Chemistry*, *217*, 106-111.
- Komatsuzaki, N., Tsukahara, K., Toyoshima, H., Suzuki, T., Shimizu, N., & Kimura, T. (2007). Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice. *Journal of Food Engineering*, *78*(2), 556-560.

- Kong, J., & Yu, S. (2007). Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. *Acta biochimica et biophysica Sinica*, *39*(8), 549-559. doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x
- Kongmon, E., Jitvisate, M., Panchaisri, B., Techarang, J., Thumanu, K., & Rimjaem, S. (2020). Classification of ion-beam-induced traits in Thai jasmine rice mutants using synchrotron radiation FTIR microspectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *465*, 37-41. doi.org/10.1016/j.nimb.2019.12.029
- Lee, J., Kang, Y. R., Kim, Y. J., & Chang, Y. H. (2019). Effect of high pressure and treatment time on nutraceuticals and antioxidant properties of *Lonicera japonica* Thunb. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *54*, 243-251. doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.005
- Lim, K. T., Choi, J. M., Lim, W. C., Kim, J., Cho, H. Y., & Chung, J. H. (2014). Preparation and Characterization of Natural Material Extracted from Germinated Brown Rice. *Journal of Biosystems Engineering*, *39*(3), 235 - 243. doi.org/10.5307/JBE.2014.39.3.235
- Liu, X., Zhang, M., Duan, J., & Wu, K. (2008). Gene expression analysis of germinating rice seeds responding to high hydrostatic pressure. *Journal of plant physiology*, *165*(18), 1855-1864. doi.org/10.1016/j.jplph.2008.05.004
- Ma, Y., & SUN, D. W. (2009). Hardness of cooked rice as affected by varieties, cooling methods and chill storage. *Journal of food process engineering*, *32*(2), 161-176. doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00206.x
- Madalena, D., Pereira, R. N., Vicente, A. A., & Ramos, O.L. (2018). New insights on bio-based micro-and nanosystem in food. In *Reference Module in Food Science* (pp. 1-7). Netherlands: Elsevier.
- Mahfoudhi, N., Ksouri, R., & Hamdi, S. (2016). Nanoemulsions as potential delivery systems for bioactive compounds in food systems: preparation, characterization, and applications in food industry. In *Emulsions* (pp. 365-403). USA: Academic Press inc.
- Moongngarm, A., & Saetung, N. (2010). Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. *Food Chemistry*, *122*(3), 782-788. doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.053

- Oey, I., Lille, M., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2008). Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit-and vegetable-based food products: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(6), 320-328. doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.001
- Oli, P., Ward, R., Adhikari, B., & Torley, P. (2014). Parboiled rice: Understanding from a materials science approach. *Journal of Food Engineering*, 124, 173-183. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.010
- Pascual, C. S. C. I., Massaretto, I. L., Kawassaki, F., Barros, R. M. C., Noldin, J. A., & Marques, U. M. L. (2013). Effects of parboiling, storage and cooking on the levels of tocopherols, tocotrienols, and gamma-oryzanol in brown rice (*Oryza sativa* L.). *Food Research International*, 50(2), 676- 681. doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.013
- Pothakamury, U. R., Barbosa-Canovas, G. V., Swanson, B. G, & Meyer, R. S. (1995). The pressure builds for better food processing. *Chemical Engineering Progress*, 91(3). 45-55.
- Pradeep, P. M., Jayadeep, A., Guha, M., & Singh, V. (2014). Hydrothermal and biotechnological treatments on nutraceutical content and antioxidant activity of rice bran. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 187-192. doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.025
- Puangwerakul, Y., & Klaharn, W. (2010). Changes of vitamin B1 and GABA content in pilot plant scale production of KDML 105 parboiled germinated rice. Proceeding of the 48th Kasetsart University Annual Conference. Kasetsart University. 3-5 March 2010, Bangkok, Thailand.
- Roy, M., Dutta, H., Jaganmohan, R., Choudhury, M., Kumar, N., & Kumar, A. (2019). Effect of steam parboiling and hot soaking treatments on milling yield, physical, physicochemical, bioactive and digestibility properties of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3524-3533. doi.org/10.1007/s13197-019-03849-9
- Saelim, N., Treamnuk, K., & Treamnuk, T. (2018). Development of infrared radial radiation dryer for paddy. Proceeding of Eighth International Conference on Advances in Mechanical, Aeronautical and Production Techniques-MAPT. G Tower Hotel. 3-4 February 2018, Kuala Lumpur, Malaysia

- Sakai, N., & Mao, W. (2006). Infrared heating. In *Da-Wen and Sun (eds.), Thermal Food Processing* (pp. 493-525). USA: Taylor and Francis Group.
- Semwal, J., & Meera, M. S. (2020). Infrared radiation: Impact on physicochemical and functional characteristics of grain starch. *Starch-Stärke*, *73*(3-4), 2000112. doi.org/10.1002/star.202000112
- Shittu, T. A., Olaniyi, M. B., Oyekanmi, A. A., & Okeleye, K. A. (2012). Physical and water absorption characteristics of some improved rice varieties. *Food and Bioprocess Technology*, *5*(1), 298-309. doi.org/10.1007/s11947-009-0288-6
- Sirisoontaralak, P., Nakornpanom, N. N., Koakietdumrongkul, K., & Panumaswiwath, C. (2015). Development of quick cooking germinated brown rice with convenient preparation and containing health benefits. *LWT - Food Science and Technology*, *61*(1), 138-144. doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.015
- Sivam, A. S., Sun-Waterhouse, D., Perera, C. O., & Waterhouse, G. I. N. (2013). Application of FT-IR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and polyphenols. *Food Research International*, *50*(2), 574-585. doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.039
- Srichamnong, W., Thiyajai, P., & Charoenkiatkul, S. (2016). Conventional steaming retains tocopherols and γ -oryzanol better than boiling and frying in the jasmine rice variety Khao dok mali 105. *Food Chemistry*, *191*, 113-119. doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.027
- Suresh, D. M., Sajan, D., Laladas, K. P., Joe, I. H., & Jayakumar, V. S. (2008). Vibrational Spectra of γ -Aminobutyric Acid. *AIP Conference Proceedings*, *1075*(1), 95-97. doi.org/10.1063/1.3046239
- Tiozon Jr, R., Bonto, A., Rojviriya, C., Sreenivasulu, N., & Camacho, D. (2020). Microstructural Analysis of Ultrasound-treated Rice by Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy. Proceeding of DLSU Research Congress 2020. De La Salle University. 17-19 June 2020, Manila, Philippines
- Tumpanuvat, T., Jittanit, W., & Surojanametakul, V. (2018). Effects of drying conditions in hybrid dryer on the GABA rice properties. *Journal of Stored Products Research*, *77*, 177-188. doi.org/10.1016/j.jspr.2018.04.009

- Umnajkitikorn, K., Faiyue, B., & Saengnil, K. (2013). Enhancing antioxidant properties of germinated thai rice (*Oryza sativa L.*) cv. Kum Doi Saket with salinity. *Journal of Rice Research*, *1*(1), 103. doi.org/10.4172/jrr.1000103
- Wang, P., Liu, K., Gu, Z., & Yang, R. (2018). Enhanced γ -aminobutyric acid accumulation, alleviated componential deterioration and technofunctionality loss of germinated wheat by hypoxia stress. *Food chemistry*, *269*, 473-479. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.050
- Wu, Z., He, Y., Yan, W., Zhang, W., Liu, X., Hui, A., ... Li, H. (2020). Effect of high-pressure pre-soaking on texture and retrogradation properties of parboiled rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(10), 4201-4206. doi.org/10.1002/jsfa.11058
- Xia, Q., & Li, Y. (2018). Mild high hydrostatic pressure pretreatments applied before soaking process to modulate wholegrain brown rice germination: An examination on embryo growth and physicochemical properties. *Food Research International*, *106*, 817-824. doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.052
- Xia, Q., Wang, L., & Li, Y. (2018). Exploring high hydrostatic pressure-mediated germination to enhance functionality and quality attributes of wholegrain brown rice. *Food Chemistry*, *249*, 104-110. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.007
- Xia, Q., Wang, L., Yu, W., & Li, Y. (2017). Investigating the influence of selected texture-improved pretreatment techniques on storage stability of wholegrain brown rice: Involvement of processing-induced mineral changes with lipid degradation. *Food Research International*, *99*, 510-521. doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.020
- Xia, Q., Liu, Q., Denoya, G. I., Yang, C., Barba, F. J., Yu, H., & Chen, X. (2022). High Hydrostatic Pressure-Based Combination Strategies for Microbial Inactivation of Food Products: The Cases of Emerging Combination Patterns. *Frontiers in Nutrition*, *9*. doi.org/10.3389/fnut.2022.878904
- Yongsawatdigul, J., Rodtong, S., & Raksakulthai, N. (2007). Acceleration of Thai fish sauce fermentation using proteinases and bacterial starter cultures. *Journal of Food Science*, *72*(9), M382-M390. doi.org/10.1111/j.1750-3841-2007.00532.x

Zhang, Q., Xiang, J., Zhang, L., Zhu, X., Evers, J., Van der Werf, W., & Duan, L. (2014). Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-aminobutyric acid content in japonica and indica germinated brown rice. *Journal of functional foods*, 10, 283-291. doi.org/10.1016/j.jff.2014.06.009





ภาคผนวก ก

ผลของการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

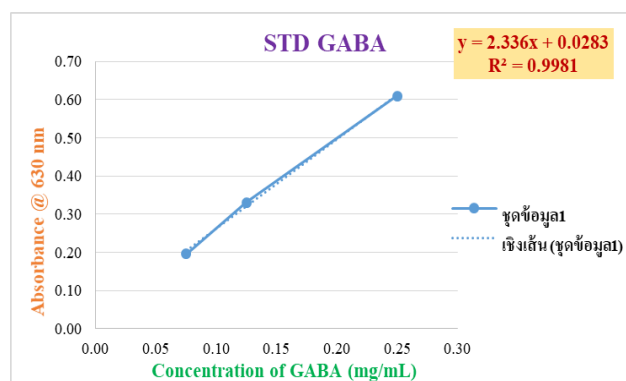
สำหรับการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถวิเคราะห์ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างเพื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน โดยความเข้มข้นของสารละลายกาบาที่ใช้ในการทดลองขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่างที่ทำการศึกษา อีกทั้งสามารถคำนวณปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยแทนค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างเข้าไปในสมการเชิงเส้นของสารละลายมาตรฐานที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน โดยสามารถอธิบายรายละเอียด ได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาจะวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 630 nm ของตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานของสารละลายกาบา โดยความเข้มข้นของสารละลายกาบาที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 และสามารถสร้างกราฟสารละลายมาตรฐานได้ในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของสารละลายกาบา

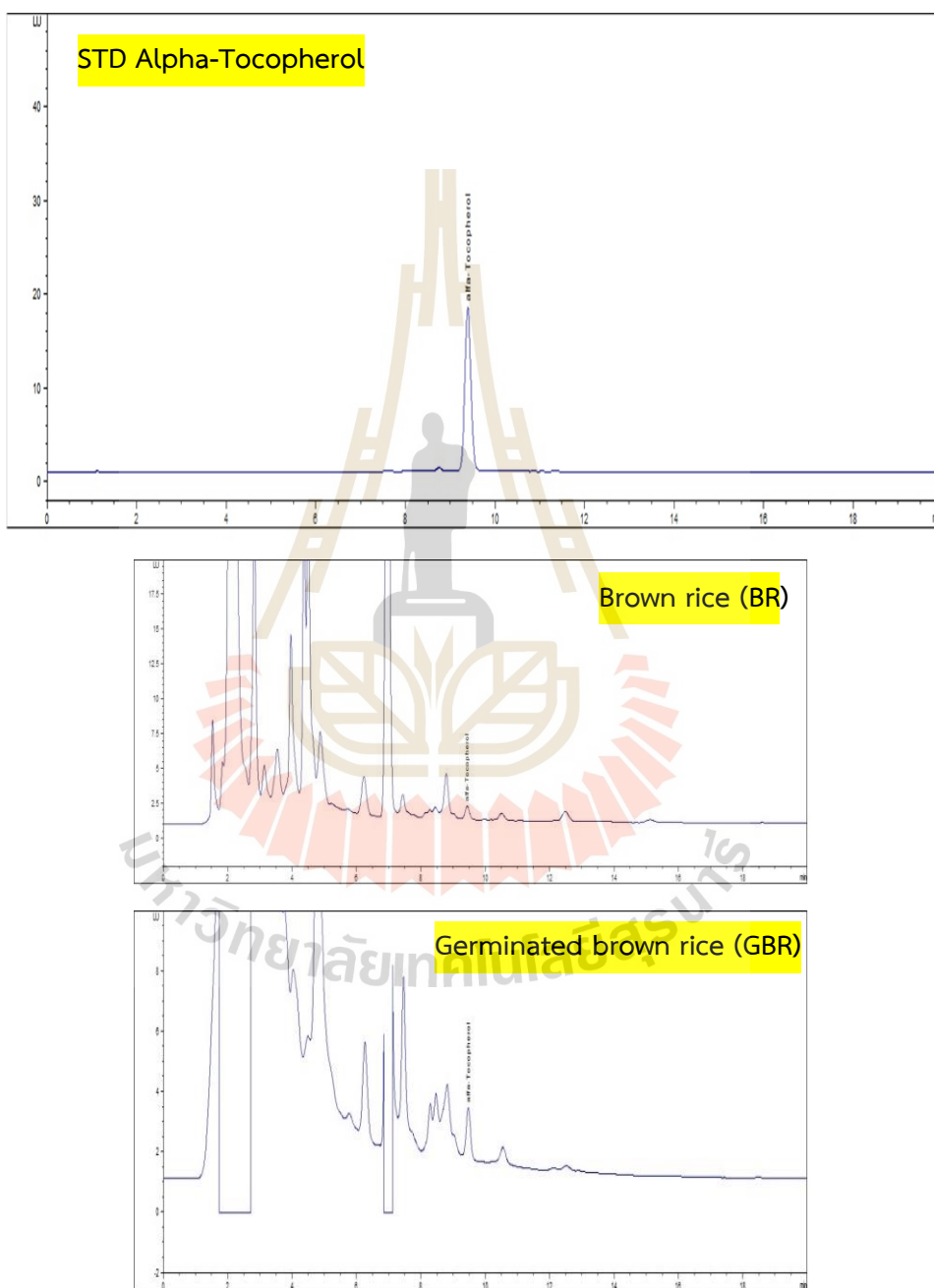
STD no.	Concentration of GABA (mg/mL)
1	0.250
2	0.125
3	0.100
4	0.075
5	0.050



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกาบา

2. การวิเคราะห์ปริมาณ α -Tocopherol

สำหรับการวิเคราะห์จะใช้เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) กับตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานเพื่อนำมาเทียบกับตัวอย่าง พบของข้อมูลจะแสดงในลักษณะเป็นพีคของแต่ละตัวอย่าง ดังแสดงผลการวิเคราะห์ของสารละลายมาตรฐานและตัวอย่าง ในรูปที่ 2



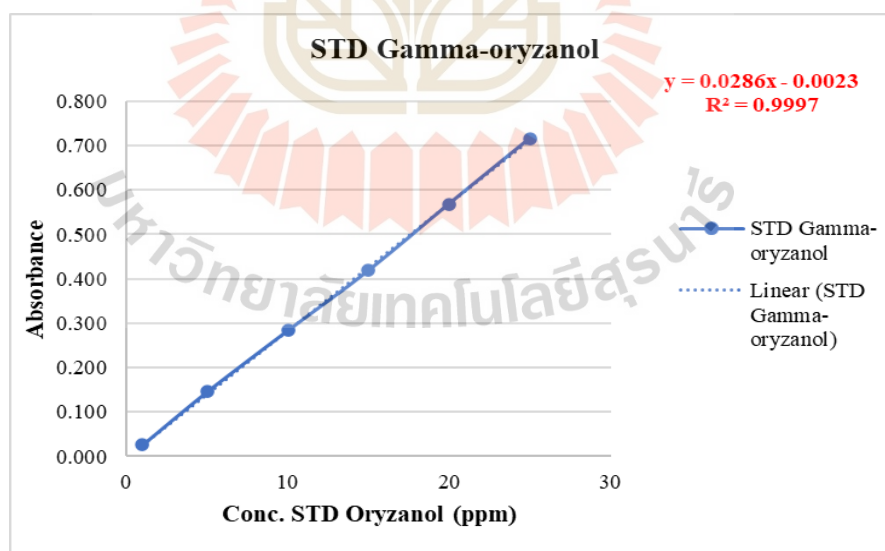
รูปที่ 2 ตัวอย่างผลของสารละลายมาตรฐานและตัวอย่างจากการวิเคราะห์ปริมาณ α -Tocopherol ด้วยเครื่อง HPLC

3. การวิเคราะห์ปริมาณสาร γ -Oryzanol

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแกมมา-โอไรซานอลสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 314 nm ของตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานของสารละลายแกมมา-โอไรซานอล โดยความเข้มข้นของสารละลายแกมมา-โอไรซานอลที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2 และสามารถสร้างกราฟสารละลายมาตรฐานได้ในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารละลายแกมมา-โอไรซานอล

STD no.	Concentration of γ -Oryzanol (ppm)
1	25
2	20
3	15
4	10
5	5
6	1



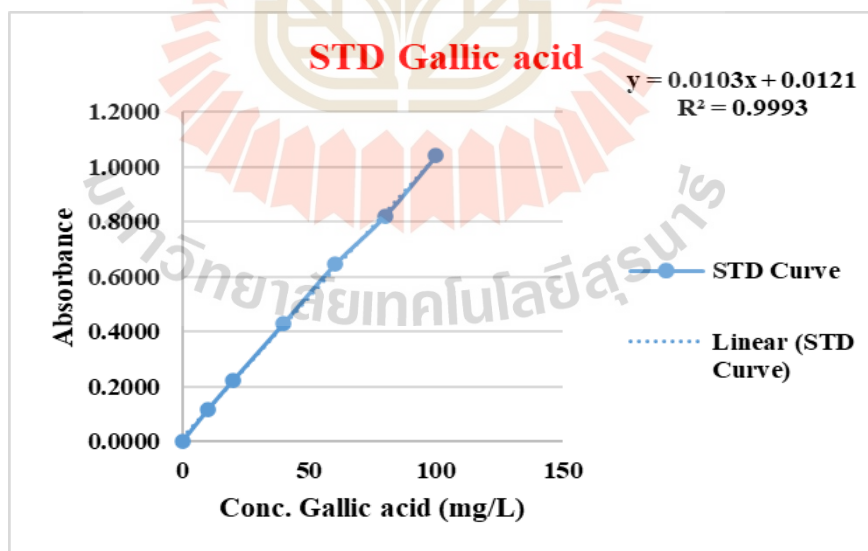
รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย γ -Oryzanol

4. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสามารถวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 760 nm ของตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานของสารละลายกรดแกลลิก โดยความเข้มข้นของสารละลายกรดแกลลิกที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3 และสามารถสร้างกราฟสารละลายมาตรฐานได้ในรูปที่ 4

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของสารละลายกรดแกลลิก

STD no.	Concentration of Gallic acid (mg/L)
1	10
2	20
3	40
4	60
5	80
6	100



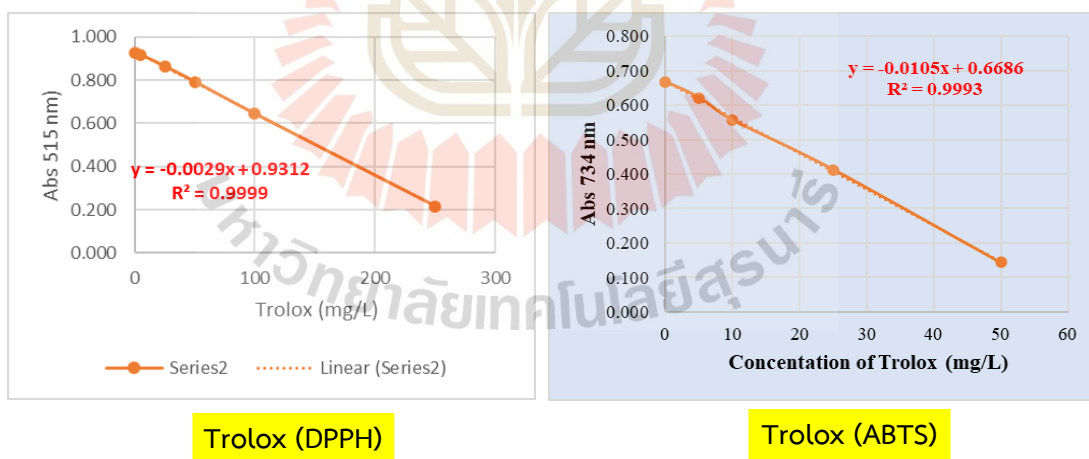
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายกรดแกลลิก

5. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS

สำหรับการวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 515 และ 734 nm ของตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานของสารละลาย Trolox โดยความเข้มข้นของสารละลาย Trolox ที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4 และสามารถสร้างกราฟสารละลายมาตรฐานได้ในรูปที่ 5

ตารางที่ 4 ความเข้มข้นของสารละลาย Trolox

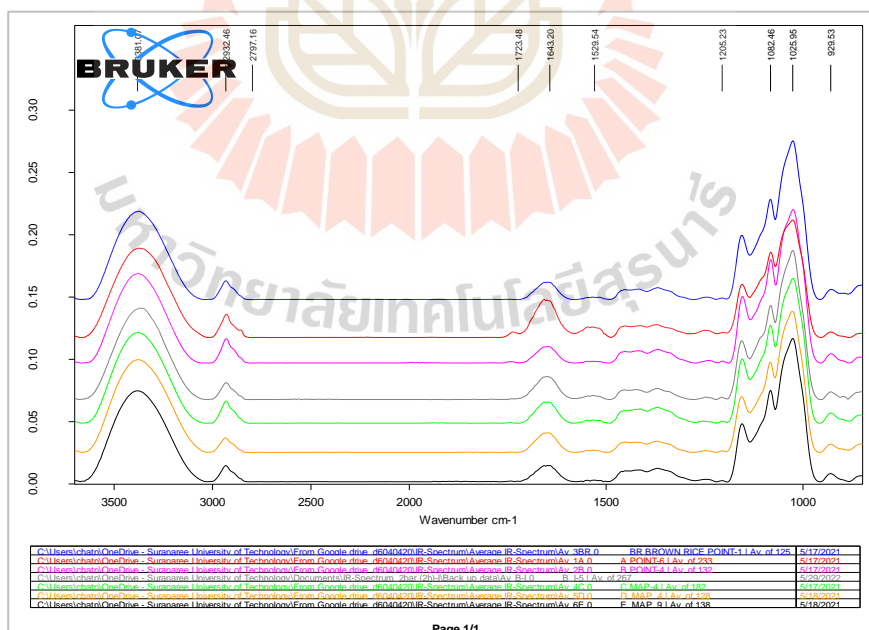
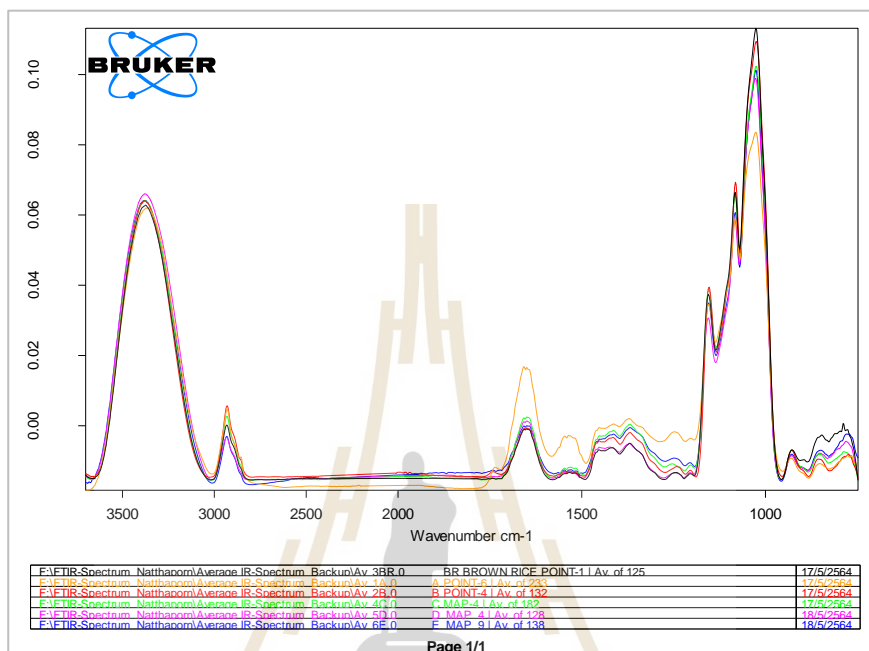
STD no.	Concentration of Trolox (mg/L)	
	DPPH	ABTS
1	0	0
2	5	5
3	25	10
4	50	25
5	100	50
6	250	-



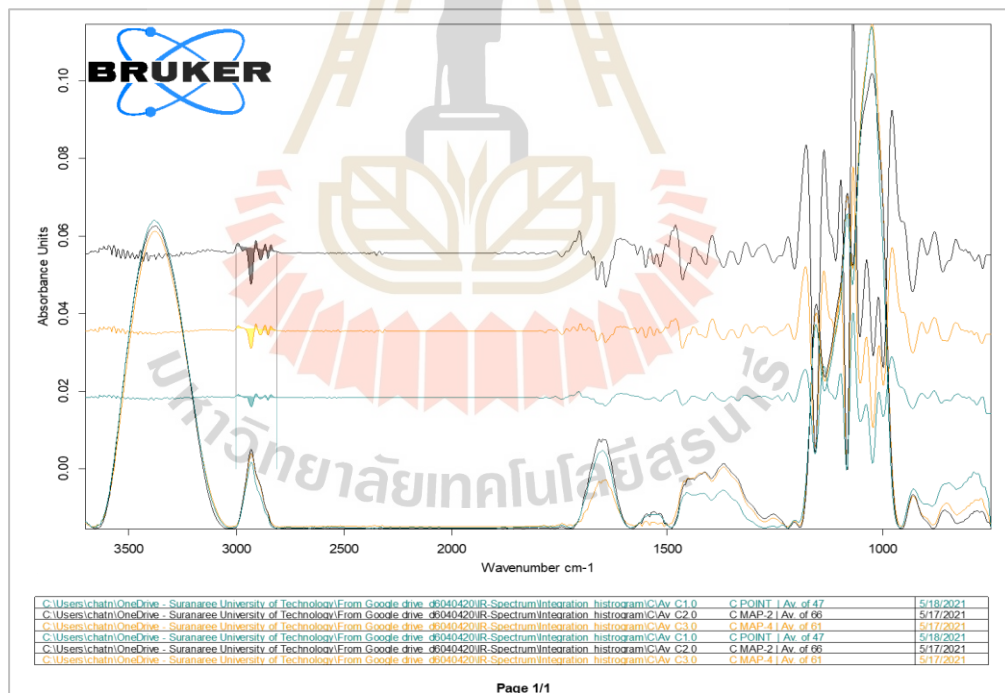
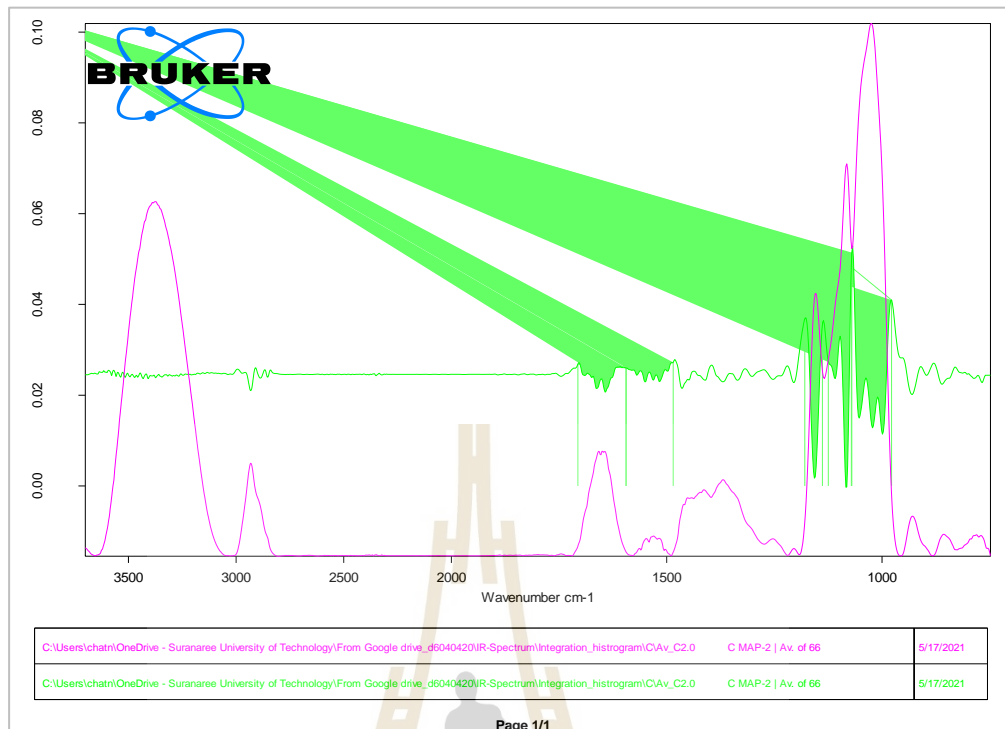
รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย Trolox

- การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกด้วย SR-FTIR

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมด้วยเทคนิค SR-FTIR ดังแสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ตัวอย่างผลข้อมูลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR



รูปที่ 7 ตัวอย่างผลข้อมูล SR-FTIR เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้กราฟ

ภาคผนวก ข
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

- Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Arjharn, W., Treamnuk, T., Junyusen, P., & Pakawanit, P. (2021). Effects of parboiling and infrared radiation drying on the quality of germinated brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(11), e15892. doi.org/10.1111/jfpp.15892
- Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Moolkaew, P., Arjharn, W., & Junyusen, P. (2020). Effect of soaking and sprouting treatment on germination rate of paddy. *E3S Web of Conferences*, 187, 04016. doi.org/10.1051/e3sconf/202018704016

ประวัติผู้เขียน

นางสาวณัฐพร ชัชวาลธাত্রี เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 ศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 ที่โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2559

ปี พ.ศ.2560 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างการศึกษาอยู่ได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและอาหาร ปฏิบัติการวิศวกรรมการแปรรูปอาหาร และปฏิบัติการเคมีและจุลชีววิทยาของอาหารเบื้องต้น นอกจากนี้ได้มีโอกาสเข้าร่วมนำเสนอผลงานทางวิชาการที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และงานวิจัยที่สนใจในด้านอื่นๆ อีกทั้งได้รับรางวัลจากผลงานทางวิชาการดังกล่าว โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- การประชุมวิชาการระดับชาติ

ปี พ.ศ.2562 นำเสนอผลงาน การประชุมวิชาการระดับชาติ (6th FENETT) ได้รับรางวัล “บทความวิจัยดีเด่นระดับชาติ, นำเสนอบทความวิจัยดีเด่นระดับชาติอันดับสอง”

ปี พ.ศ. 2561 นำเสนอผลงาน การประชุมวิชาการระดับชาติ (5th FENETT) ได้รับรางวัล “นำเสนอบทความวิจัยดีเด่นระดับชาติ”

ปี พ.ศ.2560 นำเสนอผลงาน การประชุมวิชาการระดับชาติ (4th FENETT) ได้รับรางวัล “บทความวิจัยดีเด่นระดับชาติ” และนำเสนอผลงานการประชุมวิชาการระดับชาติ (19th TSAE)

- การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

ปี พ.ศ.2564 ส่งผลงานเข้าประกวด ASEAN Youth Innovation (video competition) 6th ARC2021 “Silver Award of Video Competition”

ปี พ.ศ.2562 นำเสนอผลงาน การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (13th TSAE, Thailand) ได้รับรางวัล "Best Presentation Award on Post Harvest and Food Engineering"

ปี พ.ศ.2561 นำเสนอผลงาน การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (ICFEB 2019, Japan)