การพัฒนาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกเพื่อผลิตข้าวพอง

นายศักดิ์สิทธิ์ สอนสมบูรณ์สุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2564

DEVELOPMENT OF GERMINATED BROWN RICE PREPARATION METHODS FOR PUFFED RICE PRODUCTION

SAKSIT SONSOMBOONSUK

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering Program in Mechanical and

Process System Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2021

การพัฒนาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกเพื่อผลิตข้าวพอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธิราพร จุลยุเสน)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค)
กรรมการ

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศักดิ์สิทธิ์ สอนสมบูรณ์สุข : การพัฒนาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกเพื่อผลิตข้าวพอง (DEVELOPMENT OF GERMINATED BROWN RICE PREPARATION METHODS FOR PUFFED RICE PRODUCTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิราพร จุลยุเสน, 151 หน้า

คำสำคัญ : ข้าวกล้องงอกพอง/วิธีการหุงข้าว/ความดันไฮโดรสแตติก/การพองตัว/ความกรอบ/สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองเพื่อเพิ่มการพองตัวและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดยได้แบ่งการศึกษาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) ผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของ Puffed GBR และ (2) ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของ Puffed GBR พบว่า วิธีการหุงข้าวกล้องงอกแต่ละวิธีมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและลักษณะเนื้อสัมผัสของ Puffed GBR โดยการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทั้งไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS) มีผลทำให้ Puffed GBR มีการพองตัวและความกรอบมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้าวกล้องงอกเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งมีผลทำให้ชั้นผิวของเมล็ดข้าวแข็งแรงและเกิดการพองตัวระหว่างทำพองได้ดี การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM แสดงให้เห็นว่า Puffed EC และ Puffed UEC มีความพองตัวมากกว่าและชั้นผิวของเมล็ดบางกว่า Puffed GBR ที่ได้จากการหุงด้วยวิธีอื่น ๆ นอกจากนี้วิธีการหุงข้าวแต่ละวิธีไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ สารกาบา สารแกมมา-โอรีซานอล สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระของ Puffed GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่การทำข้าวกล้องงอกพองลดปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอก การใช้ความดันไฮโดรสแตติกเพื่อปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุกที่ 2 และ 4 bars นาน 2 และ 4 h ก่อนนำไปแช่เย็นเป็นเวลา 0, 4, 24 และ 48 h พบว่า การเพิ่มความดันไฮโดรสแตติกจาก 2 bars เป็น 4 bars และระยะเวลาการแช่เย็นข้าวนาน 48 h มีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกของสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวสุกเพิ่มมากขึ้น การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 4 bars นาน 2 h ก่อนนำไปแช่เย็นเป็นเวลา 48 h ทำให้ข้าวกล้องงอกพอง (Puffed-4b2h) มีการพองตัวและความกรอบสูงสุด การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM แสดงให้เห็นว่า Puffed-4b2h มีลักษณะผิวเรียบ ความพองตัวสูง และรูพรุนมีขนาดใหญ่ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

การใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้าหุงข้าวกล้องงอกและการใช้ความดันไฮโดรสแตติกปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุกช่วยเพิ่มการพองตัวและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนักศึกษา ____________
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ____________

SAKSIT SONSOMBOONSUK : DEVELOPMENT OF GERMINATED BROWN RICE PREPARATION METHODS FOR PUFFED RICE PRODUCTION. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TIRAPORN JUNYUSEN, Ph.D., 151 PP.

Keyword : Puffed Germinated Brown Rice/Cooking Methods/Hydrostatic Pressure/Expansion/Crispness/Bioactive Compounds

This research aimed to investigate the effects of germinated brown rice (GBR) preparation methods for enhancing the expansion and crispness of puffed GBR. The study was divided into two parts. The first part examined the effects of cooking methods and the second part established the effects of hydrostatic pressure on the improvement of puffed GBR quality. The results showed that cooking methods affected the physical and textural properties of puffed GBR. Cooking methods using an electric rice cooker without and with ultrasonic pretreatment (EC and UEC) and ultrasonic pretreatment followed by parboiling and steaming (UPS) improved the expansion and crispness of puffed GBR. These cooking methods caused complete gelatinization of starch granules contributing to crust formation, which led to the expansion during puffing. In addition, SR-XTM revealed that puffed EC and puffed UEC had higher expansion and thinner surface layers than other puffed GBR. Different cooking methods did not significantly affect the bioactive compounds, including GABA, gamma-oryzanol, total phenolic compounds, and antioxidant activities of puffed GBR ($p<0.05$). However, puffed rice production significantly reduced the bioactive compounds of puffed GBR when compared with GBR. Hydrostatic pressure pretreatments of cooked GBR at 2 and 4 bars for 2 and 4 h prior to refrigeration for 0, 4, 24 and 48 h were studied. The results indicated that higher pressure level pretreatment before 48 h refrigeration increased the crystallinity in starch granules. Interestingly, hydrostatic pressure at 4 bars for 2 h of cooked GBR significantly increased

the expansion and crispness of puffed GBR (Puffed-4b2h). FE-SEM also showed that Puffed-4b2h had a smooth surface, high expansion, and large pores. Essentially, cooking GBR with an electric rice cooker followed by hydrostatic pressure pretreatment of cooked GBR significantly improved the expansion and crispness of puffed GBR.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2021

Student's Signature ____________

Advisor's Signature ____________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่อไปนี้ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิราพร จุลยุเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่เมตตาให้โอกาสทางการศึกษา ให้การอบรม สั่งสอน ให้ความรู้ ชี้แนะ ช่วยเหลือในการทำการศึกษาวิจัยทุกอย่างและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร กรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอันเป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณคณะครูอาจารย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และความสามารถแก่ผู้วิจัยและกรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย คุณกรรณิการ์ ประเสริฐสังข์ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยอำนวยความสะดวกในด้านเอกสารตลอดการวิจัยนี้ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบทุนการศึกษา “ผู้มีผลการเรียนดีเด่น ระดับบัณฑิตศึกษา” ตลอดระยะเวลาในระหว่างการศึกษา

ขอขอบพระคุณ ดร.ภัคนนันท์ ภัควนิตย์ ดร.นันทพร กมลสุทธิไพจิตร และดร.ศิริวรรณ ณะวงษ์ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และเจ้าหน้าที่บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัย

ท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ผู้วิจัยขอมอบให้แก่ครอบครัวและคณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

นายศักดิ์สิทธิ์ สอนสมบูรณ์สุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ค
กิตติกรรมประกาศ .... จ
สารบัญ .... ฉ
สารบัญตาราง .... ฎ
สารบัญรูปภาพ .... ฐ

บทที่

1 **บทนำ** 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 สมมติฐานของงานวิจัย 3
1.5 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย 3

2 **ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** 7
2.1 ข้าว 7
2.1.1 ต้นกำเนิดและพฤกษศาสตร์ของข้าว 7
2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าวเปลือก 8
2.1.3 กระบวนการสีข้าวกล้องเปลือก 8
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความหลากหลายของพันธุ์ข้าว 10
2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความแตกต่างของคุณภาพข้าวกล้อง 12
2.1.6 สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้อง 12
2.1.7 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง 14
2.1.7.1 คาร์โบไฮเดรต 15
2.1.7.2 โปรตีน 15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.7.3 แร่ธาตุและวิตามิน 16
2.1.7.4 สารต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้อง 16
2.1.8 สมบัติของข้าวกล้องหุงสุก 19
2.2 ข้าวกล้องงอก 20
2.2.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก 20
2.2.2 สมบัติทางสารอาหารของข้าวกล้องงอก 21
2.2.2.1 สารกาบา 22
2.2.2.2 สารแกมมา-โอรีซานอล 23
2.2.2.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 24
2.2.2.4 สตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ 24
2.2.3 การเตรียมข้าวเปลือกงอก 25
2.3 ข้าวพอง 28
2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของข้าวพอง 29
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำข้าวพอง 30
2.4 สตาร์ช 32
2.4.1 การเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชัน 32
2.4.1.1 การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเจลาติไนเซชัน 33
2.4.1.2 การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน 34
2.4.2 การศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช 34
2.4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของสตาร์ชโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด 34
2.4.2.2 การหาความเป็นผลึกของสตาร์ชด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering 35
2.4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 ความดัน.....37
2.5.1 ความดันไฮโดรสแตติก.....37
2.5.2 การใช้ความดันสูงต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน.....40
2.6 คลื่นอัลตราโซนิก.....43
2.6.1 ปรากฏการณ์แคปวิเตชัน.....44
2.6.2 การใช้คลื่นอัลตราโซนิก.....45
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....46
3.1 วัสดุ.....46
3.2 การเตรียมตัวอย่าง.....47
3.2.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง.....48
3.2.2 การศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง.....52
3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ.....55
3.3.1 สมบัติทางเคมี.....55
3.3.2 สมบัติทางกายภาพ.....57
3.4 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของข้าวกล้องงอกพอง.....60
3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกพองโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี.....61
3.6 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกสุกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering.....62
3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....63
3.8 การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ.....64
3.8.1 ปริมาณสารกาบา.....64
3.8.2 การวิเคราะห์สารแกมมา-โอรีซานอล.....64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8.3 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด 64
3.8.4 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอช 65
3.8.5 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีเอบีทีเอส 65
3.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ 66

4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล 67

4.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 67
4.1.1 ปริมาณผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง 68
4.1.2 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของข้าวกล้องงอกพอง 72
4.1.3 ปริมาณเถ้าและโซเดียมคลอไรด์ของข้าวกล้องงอกพอง 74
4.1.4 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดของข้าวกล้องงอกพอง 76
4.1.5 ค่าสีของข้าวกล้องงอกกล้องงอกพอง 77
4.1.6 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง 81
4.1.7 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกพองที่ผ่านการหุงข้าวด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 83
4.1.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของข้าวกล้องงอกพอง 86
4.1.9 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกพองโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี 92
4.2 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 97
4.2.1 ผลของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 97
4.2.1.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างของข้าวกล้องงอกพอง 97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกสุกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering 99
4.2.1.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง 105
4.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 107
4.2.2.1 ปริมาณผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง 107
4.2.2.2 สมบัติทางเคมีของข้าวกล้องงอกพอง 110
4.2.2.3 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง 112
4.2.2.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง 114
4.2.2.5 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกพอง 116
4.2.2.6 โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอกพอง 118
5 สรุปและข้อเสนอแนะ 121
5.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 121
5.2 การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 122
5.3 ข้อเสนอแนะ 123
รายการอ้างอิง 124
ภาคผนวก
ภาคผนวก 143
ประวัติผู้เขียน 151

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ค่าสีของข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ....13
2.2 ผลการเปรียบเทียบปริมาณสารกาบาระหว่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก 23
3.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง....49
3.2 การศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง....52
4.1 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) การขยายปริมาตร (Volume expansion) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....69
4.2 ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....70
4.3 อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....72
4.4 ปริมาณความชื้น (Moisture content) และปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, aw) ของตัวอย่าง....74
4.5 ปริมาณเถ้า (Ash content) และปริมาณเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl content) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....75
4.6 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS) ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด (Total starch) และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) ของ GBR และ Puffed GBR....77
4.7 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....83
4.8 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....86
4.9 พื้นที่ใต้พีคของ amide I และ amide II ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)....96

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.10 อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) 99
4.11 พื้นที่ใต้พีคของ WAXS curves ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็นเป็นเวลา 0 – 48 h 104
4.12 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) 109
4.13 ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) 109
4.14 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) 112
4.15 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) 118

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนการผลิตข้าวกล้องงอกพอง 6
2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว 9
2.2 ขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้อง 11
2.3 ขั้นตอนการผลิตข้าวเปลือกงอก 26
2.4 ข้าวกล้องงอกพอง 30
2.5 ลักษณะรูพรุนภายในเมล็ดข้าว (a) เมล็ดข้าวทั้งเมล็ด (b) ตัดขวางของเมล็ดข้าวครึ่งเมล็ด ... 31
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเม็ดสตาร์ชและอุณหภูมิ 33
2.7 ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของข้าว โดย (A) ข้าวดิบ (B) ข้าวนึ่งที่ผ่านการทำแห้ง (C) ข้าวพอง 36
2.8 ความสัมพันธ์ของความดันแบบต่าง ๆ 37
2.9 ความดันสถิตย์ โดย (A) แรงดันบนพื้นผิววัตถุจากทุกทิศทาง (B) แรงดันเหนือผิวของไหล (P0) and ความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของไหลที่ระดับความลึก h (Pg) 38
2.10 การแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารด้วยความดันสูง 39
2.11 การเปรียบเทียบลักษณะเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการทำให้เกิดเจลาติไนเซชันด้วยความร้อนและความดัน 40
2.12 ลักษณะภายในของเม็ดสตาร์ชที่สูญเสียวงแหวน 41
2.13 การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ชภายใต้ความดันและความร้อนสูง 42
2.14 ช่วงความถี่ของคลื่นเสียง 43
2.15 การเกิดและสลายฟองอากาศจำนวนมากอย่างรวดเร็วจากปรากฏการณ์แคปวิเตชัน 44
3.1 ข้าวกล้องงอก (GBR) สำหรับงานวิจัย 47
3.2 ขั้นตอนการผลิตและปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 48
3.3 วิธีการเตรียมและการทำพองข้าวกล้องงอกพอง 51
3.4 ชุดถังความดันไฮโดรสแตติกสำหรับงานวิจัย 53
3.5 การศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง 54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.6 การวิเคราะห์ความชื้นของข้าวกล้องงอกพอง 56
3.7 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระของข้าวกล้องงอกพอง 56
3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง 58
3.9 การวิเคราะห์ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง 58
3.10 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง..59
3.11 การวิเคราะห์อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวกล้องงอกพอง 60
3.12 แสดงการถ่ายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของข้าวกล้องงอกพอง 61
3.13 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกพองโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี...62
3.14 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกสุกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering (WAXS)...63
3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชัน...64
4.1 แสดงภาพข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากวิธีการหุงแบบต่าง ๆ..79
4.2 ค่าสีของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดย (A) ค่าความสว่าง (L*), (B) ค่าความเป็นสีแดง (a*), และ (C) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) 80
4.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน (A) ความแข็ง (Hardness) และ (B) ความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) 82
4.4 ภาพถ่าย SR-XTM ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการทำแห้ง (Pretreated GBR): (I) เมล็ดข้าว, (II) รูพรุน, (III) รูพรุนและอากาศ, (IV) ตัดตามแนวยาว, และ (IV) ตัดตามแนวขวาง...88

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.5 ภาพถ่าย SR-XTM ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR): (I) เมล็ดข้าว, (II) รูพรุน, (III) รูพรุนและอากาศ, (IV) ตัดตามแนวยาว, และ (IV) ตัดตามแนวขวาง 90
4.6 สเปกตรา SR-FTIR ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm-1 94
4.7 A) การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) จากสเปกตราของ SR-FTIR โดยมีองค์ประกอบร่วมที่ 1 (PC-1) และ 2 (PC-2) และ (B) การปรับสเปกตรา SR-FTIR ด้วยวิธี Second derivative ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm-1 95
4.8 การวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Hierarchical cluster analysis, HCA) ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm-1 96
4.9 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็นเป็นเวลา 0 – 48 h 101
4.10 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน (A) ความแข็ง (Hardness) และ (B) ความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) 106
4.11 ข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ผ่านการปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุกด้วยการใช้ความดันไฮโดรสแตติก 113
4.12 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดย (A) ค่าความสว่าง (L*), (B) ค่าความเป็นสีแดง (a*), (C) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และ (D) ดัชนีความเป็นสีน้ำตาล (Browning index, BI) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05).. 114
4.13 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน (A) ความแข็ง (Hardness) และ (B) ความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) 115

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.14 ภาพถ่าย FE-SEM ของ (A1-4) Puffed-control, (B1-4) Puffed-2b4h, และ (C1-4) Puffed-4b2h ระดับกำลังขยายที่ 17x, 25x, and 1,500x สำหรับ (1), (3), และ (2,4) ตามลำดับ 120

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันผู้บริโภคมีความตระหนักถึงความสัมพันธ์ระหว่างอาหารกับสุขภาพกันมากขึ้น จึงทำให้มีความสนใจในการเลือกบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ จากรายงานการวิจัยได้บ่งชี้ถึงการบริโภคอาหารที่มีปริมาณไขมันอิ่มตัว (Saturated fat) โซเดียม (Sodium) แป้ง (Starch) และน้ำตาล (Sugars) ในสัดส่วนที่สูงจะส่งเสริมการเป็นโรคประจำตัว เช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคเบาหวาน และโรคหัวใจ เป็นต้น ข้าวเป็นอาหารหลักประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั่วโลกโดยเฉพาะประเทศในทวีปเอเชีย คนไทยบริโภคข้าวเฉลี่ยสูงถึง 100 – 104 kg ต่อคนต่อปี ข้าวกล้องงอกเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น กรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริก (กาบา) สารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิก และแกมมา-โอรีซานอล เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้บางชนิดเป็นสารช่วยลดความดันโลหิต ช่วยทำให้สมองผ่อนคลาย ป้องกันโรคอัลไซเมอร์ ป้องกันโรคเบาหวาน และยับยั้งการสร้างเซลล์มะเร็ง (กรกฎ และคณะ, 2561) จากรายงานวิจัยของ นงนุช (2555) พบว่า การเพาะงอกข้าวกล้องเป็นเวลา 24 – 48 h ทำให้มีปริมาณกาบาเฉลี่ย 11.02 – 27.73 mg/ 100 g ตัวอย่างข้าว ซึ่งมีปริมาณกาบาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้องธรรมดาที่ไม่ผ่านการงอกมีปริมาณกาบาเฉลี่ย 1.00 – 6.04 mg/ 100 g

กระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การแช่ (Soaking) การเพาะงอก (Germinating) และการทำแห้ง (Drying) ซึ่งแต่ละขั้นตอนอาจมีผลทำให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีลักษณะเป็นข้าวเต็มเมล็ด (Whole kernels) ข้าวต้น (Head rice) และข้าวหัก (Brokens) ซึ่งลักษณะของเมล็ดข้าวมีผลต่อคุณภาพและมาตรฐานของข้าวด้วย ในประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่อง มาตรฐานสินค้าข้าว พ.ศ. 2559 หมวด 5 มาตรฐานข้าวกล้อง พบว่า ข้าวกล้อง 100% ต้องประกอบด้วยข้าวเต็มเมล็ดไม่น้อยกว่า 80% ข้าวหักไม่เกิน 4% ในส่วนที่เหลือนั้นจะเป็นข้าวต้น หากกระบวนการผลิตข้าวกล้องงอกของเกษตรกรทำให้ได้ข้าวต้นและข้าวหักในปริมาณที่สูงกว่าข้าวเต็มเมล็ด ก็อาจส่งผลต่อรายได้ของเกษตรกรในการจำหน่ายข้าวกล้องงอกได้ ดังนั้นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวกล้องงอกที่มีลักษณะเป็นข้าวต้นและข้าวหัก เช่น การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกพอง (Puffed germinated brown rice, Puffed GBR) สำหรับเป็นอาหารเช้าหรือขนมทานเล่น และการ

นำรำข้าวของข้าวกล้องงอกมาสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับการบริโภคหรือเป็นส่วนประกอบของเครื่องสำอาง เป็นต้น อาจช่วยเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรและเพิ่มทางเลือกในการบริโภคอาหารที่มีประโยชน์ต่อผู้บริโภคทั่วไปได้

วิธีการผลิตข้าวกล้องงอกพองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง (Rice preparation) และการทำพอง (Puffing) ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนนี้มีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง เช่น อัตราการพอง สี และความกรอบ เป็นต้น สำหรับปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการพองและความกรอบในขั้นตอนการเตรียมข้าว ได้แก่ การทำให้ข้าวสุกหรือเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ การเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวสุก และปริมาณความชื้นของข้าวสุกที่ผ่านการทำแห้ง (Dried cooked rice) ปัจจัยที่มีผลต่อการอัตราการพองในขั้นตอนการทำพอง ได้แก่ วิธีการทำพองโดยตัวกลางในการให้ความร้อน (Heating medium) ชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมัน ลมร้อน เกลือ และทราย เป็นต้น อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทำพอง เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการทำข้าวพองนิยมเลือกใช้น้ำมันพืชเป็นตัวกลางในการนำความร้อนเนื่องจากต้นทุนต่ำและสะดวกต่อการผลิต แต่การใช้น้ำมันนั้นส่งผลเสียต่อสุขภาพ จากงานวิจัยพบว่าการใช้น้ำมันพืชที่ผ่านความร้อนสูงซ้ำก่อให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง โรคหลอดเลือดหัวใจและสมองตีบ โรคหัวใจวาย โรคอัมพาต และเสี่ยงต่อการเป็นโรคมะเร็ง และยังส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ในเรื่องของการเกิดการเหม็นหืนมีผลทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางในการศึกษาและพัฒนาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองเพื่อเพิ่มอัตราการพองและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง และ (2) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติก และระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง รวมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง นอกจากนี้งานวิจัยมีต้องการลดการใช้น้ำมันพืชสำหรับทำให้ข้าวกล้องงอกพอง แต่ได้เลือกเกลือเป็น heating medium แทนน้ำมัน เนื่องจากเกลือมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) น้อยกว่าน้ำมัน และเกลือมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงกว่าน้ำมัน ซึ่งช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการทำพองได้สูงกว่าน้ำมัน ช่วยลดเวลาในการทำพอง รวมทั้งช่วยลดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเหม็นหืนได้ทำให้อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นานขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ (Functional food) ซึ่งเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคข้าว รวมทั้ง

เทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่ส่งเสริมให้สุขภาพของผู้บริโภคดีขึ้น และเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย (Research objectives)

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกพอง

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อการเพิ่มความพองของข้าวกล้องงอกพอง

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อสมบัติทางเคมี กายภาพ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกพอง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย (Scopes of research)

1.3.1 ข้าวกล้องงอกที่ใช้ในการทดลองนี้ได้มาจากการเพาะงอกข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยการแช่ข้าวนาน 24 h เพาะงอกนาน 48 h และทำแห้งโดยการตากแดดจนได้ความชื้น 14%

1.3.2 วิธีการทำพองนั้นใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนแทนน้ำมันพืช

1.3.3 งานวิจัยถูกดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เท่านั้น

1.4 สมมติฐานของงานวิจัย (Research hypotheses)

1.4.1 การใช้คลื่นอัลตราโซนิกปรับสภาพข้าวกล้องงอกก่อนการหุงข้าวกล้องงอกช่วยทำให้อัตราการพองและความกรอบของข้าวพองเพิ่มสูงขึ้น

1.4.2 การใช้ความดันไฮโดรสแตติกปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุกก่อนการแช่เย็นเพื่อทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันช่วยทำให้อัตราการพองและความกรอบของข้าวพองเพิ่มสูงขึ้น

1.5 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

การผลิตข้าวกล้องงอกพองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง (Rice preparation) และการทำพอง (Puffing) ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนนี้มีผลต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการพองในขั้นตอนการเตรียมข้าวนั้น ได้แก่ การทำให้ข้าวกล้องงอกสุกและเกิดเจลาติไนเซชันสมบูรณ์ การทำให้เกิดการคืนตัวหรือเกิดรีโทรเกรเดชัน

และปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกก่อนการทำให้พองที่เหมาะสม เป็นต้น สำหรับขั้นตอนการทำพองนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการอัตราการพอง เช่น วิธีการทำพอง อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทำพอง เป็นต้น จากงานวิจัยของ Mir et al. (2016) ได้ศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง พบว่าข้าวดิบมีลักษณะโครงภายในที่มีรอยร้าวในบางส่วน เมื่อนึ่งข้าวเพื่อปรับคุณภาพข้าวแล้วทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้ง (Starch granules) เกิดการบวมน้ำ และเกิดเจล (เจลาติไนเซชัน) ขึ้น มีผลทำให้ลดรอยร้าวในเมล็ดข้าวได้และเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของแป้งไปเป็นแบบ Amorphous ซึ่งทำให้เห็นว่าส่วนของเมล็ดข้าวหรือ Endosperm ดูเป็นเนื้อผสมเดียวกัน เมล็ดข้าวที่ผ่านการทำให้เกิดเจลาติไนเซชัน ผ่านการทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน และทำแห้งมีผลทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำไปทำพองโดยใช้อุณหภูมิสูงส่งผลให้น้ำภายในเมล็ดข้าวระเหยอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นแรงดันไอภายในเมล็ดข้าวดันให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวพองตัว เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่และเมล็ดข้าวมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ Pompe et al. (2020) ยังรายงานว่าผิว (Crust) ของเมล็ดข้าวก่อนทำพองที่หนา เป็นผลมาจากการเกิดเจลาติไนเซชันแล้วเกิดรีโทรเกรเดชัน ซึ่งมีผลทำให้เกิดการจับตัวกันแน่นของระหว่างอะมิโลสและส่วนผสมอื่นที่ละลายน้ำได้แล้วเคลื่อนที่ไปยังผิวของเมล็ดข้าว ทำให้ผิวของเมล็ดข้าวมีความหนาและแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันหรือชะลอการเคลื่อนที่ออกของไอน้ำได้ ทำให้เกิดความดันภายในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นและขยายตัวได้ Huang et al. (2018) พบว่า ในการทำข้าวพองโดยเลือกใช้ชนิดข้าวที่แตกต่างกัน เช่น ข้าวฟ่าง, ข้าวบาร์เลย์, ข้าวสาลี, ข้าวเจ้า, ข้าวดำ และข้าวเหนียว เป็นต้น ส่งผลต่อปริมาณสารสำคัญในข้าวพอง ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant), แร่ธาตุ, โปรตีน, และไขมัน ที่แตกต่างกัน Murgesan & Bhattacharta (1991) พบว่าการปรับปรุงคุณภาพเมล็ดข้าวก่อนการทำพองด้วยการแช่น้ำเกลือจะทำให้การพองตัวของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น 15% แต่ระยะเวลาในการแช่น้ำก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) Jayaraman (2019) รายงานว่า การปรับปรุงคุณภาพข้าวก่อนการทำพองที่สภาวะต่าง ๆ โดยการ แช่น้ำเป็นเวลา 2, 2.5, และ 3 h มีผลทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds, TPC) ลดลง โดยเฉพาะการแช่นานเป็นเวลา 3 h ทำให้ TPC ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

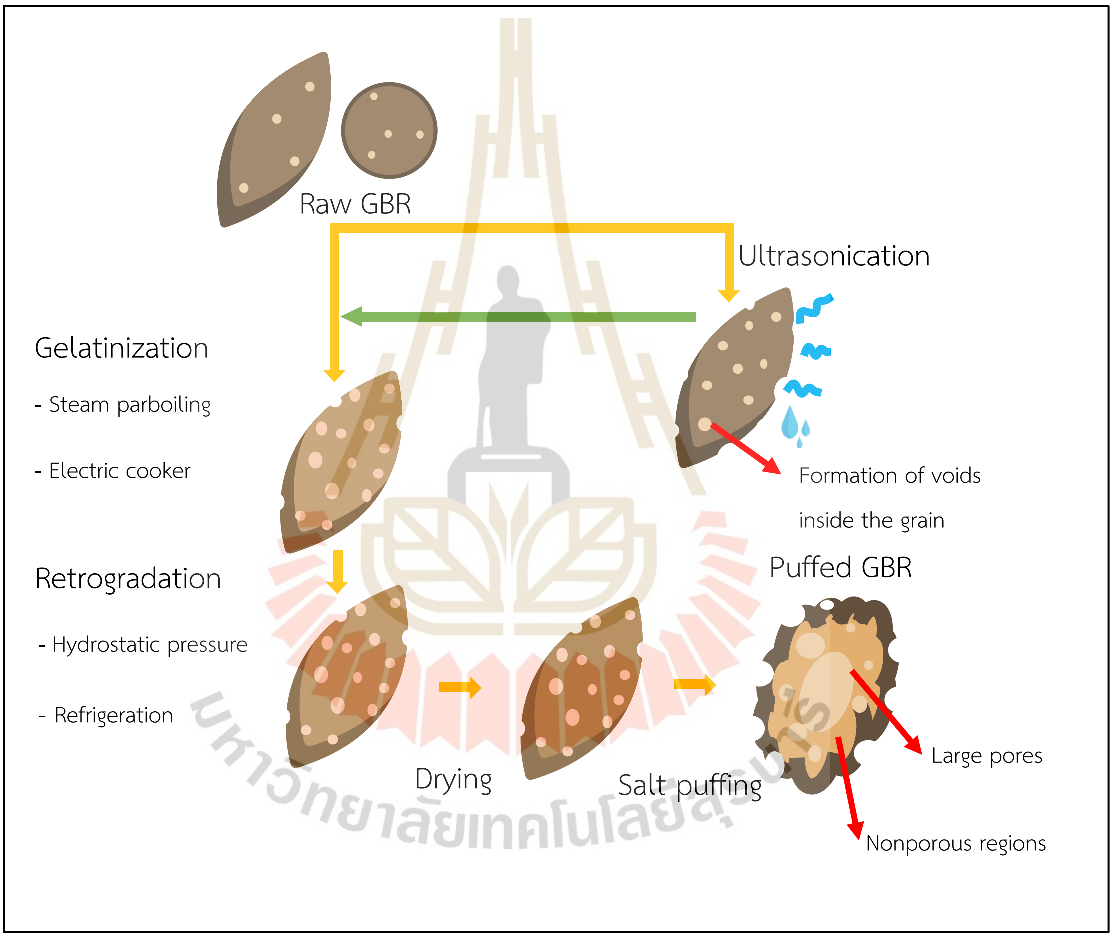
วิธีการทำพองเมล็ดข้าวนั้นนิยมใช้การทอดข้าวในน้ำมันพืชด้วยความร้อนสูง (200 – 280°C) อย่างไรก็ตามความร้อนสูงนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพของน้ำมัน น้ำมันที่ผ่านการทอดซ้ำหลายครั้งมีคุณภาพต่ำลง การบริโภคผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการใช้น้ำมันทอดเหล่านี้อาจส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ เช่น ก่อให้เกิดโรคหลอดเลือดหัวใจและสมองตีบ โรคความดันโลหิต โรคหัวใจวาย โรคอัมพาต และเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง เป็นต้น (วิชญา, 2553) การใช้น้ำมันทอดยังส่งผลต่ออายุการเก็บรักษาข้าวพองอันเนื่องมาจากการเกิดการเหม็นหืนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (Lipid oxidation หรือ Oxidative rancidity) และปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของลิพิด

(Lipolysis หรือ Hydrolytic rancidity) (Belitz et al., 2009; Sebranek & Neel, 2008) นอกจากนี้ ผู้ผลิตอาจมีการสูดดมควันจากน้ำมันระหว่างทอดเข้าไป ทำให้เกิดการสะสมก่อให้เกิดโรคมะเร็งปอดได้ (วิชญา, 2553) จากรายงานของ Saha & Roy (2020) เรื่องวิธีการทำข้าวพองด้วยคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งใช้หลักการการสั่นสะเทือนของอนุภาคน้ำในเมล็ดข้าว ทำให้เกิดความร้อนและเกิดไอน้ำภายในเมล็ดข้าว ส่งผลให้ข้าวเกิดการพองตัวเนื่องจากแรงดันไอน้ำ โดยใช้กำลังไฟ 1,000 W เป็นเวลา 35 s มีข้อดีคือเกิดการไหม้น้อย และไม่มีการปนเปื้อน แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ราคาในการออกแบบและการสร้างเครื่องมือสูง วิธีการทำข้าวพองด้วย Hot sand bed จะใช้ทรายเป็นตัวกลางในการกักเก็บความร้อนและนำความร้อนซึ่งมีแนวคิดแบบการใช้น้ำมันในการทอด อุณหภูมิที่ใช้ในการพองตัวคือ 200 – 250°C (Saha & Roy, 2020) มีข้อดีวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูกและสามารถหาได้ง่าย แต่อาจมีการปนเปื้อนของทรายที่ติดมากับข้าวพองได้ จากงานวิจัยของ Kora (2019) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำข้าวพองโดยใช้ทรายเป็นตัวกลาง เมล็ดข้าวควรมีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 14 – 20% และใช้ความร้อนผ่านตัวกลางทรายอุณหภูมิ 250 – 285°C เป็นเวลา 10 – 25 s โดยการให้ความร้อนสูงเวลาสั้น (High Temperature and Short Time, HTST) จะทำให้เมล็ดข้าวเกิดการระเหยของน้ำภายในอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความดันเนื่องจากไอน้ำภายในเมล็ดข้าว ส่งผลให้ดันเมล็ดข้าวให้พองออกอย่างรวดเร็ว ซึ่งหากมีการปรับปรุงคุณภาพข้าวก่อนการทำพองก็จะทำให้เมล็ดพองตัวได้เกือบ 8 เท่า และเกิดรูพรุนค่อนข้างสูงและมีผิวสัมผัสที่กรอบและแห้ง จากงานวิจัยของ Tamme et al. (2012) รายงานว่า เกลือมีค่าความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.86 kJ/kg.K ซึ่งน้อยกว่าน้ำมันที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะ 2.09 kJ/kg.K ทำให้เกลือมีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิได้เร็วกว่าน้ำมัน และเกลือก็มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 6.5 W/m.K ซึ่งมากกว่าน้ำมันที่มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.122 W/m.K ทำให้เกลือสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่เมล็ดข้าวได้เร็วกว่าน้ำมัน ดังนั้นการทำพองโดยใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจเพื่อให้ได้ข้าวพองที่มีคุณภาพมากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางในการศึกษาและพัฒนาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองเพื่อเพิ่มอัตราการพองและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง และ (2) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติก และระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง ดังแสดงกรอบแนวความคิดใน รูปที่ 1.1 รวมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง นอกจากนี้งานวิจัยมีต้องการลดการใช้น้ำมันพืชสำหรับทำให้ข้าวกล้องงอกพอง และใช้เกลือเป็น Heating medium แทนน้ำมัน เนื่องจากเกลือมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) น้อยกว่าน้ำมัน และเกลือมีค่าการนำความร้อน (Thermal

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

conductivity) สูงกว่าน้ำมัน ซึ่งช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการทำพองได้สูงกว่าน้ำมัน ช่วยลดเวลาในการทำพอง รวมทั้งช่วยลดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเหม็นหืนได้ทำให้อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นานขึ้น งานวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ (Functional food) ซึ่งเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคข้าว รวมทั้งเทคโนโลยีที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารที่ส่งเสริมให้สุขภาพของผู้บริโภคดีขึ้น และเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรได้อีกด้วย



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการผลิตข้าวกล้องงอกพอง

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าว (Rice)

2.1.1 ต้นกำเนิดและพฤกษศาสตร์ของข้าว (Origin and botany of rice)

การเพาะปลูกข้าวเกิดขึ้นได้ในสภาพอากาศที่หลากหลาย มีองค์ประกอบสำคัญคือ สภาพของดิน ปริมาณน้ำ โดยปลูกได้ทั้ง เขตร้อน กึ่งแห้งแล้ง และเขตอบอุ่น ลักษณะดินที่หลากหลาย ทั้งดินโคลน ดินทราย ดินร่วน โดยมากแหล่งเพาะปลูกข้าวจะตั้งอยู่ใน ตะวันออกเฉียงเหนือของจีน นิวเซาท์เวลส์ของออสเตรเลีย เป็นต้น โดยการเพาะปลูกข้าวจะปลูกที่ตั้งแต่ภายใต้ระดับน้ำทะเล จนถึงสูงกว่าระดับน้ำทะเลกว่า 2500 m อย่างเทือกเขาหิมาลัย และสามารถปลูกในภูมิประเทศทั้งที่เป็น ที่ราบสูงที่มีลักษณะดินที่ขาดน้ำ และพื้นที่ราบลุ่มที่มีน้ำในดินพอเหมาะ และที่ราบต่ำที่มีน้ำส่วนเกิน (Kent & Evers, 1994) ในทางตอนใต้และทางตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย พืชผลจะถูกเก็บเกี่ยว 2 – 3 ครั้งใน 1 ปี โดยอาจมีการเพาะปลูกได้ในฤดูแล้งโดยอาศัยน้ำจากการชลประทาน (Laborte et al., 2012) และข้าวจะถูกเก็บเกี่ยวเป็นข้าวเปลือกที่มีส่วนประกอบของข้าวอยู่ประมาณ 20% รำข้าวกับจมูกข้าวอยู่ 8 – 12% และ เมล็ดข้าว 70 – 72% (Gujral et al., 2012) ข้าวเปลือกหลังจากถูกกะเทาะเปลือกจะได้ข้าวกล้อง และนำไปขัดสีให้รำข้าวและจมูกออกเหลือเพียงข้าวขาว ในการผลิตข้าวในสภาวะทางภูมิศาสตร์ที่แตกต่างส่งผลอย่างนัยสำคัญในเรื่องกายภาพและสมบัติของข้าว องค์ประกอบในข้าวและคุณภาพการหุงข้าว และความหลากหลายของชนิดพันธ์ข้าวก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแตกต่างของคุณภาพของข้าว (Singh et al., 2005; Kesarwani et al., 2013) โดยชนิดข้าวอาจแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ Japonica และ Indica โดยมีความแตกต่างของรูปร่างและลักษณะ คือ เมล็ดของข้าว Japonica จะมีลักษณะเมล็ดกลม และไม่แตกง่าย ลักษณะตอนหุงสุกจะเหนียว ชื้น ส่วนมากมีการปลูกในประเทศญี่ปุ่น ส่วนเมล็ดข้าว Indica มีลักษณะเมล็ดยาว และค่อนข้างแตกได้ง่าย เมื่อนำไปหุงสุกข้าวจะมีลักษณะขึ้นฟูและร่วนไม่ติดกันเป็นก้อน โดยส่วนใหญ่จะปลูกในเอเชียใต้ เช่น อินเดีย ตอนใต้ของจีน ไทย และเวียดนาม ทั้งข้าวสายพันธุ์ชนิด Japonica และ Indica จะประกอบไปด้วยแบบที่เป็นข้าวเหนียวและไม่เป็นข้าวเหนียวหรือข้าวเจ้า โดยข้าวเจ้าจะได้รับความนิยมนำมาประกอบอาหาร เนื่องจากมีลักษณะเมล็ดใส และเมื่อหุงสุกจะมีความเหนียวน้อยกว่าข้าวเหนียว ส่วนข้าวเหนียวจะมีลักษณะค่อนข้างขาวขุ่นและเหนียวมากเมื่อหุงสุก มักถูกมามาใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับการทำเค้กและของหวานต่าง ๆ หรือนำมาทำจำพวกขนมขบเคี้ยว (Kent & Evers, 1994)

2.1.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าวเปลือก (Structure of paddy grain)

เป็นเรื่องสำคัญที่ต้องเข้าใจถึงลักษณะทางกายภาพของเมล็ดข้าวเพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสีข้าวเพื่อที่จะได้ข้าวกล้องหรือข้าวขาว โดยเมล็ดข้าวจะถูกห่อหุ้มด้วยส่วนที่เป็นเปลือกแข็งและรับประทานไม่ได้ ซึ่งเปลือกมีหน้าที่ในการปกป้องเมล็ดข้าวจากการรบกวนของพวกแมลงและเชื้อราที่ทำเมล็ดเกิดความเสียหาย โดยเปลือกจะประกอบด้วยใบข้าว 2 ใบคือ Palea และ Lemma ส่วนที่รับประทานได้หลัก ๆ คือ เนื้อข้าว (Endosperm) ชั้นที่ห่อหุ้มเนื้อข้าวชั้นแรกเรียกว่า Pericarp ซึ่งจะประกอบไปด้วย Epicarp, Cross cells และ Cuticle โดยชั้นถัดจาก Pericarp คือ Testa หรือเรียกว่า Seed coat ตามด้วยชั้น Nucellus และ Aleurone โดยในชั้น Aleurone จะติดอย่างแน่นกับส่วน Endosperm และในชั้นนี้ยังห่อหุ้มส่วนที่เป็นจมูกข้าวติดกับส่วนที่เป็น Endosperm ดังรูปที่ 2.1

2.1.3 กระบวนการสีข้าวกล้องเปลือก (Processing of paddy for brown rice)

ในกระบวนการมีการดำเนิดการหลัก ๆ 2 กระบวนการ คือ การกะเทาะเปลือก (Shelling or dehulling) และการขัดสีข้าว (Milling or polishing) ในกรณีที่ข้าวผ่านการให้ความร้อนและการอบแห้ง ก่อนการกะเทาะเปลือก โดยกระบวนการและรายละเอียการดำเนินการจะเป็นไปตามรูปที่ 2.2

การทำความสะอาดข้าว (Cleaning) โดยวิธีที่ใช้จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพ เช่น น้ำหนัก ขนาด ความหนาแน่น และความบริสุทธิ์ของเมล็ดข้าวเปลือก โดยสิ่งแปลกปลอมจะถูกแยกโดยใช้ลม

การลวกข้าวเปลือก (Parboiling) การลวกด้วยความร้อน ประกอบด้วย Soaking, Steeping และ Steaming โดยมากจะใช้กับข้าวขาวหรือข้าวกล้อง ในการแช่ของข้าวเปลือกในน้ำที่อุณหภูมิปกติ หรือน้ำร้อนเป็นระยะเวลาหนึ่งเป็นผลทำให้เกิดการดูดซึมของโมเลกุล (Capillary absorption and hydration) จากนั้นนำข้าวที่แช่ไปลวกด้วยไอน้ำร้อน ในระหว่างนั้นจะทำให้เอนไซม์หยุดการทำงาน และทำให้ตัวเนื้อข้าวมีลักษณะแน่น โปร่งแสง และสีซีดเนื่องจากมีการเกิด Gelatinization และทำให้รอยแตกของข้าวติดกันสนิท

การอบแห้ง (Drying) เป็นการให้ความร้อนกับข้าวเปลือกที่ต้องการให้เหลือความชื้นอยู่ระหว่าง 14 – 16% เพื่อให้ข้าวเปลือกมีความเหมาะสมในการสีข้าวและการเก็บรักษา โดยวิธีดั้งเดิมการอบแห้งจะถูกทำในระบบเปิดหรือการตากโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง และในกระบวนการนี้จะใช้เวลาถึง 5 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม แต่ในปัจจุบันการอบแห้งจะใช้ ลมร้อน (Hot air) เพื่อลดเวลาในการอบและเพิ่มความสะอาดของข้าวเปลือก

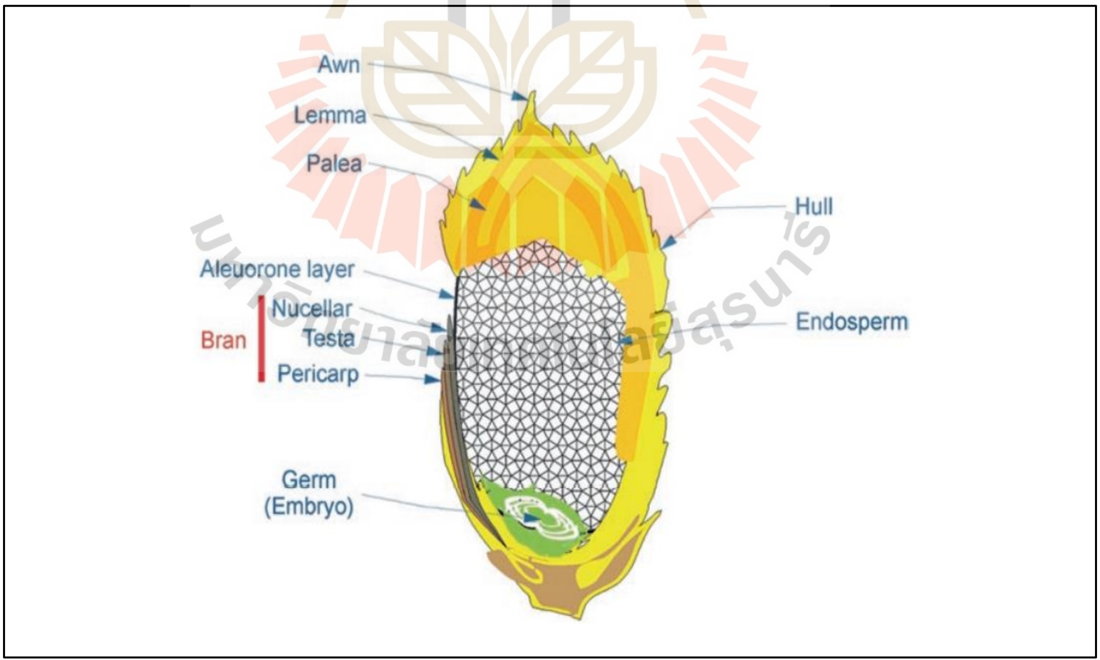
การกะเทาะเปลือก (Dehusking) เป็นกระบวนการในการแยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าว โดยการแยกแกลบออกสามารถใช้อุปกรณ์จักรกล ซึ่งมีหลายเครื่องจักรถูกสร้างเพื่อจุดประสงค์ในการทำงานที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถกะเทาะเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การแยก (Separation) หลังจากได้ข้าวที่กะเทาะเปลือกแล้วจะได้ข้าวกล้องและเปลือกรวมถึงเมล็ดที่ยังไม่กะเทาะ แล้วผ่านไปที่ตะแกรงและแรงลมเพื่อแยกข้าวกล้องที่ต้องการออกจากสิ่งแปลกปลอม

การขัดสี (Milling or polishing) การแยกรำข้าวออกจากเมล็ดข้าวเรียกว่า การขัดสี โดยการขัดสีแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ การขัดและการขัดให้เงา

การคัดแยก (Grading) หลังจากผ่านกระบวนการขัดสี จะได้ข้าวยังคงมีจมูกข้าวอยู่ (ข้าวไม่แตก) และข้าวที่แตกขนาดต่าง ๆ ซึ่งจะถูกแยกออกจากกันโดยเครื่องร่อนตะแกรง

การบรรจุและการเก็บรักษา (Bagging and storage) กำหนดปริมาณของข้าว (โดยน้ำหนัก) และทำการบรรจุอัตโนมัติตามน้ำหนักลงในถุงและทำการปิดผนึกถุงข้าว ขณะที่ไหลไปบนสายพาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

(Nambi, Manickavasagan, & Shahir, 2017)

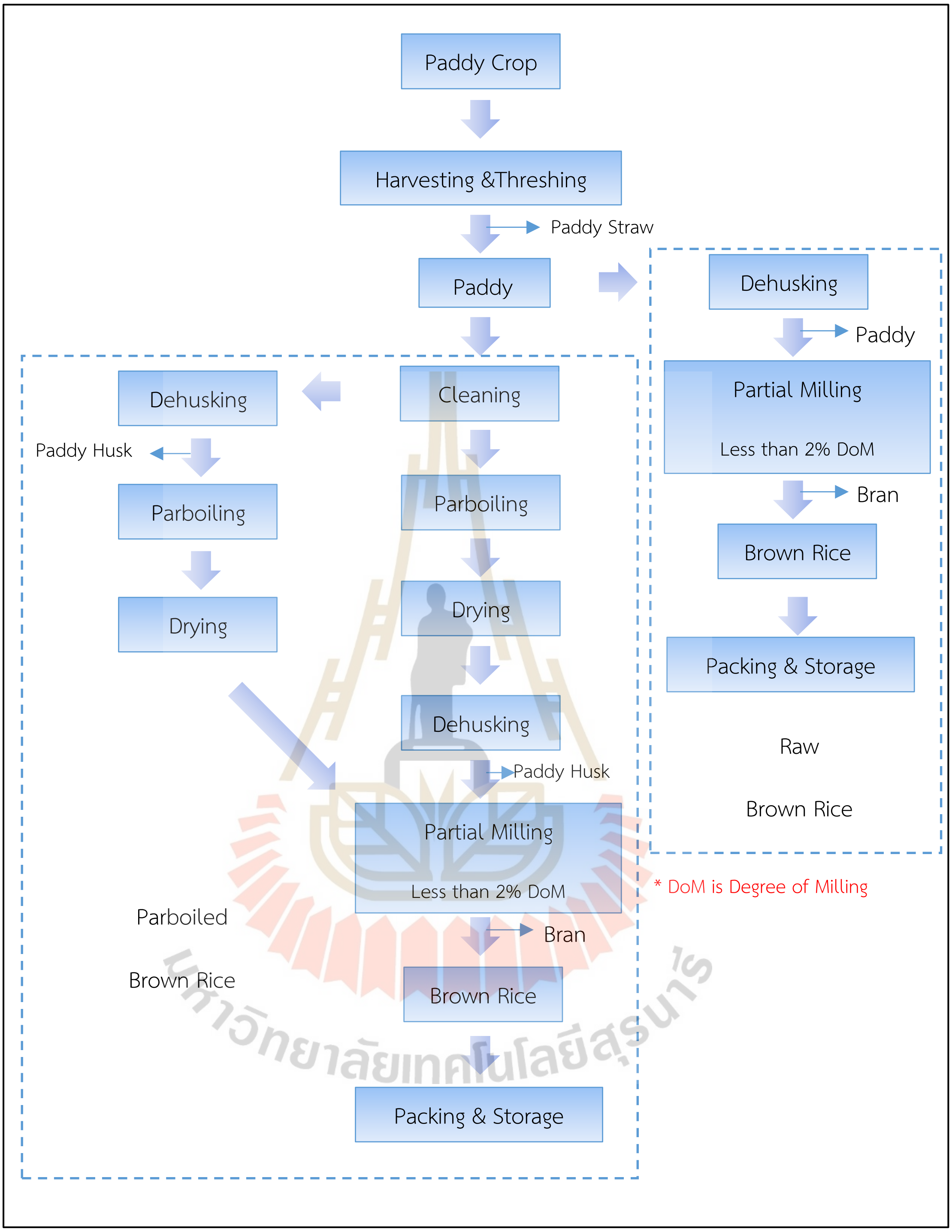
2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความหลากหลายของพันธุ์ข้าว (Factors affecting variety difference)

ข้าวหลายสายพันธุ์ที่มีการเพาะปลูกมาอย่างยาวนานและมีการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม โดยภูมิอากาศแบบร้อนชื้นจะเหมาะแก่การเพาะปลูกได้หลายช่วงเวลา และในอาเซียนพันธุ์ข้าวโดยมากจะใช้เวลาปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยวประมาณ 180 วัน ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมามีการขยายพื้นที่การปลูกข้าวเพิ่มมากขึ้นทำให้มีการเพิ่มการชลประทาน การใช้ปุ๋ย การใช้สัตว์เพื่อการเกษตร การใช้เทคโนโลยีนวัตกรรม และการปรับปรุงสายพันธุ์ข้าว

สภาพภูมิอากาศ (Climatic conditions) สิ่งแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวในการเจริญเติบโต โดยในการผลิตข้าวควรมีการควบคุมเรื่องสภาพอากาศ ปริมาณน้ำที่เพียงพอในการเจริญเติบโตในแต่ละฤดู รวมถึงการถ่ายเทอากาศ อุณหภูมิของดิน การได้รับแสงอาทิตย์ ปริมาณน้ำฝนช่วงเก็บเกี่ยวที่น้อย และการที่มีข้าวสายพันธ์ใหม่เกิดขึ้นจะมีการกระจายเพื่อไปปลูกในที่ต่าง ๆ ดังนั้นจึงควรทดสอบว่าข้าวเหมาะก่อนที่จะนำไปปลูกที่สภาวะนั้น (Abrol & Gadgil, 1999)

ชนิดของดินปลูก (Soil types) ข้าวสามารถปลูกได้ในสภาพดินต่าง ๆ แต่การขาดแคลนระบบชลประทานเป็นปัจจัยจำกัดที่จะต้องเลือกชนิดดินที่เหมาะสมซึ่งดินควรมีค่า pH 4.0 – 8.0 ซึ่งเหมาะในการเจริญเติบโตของพืช แต่ต้นข้าวก็สามารถทนในสภาวะดินที่เป็นด่างได้เช่นกัน โดยดินที่มีลักษณะดูดซึมน้ำน้อยและมีน้ำขังจะเป็นพื้นที่ที่เหมาะแก่การเพาะปลูกข้าวและพื้นดินที่มีลักษณะลึกกว่าพื้นที่รอบข้างจะให้ผลผลิตข้าวได้มากกว่าพื้นที่ที่ตื้นหรือในระดับเดียวกัน ชนิดดินที่เหมาะแก่การปลูกข้าวคือ ดินเหนียวปานกลางถึงมาก ดินเหนียวปนดินร่วนหรือดินทราย

ปุ๋ย (Fertilizers) ปุ๋ยถูกนำมาใช้กับข้าวเพื่อเป็นสารอาหารจำเป็นที่ข้าวสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดี โดยชนิดของปุ๋ยจะมีผลต่อคุณภาพของข้าวอย่างมีนัยสำคัญ และสัดส่วนการผสมของปุ๋ยมีผลต่อคุณภาพของข้าวด้วยแต่หากใช้สัดส่วนที่ไม่เหมาะสมจะส่งต่อสมบัติของข้าวที่ไม่พึงประสงค์ซึ่งส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคและอุตสาหกรรม (Nanda & Agrawal, 2006)



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเตรียมข้าวกล้อง

(Nambi, Manickavasagan, & Shahir, 2017)

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความแตกต่างของคุณภาพข้าวกล้อง (Factors affecting brown rice quality difference)

การผลิตข้าวทั่วโลกมีความแตกต่างในเรื่องสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี สมบัติของข้าวตอนหุงสุก โดยความแตกต่างเหล่านี้เป็นผลมาจากชนิดสายพันธุ์ข้าว สภาพภูมิอากาศ และเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สามารถเพาะพันธุ์และปรับแต่งและปรับปรุงสายพันธุ์ให้มีลักษณะตามที่ต้องการ

2.1.6 สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้อง (Physical properties of brown rice)

ข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่มีวางขายอยู่ในท้องตลาดจะเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรม และผู้บริโภคได้ต้องคำนึงถึง ขนาดเมล็ด รูปร่างเมล็ด เช่น มีเมล็ดยาว กลาง หรือสั้น และลักษณะเมล็ดข้าวซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาไปจนถึงการผสมพันธุ์ข้าว การคัดแยกข้าวเป็นวิธีที่สามารถช่วยลดปัญหาความผิดปกติของของข้าวได้ เช่น ปัญหาเรื่องริ้วบนข้าวซึ่งมีโอกาสถูกกำจัดออกในขั้นตอนการขัดสี รูปร่างที่ผิดปกติของเมล็ดข้าว เมล็ดที่เรียวแหลมซึ่งจะมีโอกาสแตกได้ง่ายขณะขัดสีข้าว เมล็ดที่มีจมูกข้าวใหญ่เกินไปที่อาจจะไปลดประสิทธิภาพเครื่องขัดสี

ความแตกต่างของข้าวทางกายภาพและทางกลเป็นอิทธิพลมาจากความหลากหลายของพันธุ์ข้าวและปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม (Izawa, 2008; Mir et al., 2013) โดยสมบัติทางกายภาพและทางกลเป็นสิ่งที่สำคัญในการมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกใช้ในกระบวนการการผลิตข้าว ซึ่งส่งผลโดยตรงกับระดับคุณภาพของข้าวในอุตสาหกรรมและเป็นตัวกำหนดถึงความพึงพอใจของผู้บริโภคด้วย มีหลายงานวิจัยที่มีการรายงานเกี่ยวกับลักษณะทางกลและทางกายภาพซึ่งเป็นผลมาจาก การขัดสีข้าว การทำสุก และความพึงพอใจของผู้บริโภค (Mohapatra & Bal, 2006; Correa et al., 2007; Varnamkhasti et al., 2008) และความแตกต่างของสมบัติทางกายภาพจะมีผลอย่างยิ่งต่อ กระบวนการผลิต การดูแลและเก็บรักษา โดยความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวจะช่วยในเรื่องการออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการการผลิต เช่น การแยกข้าว การอบแห้ง การขัดสี และการหาแนวทางการแก้ไขของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ (Sahay & Singh, 1994; Mir et al., 2013) ซึ่งสมบัติเหล่านี้ก็มีความสำคัญต่อการสร้าง การเก็บรักษา และคำนวณขนาดของเครื่องในเรื่องปริมาตร (Thompson & Ross, 1983) เช่น การพิจารณาแนวแกนเอ็กซ์ของเมล็ดข้าวเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการเลือกใช้เครื่องตะแกรงร่อน และคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสีข้าว และก็ยังสามารถนำมาคำนวณพื้นที่ผิวและปริมาตรของเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งมีผลสำคัญในเรื่องการออกแบบเครื่องอบและกระบวนการให้ความร้อนและการทำเย็น (Shittu et al., 2012)

สีของข้าวกล้อง (Color properties of brown rice) ข้าวกล้องนั้นมีสีที่แตกต่างกันดังใน ตารางที่ 2.1 โดยข้าวบางเมล็ดจะมีสีที่เข้มอย่างชัดเจนจนเกือบดำ (ส่วนที่เป็นรำข้าวหุ้มเมล็ด) โดยข้าวที่มีสีน้ำตาลส่วนมากจะพบว่าปลูกอยู่บนพื้นที่สูง เนินเขาหรือบนภูเขาอย่างเช่น ทางตะวันออกเฉียงเหนือของอินเดีย โดยทั่วไปเชื่อว่าส่วนของรำข้าวมีสมบัติทางยาทำให้ผู้คนส่วนมากตระหนักว่าข้าวที่ยังไม่ผ่านกระบวนการขัดสีมีประโยชน์กว่าข้าวที่ขัดสีแล้ว เช่น ปริมาณเส้นใยอาหารและสารออกฤทธิ์ดีต่อสุขภาพ โดยสีเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญสำหรับการตัดสินใจเลือกใช้ของอุตสาหกรรมและผู้บริโภค และสีของข้าวยังเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงประโยชน์ของมัน (Sompong et al., 2011) โดยข้าวที่มีสีจะมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) มากกว่าข้าวที่ไม่มีสี ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าส่วนที่เป็นสีของข้าวเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Moko et al., 2014) ซึ่งในการวิเคราะห์เรื่องสีของข้าวแสดงค่า L*, a* และ b* ความแตกต่างของสีเมล็ดข้าวอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์ องค์ประกอบ และรงควัตถุในข้าว

ตารางที่ 2.1 ค่าสีของข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ

Variety	L*	a*	b*	Reference
Chindeul	56.89	5.69	25.24	Lee et al. (2016)
Jehlum	66.98	4.19	23.42	Mir et al. (2016)
SKAU-345	63.95	4.69	23.59	
SKAU-382	62.42	5.04	22.28	
Khao Dawk Mali 105	59.00	3.1	18.00	Sirisoontaralak et al. (2015)
SR-1	58.10	7.73	23.95	Mir et al. (2013)
Pusa-3	55.99	7.44	25.33	
Koshar	63.02	6.25	26.29	
ITA 150	81.31	1.81	21.80	Shittu et al. (2012)
ITA 301	82.90	2.29	21.21	
WAB 189	72.35	2.58	19.79	
WAB 450	80.34	2.09	20.53	

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.1.7 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง (Chemical compositions of brown rice)

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องมีความแตกต่างเนื่องจากความแตกต่างของดินและสิ่งแวดล้อมบริเวณที่ปลูก โดยข้าวกล้องนั้นประกอบไปด้วยชั้นของรำ 6 – 7% จมูกข้าว 2 – 3% และเนื้อข้าวประมาณ 90% (Chen et al., 1998) และมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักของข้าวกล้อง และส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ชอย่าง โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใยอาหาร ลิกนิน ซึ่งพบในข้าวกล้องมากกว่าข้าวขัดสี และข้าวกล้องนั้นยังอุดมไปด้วยวิตามิน แร่ธาตุ และกรดอะมิโนสำคัญ (Liu et al., 2009; Mir et al., 2016) โดยในระหว่างการขัดสีขาวกล้องเป็นข้าวขาวจะเกิดการสูญเสียของโปรตีน 28.6% และแร่ธาตุ 84.7% (Lamberts et al., 2007) เพราะชั้นของรำข้าวอุดมไปด้วย วิตามิน แร่ธาตุ และเส้นใยอาหาร โดยเฉพาะข้าวแดงเป็นที่รู้กันดีว่าอุดมไปด้วยธาตุเหล็กและสังกะสี ในขณะที่ข้าวดำหรือม่วงจะอุดมไปด้วย โปรตีนสูง ไขมัน และเส้นใยหยาบ โดยข้าวเหล่านี้ได้สีมาจากแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ และโปรตีนก็เป็นอีกสารที่มีมากที่สุดรองจากสตาร์ชซึ่งโปรตีนมีปริมาณในช่วง 6.5% – 8.7% แต่ก็สามารถแตกต่างจากนี้ได้เนื่องจากปัจจัยอื่น (Cao et al., 2004; Mir et al., 2016) ในด้านความต่างของปริมาณโปรตีนอาจเป็นผลมาจาก ชนิดพันธุ์ข้าว การขัดสีข้าวที่มีผลต่อการสูญเสียส่วนที่เป็นชั้นรำของเมล็ด (Zhou et al., 2002) ซึ่งโปรตีนจะมีอยู่มากในชั้น Subaleurone ซึ่งอยู่ในรำข้าวของเมล็ด และก็มีส่วนน้อยอยู่ในเซลล์ Aleurone (Azhakanandam et al., 2000) และโปรตีนจากข้าวนั้นมีคุณประโยชน์มากเพราะว่ามีปริมาณความสมดุลของกรดอะมิโนและมีไลซีนสูงกว่าในธัญพืชชนิดอื่น ๆ (Mohan et al., 2010) รวมถึงลิพิดที่จะพบได้มากในชั้นของรำข้าวที่อาจถึง 20% โดยมวล โดยเฉพาะใน Lipid bodies หรือ Spherosomes โดยปริมาณของลิพิดในข้าวกล้องมีอยู่ประมาณ 0.5% – 3.5% (Dendy, 2005) ซึ่งในงานวิจัยของ Charoenthaikij et al. (2012) รายงานว่าปริมาณของลิพิดของแป้งข้าวกล้องมีอยู่ระหว่าง 2.65% – 3.24% ส่วน Mir et al. (2016) รายงานว่ามีอยู่ระหว่าง 2.38 – 2.84% และในข้าวกล้องงอกพบว่า 51% ของน้ำมันถูกพบในจมูกข้าว 32% ในรำข้าว และ 17% ในเนื้อข้าว โดยข้าวกล้องประกอบไปด้วยวิตามินสูงซึ่งจำเป็นต่อร่างกายของมนุษย์ซึ่งวิตามินที่จะพบในข้าวกล้องมีมากกว่าข้าวขัดสี และข้าวกล้องนั้นเป็นแหล่งอุดมของวิตามิน B1, B2, B3 และ วิตามินอื่น ๆ ซึ่งงานวิจัยของ Deepa et al. (2008) ทดสอบเรื่องระดับวิตามินที่พบในข้าวกล้อง 3 สายพันธุ์ คือ Njavara, Jyothi และ IR 64 โดยรายงานว่าปริมาณของวิตามิน B1 อยู่ช่วงระหว่าง 0.04 – 0.05 mg/ 100g วิตามิน B2 ระหว่าง 0.053 – 0.071 mg/100 g วิตามิน B3 ระหว่าง 4.68 – 7.32 mg/100 g และกรดโฟลิกระหว่าง 0.04 – 0.05 mg/100 g อย่างไรก็ตามข้าวสายพันธุ์ Njavara มีปริมาณของวิตามิน B1 สูงถึงระหว่าง 27 – 32%, วิตามิน B2 ระหว่าง 4 – 25% และวิตามิน B3 ระหว่าง 2 – 36% เมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 สายพันธุ์

2.1.7.1 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักของข้าวและธัญพืช ในส่วนที่เป็นรำของข้าวจะมีปริมาณเส้นใยเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) มากที่สุดประมาณ 1.4 – 2.1% และมี Pentosans 43% กระจายอยู่ในชั้นรำข้าวและ 8% ในจมูกข้าว (Juliano et al., 1964) ซึ่งเฮมิเซลลูโลสที่ละลายน้ำมีอัตราส่วนของ Arabinose/xylose เท่ากับ 1.8 และในชั้นของรำข้าวประกอบไปด้วยกาแลคโตสและโปรตีน ส่วนเฮมิเซลลูโลสที่ละลายได้ในอัลคาไลประกอบด้วยอะราบิโนส 37% ไซโลส 34% และกาแลคโตส 11% และในข้าวกล้องยังประกอบไปด้วยปริมาณเซลลูโลสที่สูงประมาณ 62% ในรำข้าว และมีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบหลักในข้าวซึ่งมีอะมิโลเพคติน 25 – 50% และอะมิโลส 30 – 60% โดยน้ำหนัก โดยในข้าวกล้องมีส่วนที่ไม่ใช่น้ำตาลทั้งหมดมีอยู่ประมาณ 0.8 – 1.4% ซึ่ง 0.1 – 0.13% เป็นน้ำตาลรีดิวซ์และส่วนใหญ่เป็นกลูโคส และฟรุกโตสในปริมาณเล็กน้อย และข้าวกล้องยังประกอบไปด้วยไฟตินประมาณ 0.2% ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของชั้นรำ และกรดไรโบนิวคลีอิกที่เป็นกรดนิวคลีอิกหลักในข้าวกล้องมีประมาณ 2 – 3% และข้าวขาวประมาณ 0.2 – 0.3% และมีกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิกประมาณ 0.01% ของข้าวกล้อง (Juliano et al., 1964)

2.1.7.2 โปรตีน (Protein)

ข้าวกล้องประกอบด้วยโปรตีน 8 – 15% (น้ำหนักแห้ง) ซึ่ง 14% จะกระจายตัวอยู่ในรำข้าว ซึ่งรำข้าวและจมูกข้าวในข้าวกล้องมีปริมาณไลซีนสูงกว่าและมีกรดกลูตามิกต่ำกว่าส่วนเอนโดสเปิร์มที่เป็นแป้ง (เนื้อข้าว) โดยทั้งข้าวเหนียวและข้าวเจ้ามีรูปแบบการกระจายกรดอะมิโนคล้ายกัน ส่วนข้าวกล้องและข้าวขัดสีส่วนใหญ่มีรูปแบบของกรดอะมิโนแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตามกรดอะมิโนบางชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งไลซีนมีความสัมพันธ์ไปในทางลบ แต่ปริมาณไทโรซีนและฟีนิลอะลานีนมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับปริมาณโปรตีนทั้งหมดของข้าวกล้อง โดยโปรตีนจากข้าวส่วนใหญ่เป็นกลูเตลินซึ่งเป็นโปรตีนที่ละลายในด่าง (78 – 79%) โกลบูลินที่ละลายในเกลือ (10 – 11%) และอัลบูมินที่ละลายน้ำได้ (7 – 8%) และส่วนที่ละลายในแอลกอฮอล์มีค่าน้อยที่สุด (3%) ซึ่งปริมาณอัลบูมินและโกลบูลินในข้าวกล้องมีสูงกว่าข้าวที่ขัดสีโดยจะมีความเข้มข้นมากในจมูกข้าวและชั้นอลูโรน สัดส่วนปริมาณของโปรตีนมีอัลบูมินและโกลบูลินสูงที่บริเวณขอบของเมล็ดแต่จะค่อย ๆ ลดลงไปเมื่อเข้าใกล้ศูนย์กลางของเมล็ดในขณะที่ปริมาณกลูเตลินจะผกผันกัน และการกระจายตัวของอัลบูมินมีอยู่ในรำข้าว 51% ในขณะที่การกระจายโกลบูลินมีอยู่ 40% ในรำข้าวซึ่งโกลบูลินประกอบด้วยกรดกลูตามิกและอาร์จินีน 43% ซีสเตอีน 4 – 9% และ 6.6% เมไทโอนีน และการกระจายตัวของโปรลามินมีอยู่ประมาณ 21% ในรำข้าว ในขณะที่การกระจายกลูเตลินมีอยู่ในรำข้าวเพียง 5% ซึ่งกลูเตลินมีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดและมีกรดแอสปาร์ติกและกลูตามิกเป็นกรดอะมิโนหลักที่มีอยู่ในกลูเตลิน โดยสัดส่วนของโปรตีนที่ละลายน้ำได้จะแปรผันตามปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณกลูเตลินและโปรลามินก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน และในข้าวประกอบด้วยโปรตีนประมาณ

60% ไขมัน 10 – 28% และคาร์โบไฮเดรต 12 – 29% พร้อมกับมี เถ้า กรดไรโบนิวคลีอิก ฟอสโฟลิปิด กรดไฟติก และไนอาซินเล็กน้อย (Tanaka et al., 1980) และในข้าวกล้องมีโปรตีนที่ประกอบด้วยสัดส่วนของกรดอะมิโน 4 อย่างคือ อัลบูมินมีปริมาณไลซีนสูงสุด ตามด้วยกลูเตลิน โกลบูลิน และโปรลามิน ถ้าปริมาณอัลบูมินสูงขึ้นส่งผลให้ไลซีนสูงขึ้นและปริมาณกรดกลูตามิกต่ำลงซึ่งสะท้อนถึงคุณภาพโปรตีนที่ดีขึ้นในจมูกและรำข้าวในข้าว

2.1.7.3 แร่ธาตุและวิตามิน (Vitamins and minerals)

แร่ธาตุเป็นสารอาหารสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์และการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของร่างกาย โดยส่วนประกอบของแร่ธาตุในข้าวขึ้นอยู่กับสารอาหารของดินที่ใช้ในการเพาะปลูกและการเจริญเติบโต (Heinemann et al., 2005; Wang et al., 2011) จากการทำการวิเคราะห์ข้าวกล้อง ประกอบไปด้วย ทองแดง โพแทสเซียม แมกนีเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส และสังกะสี ซึ่งมีปริมาณมากกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสี ซึ่งความหลากหลายของแร่ธาตุในข้าวกล้องและปริมาณแร่ธาตุเป็นผลมาจากพันธุ์ข้าว และสิ่งแวดล้อม (Huang et al., 2016) ในงานวิจัยของ Antoine et al. (2012) วิเคราะห์ข้าว 25 สายพันธุ์ เพื่อตรวจหา 36 แร่ธาตุจำเป็นและไม่จำเป็นโดยใช้เทคนิคที่แตกต่างกันและรายงานเป็นค่าเฉลี่ยข้าวขาวและข้าวกล้องตามลำดับดังนี้ แคลเซียมมีค่า 127 mg/kg และ 104 mg/kg, ทองแดงมีค่า 1.65 mg/kg และ 2.96 mg/kg, เหล็กมีค่า 22.3 mg/kg และ 20.1 mg/kg, แมกนีเซียมมีค่า 371 mg/kg และ 1205 mg/kg, แมงกานีสมีค่า 10.5 mg/kg และ 26.5 mg/kg, โมลิบดินัมมีค่า 0.790 mg/ kg และ 0.770 mg/kg, ฟอสฟอรัสมีค่า 1203 mg/kg และ 3361 mg/kg, โพแทสเซียมมีค่า 913 mg/kg และ 2157 mg/kg, ซิลิเนียมมีค่า 0.108 mg/kg และ 0.131 mg/kg, โซเดียมมีค่า 6.00 mg/kg และ 15.1 mg/kg, ซัลเฟอร์มีค่า 1131 mg/kg และ 1291 mg/kg และสังกะสีมีค่า 15.6 mg/kg และ 20.2 mg/kg ซึ่งข้าวกล้องนั้นอุดมไปด้วยแร่ธาตุมากมายและมีราคาถูกอีกทั้งการรับประทานยังช่วยการลดโอกาสเกิดภาวะทุพโภชนาการและปัญหาสุขภาพอื่น ๆ (Mir et al., 2016)

2.1.7.4 สารต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้อง (Antioxidant properties of brown rice)

มีการศึกษาเกี่ยวกับระบาดวิทยาได้ระบุว่าการบริโภคข้าวกล้องปริมาณสูงจะมีความสัมพันธ์ในการลดความเสี่ยงการเกิดโรคเรื้อรัง (Anderson, 2013) และการทดสอบทางระบาดวิทยารายงานว่า มีการเป็นโรคเรื้อรังที่ต่ำในพื้นที่ที่มีการบริโภคข้าวกล้องซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากสารต้านอนุมูลอิสระในข้าว โดยข้าวถูกจัดให้เป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระทางธรรมชาติที่มีความเฉพาะตัว (Chotimarkorn et al., 2008) ซึ่งมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารประกอบของฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ แอนโทไซยานิน โปรแอนโธไซยานิดิน โทโคฟีรอลและโอรีซา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นอล (Slavin, 2003) โดยพฤกษเคมีส่วนมากของเมล็ดข้าวจะมีอยู่ในส่วนของรำข้าวที่ประกอบไปด้วยชั้นของรำข้าวและจมูกข้าว และปัจจุบันข้าวเป็นอาหารหลักของประชากรโลกซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการให้สารต้านอนุมูลอิสระเข้าร่างกายในแต่ละวันและยังประกอบไปด้วยเส้นใยอาหารที่ไปช่วยเพิ่มมวลในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ทำให้อิ่มไว และยังส่งผลทางอ้อมในการรักษาสุขภาพของหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งประโยชน์ส่วนมากจะอยู่ในรำข้าวและจะมูกข้าวดังนั้นเมื่อทำการขัดสีก็จะทำให้สูญสียคุณประโยชน์นี้ไป (Champagne et al., 2004) ในงานวิจัยของ Liu (2004) และ Kim et al. (2012) รายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการต้านอนุมูลอิสระ และมีงานวิจัยที่กล่าวว่าข้าวกล้องมีสารประกอบฟีนอลิกและความสารมารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว (Shen et al., 2009; Zhang et al., 2010) ส่วนสารแอนโทไซยานินส่วนใหญ่ในข้าวกล้องประกอบไปด้วยสาร Cyanidin-3-gluoside และ Peonidin-3-glucoside และสารประกอบเหล่านี้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างเด่นชัด (Hu et al., 2003; Zhu et al., 2010) ดังนั้นข้าวกล้องจึงได้รับความสนใจมากกว่าเนื่องจากประโยชน์ โดยมีงานวิจัยของ Mir et al. (2016) ที่ทำการทดสอบหาปริมาณของสารต้านอนุมูลอิสระในข้าวกล้อง ซึ่งพบสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.81 – 1.64 mgGAE/g ฟลาโวนอยด์มีค่าอยู่ระหว่าง 50.67 – 79.41 μg catechin/g และสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอชมีค่าอยู่ระหว่าง 46.18 – 70.51%

สารประกอบฟีนอลิกในข้าวกล้อง (Phenolic components in brown rice)

อินเดียเป็นประเทศที่มีความหลากหลายของข้าวมาก กรมการวิจัยเกี่ยวกับข้าว (Hyderabad, India) เปิดเผยว่า 28.31% ของสายพันธุ์ข้าวทั้งหมด 12,750 สายพันธุ์ เป็นข้าวที่มีสี เช่น สีแดง 10.48% สีน้ำตาล 9.41% สีม่วง 8.40% (Anonymous, 1998) ในอินเดียมีการปลูกข้าวแดงอย่างแพร่หลายทางตอนใต้ ทิวเขาทางตะวันออกเฉียงเหนือ และตะวันตก ส่วนข้าวสีดำถูกปลูกมากในรัฐมณีปุระทางตะวันออกและทางตอนใต้ของอินเดีย โดยข้าวสายพันธุ์ Njavara เป็นข้าวที่มีสรรพคุณทางยาและการรักษาซึ่งมีลักษณะสีแดงที่รำข้าวและปลูกเฉพาะถิ่นที่ Kerala ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวมาก งานวิจัยของMurthy (2001) ได้รายงานว่ามีการใช้ข้าวสายพันธุ์นี้ในการรักษาตั้งแต่อดีตอย่างที่ปรากฏในเรื่องการใช้เป็นยาอายุรเวทในบันทึกของหนังสือ Ashtanga hrudayam (Vagbhatta, circa 400 – 500 A.D.) ซึ่งความพิเศษของข้าวพันธุ์นี้ยังใช้ในการการรักษาและป้องกัน เช่น การรักษาความเสื่อมของกล้ามเนื้อ รักษาวัณโรค รักษาเด็กที่เป็นโรคโลหิตจาง รักษาแผลพุพอง และโรคผิวหนัง และเหมาะกับผู้หญิงระหว่างให้นมบุตร และข้าวพันธุ์ยังนี้มีสารทางเคมีที่สูง เช่น สารไฟเตท สารต้านอนุมูลอิสระและสารต้านการอักเสบเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์อื่น ๆ (Smitha et al., 2013) ในงานวิจัยของ Deepa et al. (2012) ได้รวบรวมข้อมูลของข้าวพันธุ์ต่าง ๆ โดยข้าวแดงพันธุ์ Jyothi มีปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกมากกว่าข้าวไม่มีสี IR 64 และงานวิจัยของ Reddy et

al. (1995) รายงานว่าข้าวแดงพันธุ์ Testa มีกลุ่มของสารประกอบพอลิเมอร์ ได้แก่ โปรแอนโธไซยานิดิน ส่วนข้าวสีดำที่มีสีม่วงเข้มจะมีฤทธิ์ทางการรักษาสูง โดยอาจกล่าวได้ว่าข้าวกล้องนั้นจะมีปริมาณสารอาหารมากกว่าข้าวทั่วไป เช่น โปรตีน วิตามินและแร่ธาตุ โอรีซานอล โทโคฟีรอล และแอนโธไซยานิน เป็นต้น (Suzuki et al., 2004; Yoshida et al., 2010)

กรดฟีนอลิก (Phenolic acids)

กรดฟีนอลิกเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มี 1 วงเบนซีนและหมู่ไฮรดรอกซีล โดยกรดฟีนอลิกหลายตัวเป็นเป็นอนุพันธ์ของกรดเบนโซอิกหรือกรดซินนามิก ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กรดไฮดรอกซีเบนโซอิกและกรดไฮดรอกซีซินนามิก โดยกรดฟีนอลิกที่พบในข้าว ได้แก่ กรดเฟรูลิก กรดพี-คูมาริก, กรดวานิลลิก, กรดคาเฟอิก, กรดไซริงก์, กรดโปรโตคาเตชุอิก ฯลฯ และในการศึกษาของ Irakli et al. (2016) รายงานว่าสารประกอบของข้าวที่มีสีนั้นมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าเมื่อเทียบกับข้าวที่ไม่มีสี และกรดเฟรูลิกเป็นกรดฟีนอลิกหลักของข้าวทุกชนิดโดยในข้าวสีดำมีกรดโปรโตคาเทจูอิกและวานิลลิกในปริมาณที่สูงกว่าข้าวแดงและข้าวไม่มีสี และกรดฟีนอลิกออกฤทธิ์ต่อร่างกายโดยทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระที่อาจทำให้เกิดความเสียหายเนื่องจากการออกซิเดชันของเยื่อหุ้มเซลล์และดีเอ็นเอ และมีรายงานว่ากรดเฟอรูลิกมีศักยภาพในการลดระดับของสารทำให้อักเสบบางชนิด เช่น พรอสตาแกลนดิน E2 และเนื้องอกเนื้อร้าย (Ou et al., 2003)

โปรแอนโธไซยานิดิน (Proanthocyanidins)

โปรแอนโธไซยานิดินคือแทนนินเข้มข้นซึ่งเป็นโอลิโกเมอร์หรือโพลีเมอร์ของ Flavan-3-ols ซึ่งมีอยู่ในเมล็ดข้าวและเมล็ดพืชตระกูลถั่วบางชนิด โดยโครงสร้างมีส่วนทำให้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่แข็งแกร่งที่สุด โดยทั่วไปแล้วสารโปรแอนโธไซยานิดินมักพบในข้าวแดงแต่ไม่พบในพันธุ์ข้าวสีดำ (Finocchiaro et al., 2007) จากการศึกษาพบการดูดซึมของสารโปรแอนโธไซยานิดินในทางเดินอาหารหลังจากการสลายตัวของโอลิโกเมอร์ (DP 3 - 6) ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดของกระเพาะอาหาร (Spencer et al., 2000) และการสลายตัวของพอลิเมอร์ (DP > 10) โดยจุลินทรีย์ในลำไส้จึงให้ผลดีต่อสุขภาพ และสาร คาเทชิน (Catechins) เป็นหนึ่งในโปรแอนโธไซยานิดินที่โดดเด่นและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีผลต่อการลดภาวะหลอดเลือดตีบและความสามารถในการขับอนุมูลอิสระของออกซิเจน (Sun et al., 1998)

ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids)

ฟลาโวนอยด์มีโครงสร้างทั่วไปจัดเรียงด้วย 15 คาร์บอนซึ่งประกอบด้วย 2 วงแหวนฟีนิลและวงแหวนเฮเทอโรไซคลิก โดยฟลาโวนอยด์ที่พบมากที่สุดคือฟลาโวน ฟลาโวนอลและไกลโคไซด์ (Bravo, 1998) ซึ่งในกลุ่มเหล่านี้ประกอบด้วย ฟลาโวน (ลูโอลิน, อะพิจีนิน) ฟลาโว

โนน (ไมริซิติน, นาริงกิน, เฮสเปอเรติน, นารินเจนิน) ฟลาโวนอล (เควอซิทิน, แคมป์เฟอรอล) Flavan-3-ols (คาเทชิน, อีพิคาเทชิน, แกลโลคาเทชิน) แอนโธไซยานิน (ไซยานิดิน, พีลาร์โกนิดิน, พิทูนิดิน) และไอโซฟลาโวน (เจนิสไตน์, ไดซีน) ในงานวิจัยของ Shen et al. (2009) ได้รายงานว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ในข้าวสีดำมีค่าสูงกว่าข้าวขาวแดง ดังนั้นสีของข้าวอาจเกิดจากการสะสมของแอนโธไซยานิน (Furukawa et al., 2007) และอาจเป็นสาเหตุของปริมาณฟลาโวนอยด์ ซึ่งสารฟลาโวนอยด์มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านมะเร็ง (Dykes & Rooney 2007; Hu et al., 2003) และมีงานวิจัยเกี่ยวกับแอนโธไซยานินตามที่กล่าวไว้ข้างต้นนี้คือฟลาโวนอยด์ชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดสีแวคิวโอลาร์ที่ละลายในน้ำได้ และแอนโธไซยานินนั้นได้รับการยอมรับว่าเป็นส่วนผสมของอาหารที่ส่งเสริมสุขภาพเนื่องจากมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Satue-Gracia et al., 1997) ต้านมะเร็ง (Zhao et al., 2004) มีฤทธิ์ลดน้ำตาลในเลือด (Tsuda et al., 2003) และฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Tsuda et al., 2002)

2.1.8 สมบัติของข้าวกล้องหุงสุก (Cooking properties of brown rice)

ข้าวส่วนมากจะถูกบริโภคหลังจากการทำสุกแล้วอย่างไรก็ตามสมบัติของข้าวก็มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากความหลากหลายของแหล่งเพาะปลูกข้าวซึ่งมีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และความแตกต่างของสมบัติข้าวหุงสุก ซึ่งความต้องการข้าวกล้องหุงสุกมีมากขึ้นเนื่องจากผู้คนมีความใส่ใจเรื่องสุขภาพมากขึ้นและต้องการอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพรวมถึงการรับสารอาหารที่เพียงพอ โดยข้าวเป็นอาหารหลักสำหรับประชากรโดยวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะรับสารอาหารที่มีประโยชน์เข้าร่างกายคือการรับประทานในรูปแบบของข้าวหุงสุกซึ่งคุณภาพของข้าวหุงสุกเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลิตต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค (Soponronnarit et al., 2008) ซึ่งการทำสุกเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้มีส่งผลเรื่องเนื้อสัมผัสที่ต้องการของเมล็ดข้าวโดยเมล็ดข้าวเหมาะที่จะหุงด้วยน้ำที่ปริมาณน้อยหรือมากแตกต่างกันตามชนิดของข้าว โดยส่วนประกอบหลักของข้าวคือสตาร์ชซึ่งมีองค์ประกอบหลัก คือ อะมิโลส และอะมิโลเพคติน โดยสตาร์ชของเมล็ดข้าวจะเป็นตัวดูดซึมความชื้นและเกิดการบวมขยายตัวในระหว่างการหุงเนื่องจากการเกิดเจลาตินไนเซชัน (Gelatinization) (Yadav & Jindal, 2007) และอะมิโลสในขณะหุงข้าวจะแยกตัวออกมาจากเม็ดสตาร์ช และเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการคืนตัว (Retrogrades) แต่อะมิโลเพคตินที่ยังคงอยู่ในเม็ดสตาร์ชโดยปริมาณของอะมิโลสเป็นตัวสำคัญที่บ่งบอกถึงคุณภาพของข้าว (Juliano, 1985) และข้าวกล้องที่มีชั้นของรำข้าวที่แตกต่างกันจึงมีสมบัติของข้าวหุงสุกที่แตกต่างกันด้วย และส่งผลความพึงพอใจต่อคุณภาพของข้าวสุกซึ่งอาจมีปัจจัย ได้แก่ ภูมิประเทศแหล่งที่ปลูก หรือ กลุ่มคนที่ทานที่มีความต่างชาติพันธุ์และวัฒนธรรม (Soponronnarit et al., 2008) และเวลาที่ใช้ในการหุงก็ส่งผลต่อความแตกต่างของข้าวหุงสุกโดยความสุกของข้าวสังเกตุจาก 90% ของเมล็ดข้าวไม่มีส่วนตรงกลางเมล็ดที่มีลักษณะขุ่น และเวลาที่ใช้ก็ยังเป็นตัวกำหนดเรื่องความนุ่มและความเหนียวของข้าว (Shinde et al.,

2014) โดยข้าวกล้องยังใช้เวลาในการหุงมากกว่าข้าวขาวซึ่งเวลาที่ใช้จะขึ้นกับความแข็งหยาบของเมล็ดและอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจล ซึ่งข้าวที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลต่ำจะใช้เวลาหุงน้อยกว่า 20 min ส่วนข้าวที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลปานกลางจะใช้เวลาในการหุงมากกว่า 20 min (Singh et al., 2005) โดยการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวในระหว่างการหุงเป็นตัวชี้วัดคุณภาพที่สำคัญเพราะจะทำให้สามารถประมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาตรข้าวในระหว่างการหุง

2.2 ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice)

มีหลายงานวิจัยต้องการลดสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ของข้าวกล้อง เช่น หุงสุกช้า ลักษณะเนื้อสัมผัสที่หยาบ และต้องการเพิ่มสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Tian et al., 2004) โดยการนำไปเพาะงอก ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สารเคมีชีวภาพ สารอาหาร ลักษณะทางประสาทสัมผัส ซึ่งเป็นผลมาจากการคืนตัวของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต และการเกิดการสังเคราะห์ของสารประกอบทางชีวภาพ จากการเพาะงอกยังช่วยให้เพิ่มปริมาณสารอาหาร ได้แก่ วิตามิน แร่ธาตุ เส้นใยอาหาร และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น กรดเฟรูลิก (Ferulic acid) สารกาบา สารแกมมา-โอรีซานอล และ สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น (Cho and Lim, 2016)

2.2.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของข้าวกล้องงอก (Physicochemical properties germination brown rice)

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) เกิดจากการนำข้าวกล้องธรรมดามาแช่ในน้ำเพื่อให้เกิดการงอก (Komatsuzaki et al., 2007) และเกิดการสร้างเอนไซม์ไฮโดรไลติก (Hydrolytic enzymes) ซึ่งจะถูกกระตุ้นในระหว่างการทำงอก และโพลิเมอร์ในข้าวกล้องเกิดการแตกออกจากกันเกิดเป็น โอลิโกแซคคาไรด์ กรดอะมิโน และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอื่น ๆ และยังพบสารอาหารในข้าวกล้องงอกที่มีมากกว่าข้าวขัดสี เช่น เส้นใยอาหาร สารกาบา สารแกมมา-โอรีซานอล วิตามิน และสารประกอบฟีนอลิก ซึ่งอยู่รวมกันมากบริเวณผิวรำข้าว (Wu et al., 2013) และจากการสร้างเอนไซม์ไฮโดรไลติก จะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนที่จุดต่าง ๆ ในสายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักมวลโมเลกุลสูง โดยเฉพาะสตาร์ช เพื่อที่จะลดน้ำหนักมวลโมเลกุล เช่น กลูโคส และมอลโทส เป็นต้น (Induck et al., 2006)

การเพาะงอกของข้าวกล้องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารทางเคมีชีวภาพ เช่น คุณภาพสารอาหาร องค์ประกอบทางเคมี และการทำงานของเอนไซม์ โดยเริ่มจากการนำข้าวกล้องมาแช่น้ำจนกระทั่งมีรากงอก (Embryo) ซึ่งในขณะการทำงอกจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างมาก เนื่องจากเกิดกระบวนการทางชีวภาพที่ผลิตสารประกอบและพลังงานที่จำเป็นสำหรับใช้ในการงอก โดยมีเอนไซม์ไฮโดรไลติก (Hydrolytic enzymes) ทำหน้าที่กระตุ้นและย่อยสลายโมเลกุลขนาด

ใหญ่ในส่วนสตาร์ช (Starch) ส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ช (Non-starch) และโปรตีน เพื่อลดขนาดโมเลกุล โดยปกติข้าวก่อนการเพาะงอกจะมีเม็ดสตาร์ช (Starch granules) ที่มีผิวเรียบเนียนและเป็นเนื้อเดียวกัน พอหลังจากทำการเพาะงอกเป็นเวลา 2 – 4 วัน จะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนที่เม็ดสตาร์ชที่สูญเสียความเรียบเนียนที่ผิว มีความขรุขระมากขึ้น (Moongngarm, 2011; Cho and Lim, 2016)

สมบัติทางสัณฐานวิทยาของข้าวกล้องก่อนการเพาะงอกจะมีโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่เรียงกันอย่างต่อเนื่องและถูกล้อมรอบไปด้วยโปรตีน แต่เมื่อทำการเพาะงอกโครงสร้างที่เรียงกันอย่างต่อเนื่องนี้จะถูกทำลาย โดยหลังจากทำการเพาะงอก 2 วัน ตัวโปรตีนจะเริ่มหายไปเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์โพรทิโอลิทิค (Proteolytic enzyme) และเม็ดสตาร์ชจะมีความขรุขระมากขึ้น และหลังจากทำการเพาะงอก 3 วัน จะเกิดหลุมและรูเล็กๆที่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ช อาจเพราะเกิดการไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) ของสตาร์ชด้วยเอนไซม์ (Wu et al., 2013) และหลังจากการเพาะ 4 วัน โครงสร้างเม็ดสตาร์ชที่เรียงกันอย่างต่อเนื่องถูกทำลายและโปรตีนก็ถูกทำให้แตก ทำให้มีโมเลกุลขนาดแตกต่างกันและพบรอยแตกหักด้วย

2.2.2 สมบัติทางสารอาหารของข้าวกล้องงอก (Nutritional properties of germination brown rice)

การเพาะงอกของข้าวกล้องทำให้เกิดกระบวนการเผาผลาญ (Metabolic activity) ที่เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับการดูดน้ำของข้าวกล้อง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีชีวภาพเชิงซ้อนที่ส่วนต่างๆของเมล็ดข้าวโดยมีการใช้เพียงน้ำและออกซิเจนที่เป็นสิ่งสำคัญในการเพาะงอก โดยเริ่มจากการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อนให้อยู่ในรูปทั่วไปแล้วถูกเปลี่ยนเป็นสารสำคัญ (Chavan et al., 1989; Cho and Lim, 2016) โดยการทำงอกนั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ กรดอะมิโน อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องปกติ และการทำเพาะงอกยังช่วยในการลดปริมาณน้ำตาลทั้งหมดได้อีกด้วย (Moongngarm & Saetung, 2010) และการเพาะงอกนั้นเป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและเกิดการสังเคราะห์ของสารประกอบใหม่ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง และยังช่วยในการเพิ่มปริมาณสารอาหารและความคงตัว เช่น โปรตีน แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ ในขณะเดียวกันก็ลดกรดไฟติก (Phytic acid) และปริมาณสตาร์ชทั้งหมด (Chinma et al., 2015) และในงานวิจัยของ Roohinejad et al. (2009) รายงานว่า สารกาบาหลังจากทำการเพาะงอกข้าวกล้อง Malaysian มีปริมาณสารกาบา 1 – 10 mg/100g และมีปริมาณของกรดกลูตามิกและโปรตีนอยู่ระหว่าง 10.11 – 15.2 mg/g และ 6.99 – 10.17% ตามลำดับ และงานวิจัยของ Ohtsubo et al. (2005) รายงานว่าพบปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด 145% ซึ่งประกอบด้วยเส้นใยที่

สามารถละลายน้ำ 120% เส้นใยที่ไม่สามารถละลายน้ำ 150% และในงานวิจัยของ Kayahara et al. (2001) ไม่ได้พบเพียงแต่สารอาหารที่มีอยู่แล้วที่เพิ่มมากขึ้นแต่ยังพบสารใหม่ที่ปล่อยออกมาเนื่องจากการเพาะงอก ซึ่งสารอาหารที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สารกาบา ไลซีน วิตามิน E เส้นใยอาหาร ไนอาซิน แมกนีเซียม วิตามิน B1 และวิตามิน B6 และพบว่าสารกาบามีปริมาณมากกว่าถึง 10 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวขาว และ 2 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง และข้าวกล้องงอกยังพบสารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มฟีนอลิกที่ป้องกันการเกิดฝ้า ชะลอความแก่ ลดริ้วรอยเหี่ยวย่นของผิว รวมทั้งออริซานอลที่ช่วยควบคุมปรับระดับฮอร์โมนในวัยทอง และมีกากใยอาหารช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ป้องกันมะเร็งลำไส้ และลดอาการท้องผูก อีกทั้งยังกระตุ้นการสร้างสารไลโปโทปิก (Lipotropic) ซึ่งเป็นสารป้องกันไขมันเกาะตัวในร่างกาย ลดการสะสมไขมันจึงช่วยควบคุมน้ำหนักได้ และกระตุ้นการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Pituitary gland) จากสมองส่วนหน้า (Anterior pituitary) ที่ทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนที่ส่งเสริมการเจริญเติบโต กระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อ และกระดูกโครงร่างของร่างกาย

2.2.2.1 สารกาบา (Gamma-aminobutyric acid)

ข้าวกล้องงอกมีสารอาหารมากมายแต่ที่เป็นหัวใจสำคัญของข้าวกล้องงอก คือ กรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริก (Gamma-aminobutyric acid) หรือกาบา (GABA) ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่ผลิตจากกระบวนการ Decarboxylation ของกรดกลูตามิก โดยกรดนี้จะทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทในระบบประสาทส่วนกลางของคน และสารกาบาจะทำหน้าที่รักษาสมดุลในสมอง ช่วยให้สมองผ่อนคลาย นอนหลับสบาย และไปกระตุ้นต่อมไร้ท่อที่ทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนที่ช่วยในการเจริญเติบโตของร่างกายทำให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อต่าง ๆ โดยในข้าวกล้องงอกจะมีสารกาบามากกว่าข้าวกล้องปกติถึง 2 เท่าและมากกว่าข้าวขาวที่ผ่านการสี 10 เท่า (Kayahara et al., 2001) และสารกาบาจะช่วยป้องกันสมองถูกทำลายจากสารเบต้าอะไมลอยด์เปปไทด์ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคอัลไซเมอร์ (Louzada et al., 2004) นอกจากนี้ยังมีข่าวทางการแพทย์ได้นำสารกาบานี้มาใช้รักษาโรคเกี่ยวกับระบบประสาทต่าง ๆ เช่น การนอนไม่หลับ โรควิตกกังวล หรือลมชัก เป็นต้น (กรกฎ และคณะ, 2561)

นอกจากกาบาแล้วยังมีผลวิจัยว่าข้าวกล้องงอกช่วยลดความดันโลหิตและลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือด เพราะช่วยให้หลอดเลือดมีความยืดหยุ่น เลือดจึงไหลเวียนดีขึ้น จึงช่วยควบคุมระดับความดันโลหิตให้ปกติ ลดน้ำหนัก ช่วยให้ผิวพรรณดี กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย (Immune system) กระตุ้นการสร้างฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ที่เป็นสารประกอบสำคัญในเม็ดเลือดแดง (Heme) และมีหลายงานวิจัยที่มีการทดสอบหาปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการเปรียบเทียบปริมาณสารกาบาระหว่างข้าวกล้องและข้าวกล้องงอก

References	GABA (mg/100 g sample)	
	Brown rice	Germinated Brown rice
Chatchavanthatri et al. (2021)	0.41	11.90
Moongngarm and Seatung (2010)	23.80	68.40
Chungcharoen et al. (2015)	5.60	27.90

สารกาบามีความสำคัญต่อการทำงานของสารสื่อประสาท โดยสารนี้จะเกิดระหว่างการทำงอก ซึ่งมีหลายงานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการหาวิธีที่เหมาะสมในการเพาะงอก เช่น การแช่ การบ่ม อุณหภูมิการทำแห้ง เพื่อที่ให้ได้ข้าวกล้องงอกที่มีสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพิ่มมากขึ้น (Komatsuzaki et al., 2007; Mohan, Malleshi, & Koseki, 2010; Watanabe et al. 2004) และมีหลายงานวิจัยหลายตัวที่ใช้ข้าวไทยในการเพาะงอก (Moongngarm & Saetung, 2010; Watchararparpaiboon et al., 2010) ซึ่งในงานของ Sirisoontaralak et al. (2015) พบปริมาณสารกาบาของข้าวกล้อง 9.6 mg/100 g ข้าวกล้องงอก 15.0 mg/100 g และข้าวสุกที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ 6.9 – 8.5 mg/100 g

2.2.2.2 สารแกมมา-โอรีซานอล (Gamma-oryzanol)

สารแกมมา-โอรีซานอล เป็นสารผสมที่เชื่อมกันด้วยพันธะเอสเทอร์ระหว่างกรดเฟรูลิก (Ferulic acid) และไทรเทอร์พีน (Triterpenes) ซึ่งมีมากกว่า 10 ชนิด เช่น Cycloartenyl ferulate, 24-methylene cycloartanyl ferulate และ Campestanyl ferulate โดยสารเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักของสารแกมมา-โอรีซานอลในข้าวกล้องงอก (Jayadeep & Malleshi, 2011) และปัจจุบันมีการนำสารแกมมา-โอรีซานอลไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอางซึ่งมีความสามารถในการช่วยปกป้องผิวจากแสงแดดและป้องกันการเกิดริ้วรอยรวมถึงป้องกันระดับคอเลสเตอรอลสูง และมีสมบัติในการยับยั้งการเกิดการเหม็นหืน (พงศ์เพรียจันทร์ และกาละดี 2543) ลดระดับคอเลสเตอรอลเลว (LDL) และลดระดับไตรกลีเซอไรด์ และมีงานวิจัยของ Cheruvanky et al. 2003 รายงานว่าสารแกมมา-โอรีซานอล ช่วยในการเพิ่มฮอร์โมนเทสโตสเตอโรน (Testosterone) ของผู้ชายและกระตุ้นการหลั่งฮอร์โมนเอนโดฟิน (Endorphin) ของสมองมากขึ้นและช่วยลดความเสี่ยงจากการเป็นโรคหลอดเลือดแข็งตัว และมีหลายงานศึกษาทั้งในคนและสัตว์ว่า

สารประกอบนี้มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ลด LDL-cholesterol และเพิ่ม HDL-cholesterol (Gerhardt & Gallo, 1998; Rong et al., 1997; Wilson et al., 2002) และยังมีประโยชน์ในเรื่องของการช่วยลดการเกิดเนื้องอก ป้องกันเลือดหนืด ต้านการอักเสบ (Lerma et al., 2009) จากงานวิจัยของ Cáceres et al. (2017) พบปริมาณของสารแกมมา-โอรีซานอลของข้าวกล้องงอกที่ทำแห้งแบบ Freeze dried และ Sun dried คือ 9.20 – 9.64 mg/100 g และ 14.08 – 18.18 mg/100 g ตามลำดับ และในวิจัยของ Lee et al. (2007) รายงานว่าการทำการเพาะงอกทำให้ปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลของข้าวพันธุ์ Keunneun และ Heukgwangbyeo เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า และ 1.9 เท่า อย่างมีนัยสำคัญ

2.2.2.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compounds, TPC)

สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประกอบที่มีวงอะโรมาติก (Aromatic ring) ซึ่งมี 1 วงเบนซีนและหมู่ไฮรดรอกซีล (Hydroxyl group) กับอนุพันธ์สารประกอบฟีนอลิกอื่นๆ โดยโครงสร้างที่ง่ายที่สุดคือ กรดฟีนอลิก และสารประกอบฟีนอลิกเป็นผลผลิตที่ได้จากเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืชที่เกิดในกิจกรรมต่าง ๆ ของพืช เช่น การป้องกันและต่อต้านเชื้อก่อโรคและนักล่า การดึงดูดแมลงเพื่อผสมเกสร การป้องกันตัวจากแสงแดด เป็นต้น (Bravo, 1998; Parr & Bolwell, 2000) โดยสารประกอบฟีนอลิกทำหน้าที่ในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงทำให้หยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารอนุมูลอิสระจึงมีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งช่วยในการป้องกันการเกิดฝ้า ชะลอความแก่ ลดริ้วรอยเหี่ยวย่นของผิว และงานวิจัยของ Tian, Nakamura & Kayahara (2004) รายงานว่าสารประกอบฟีนอลิกมีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น ป้องกันโรคหัวใจขาดเลือด ป้องกันโรคมะเร็งและจากงานวิจัยของ Cáceres et al. (2017) พบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทังหมด ของข้าวกล้องงอกที่ทำแห้งแบบ Freeze dried และ Sun dried คือ 176.48 – 382.99 mg GAE/100 g และ 190.29 – 429.34 mg GAE/100 g ตามลำดับ

2.2.2.4 สตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch)

สำหรับอาหารประเภทแป้ง มีผู้บริโภคจำนวนมากให้ความสนใจเกี่ยวกับสตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch) ซึ่งจะไม่ถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็ก และเข้าไปในลำไส้ใหญ่แล้วเกิดการหมักตัว ซึ่งจะช่วยในเรื่องของการรักษาสุขภาพของลำไส้ และมีประโยชน์ในการป้องกันโรคเกี่ยวกับการทานอาหาร โดยเฉพาะ โรคเบาหวาน และโรคมะเร็งในลำไส้ใหญ่ ซึ่งในงานของ Sirisoontaralak et al. (2015) พบปริมาณสตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ข้าวกล้อง 0.29

mg/ 100 g ข้าวกล้องงอก 0.36 mg/ 100 g และข้าวที่ผ่านการหุงด้วยวิธีต่างๆ 0.47 – 0.74 mg/ 100 g และจากงานวิจัยของ Chungcharoen et al. (2015) พบปริมาณสตาร์ชทั้งหมด 71.47 – 74.90 mg/ 100 g

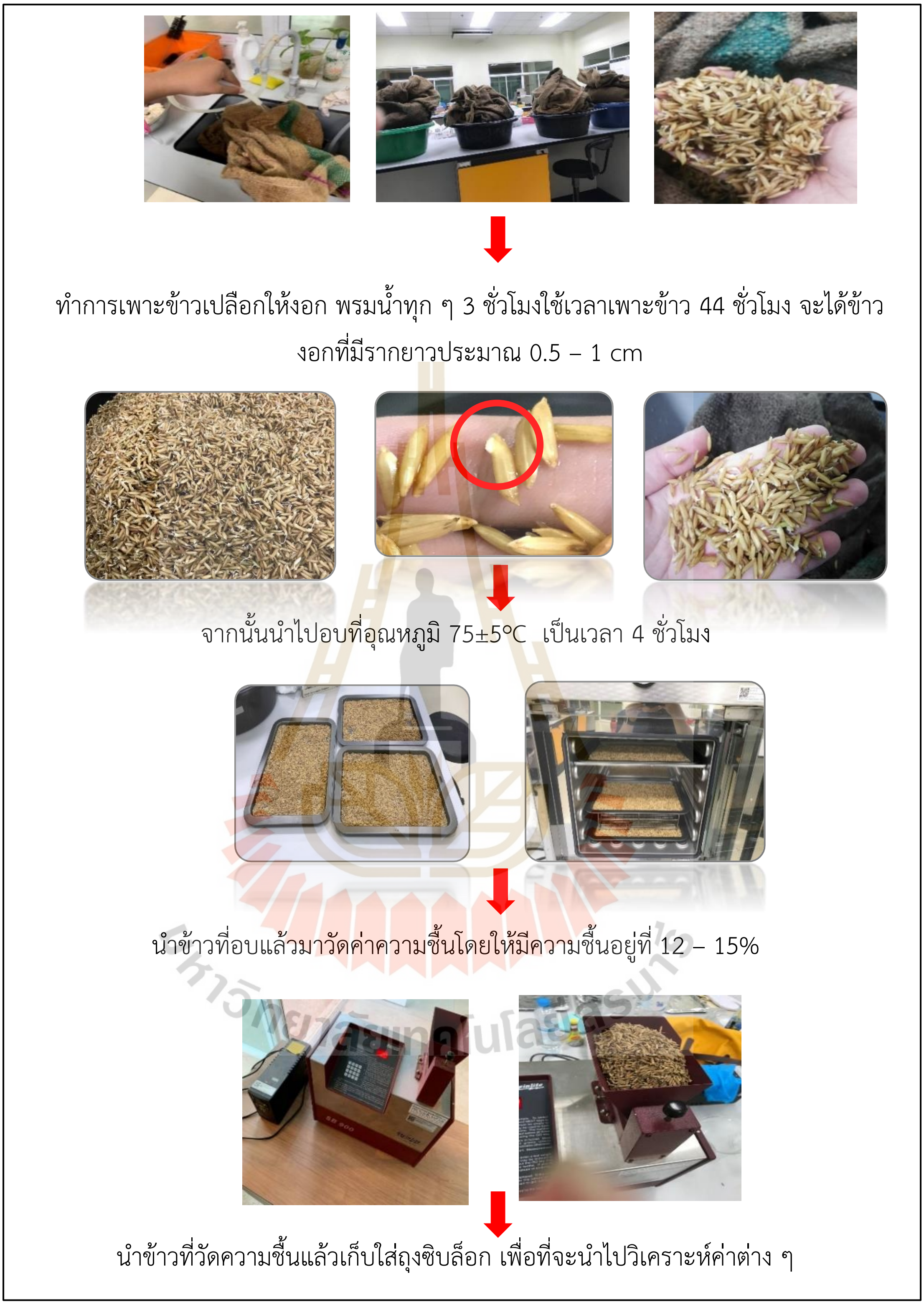
2.2.3 การเตรียมข้าวเปลือกงอก

นำข้าวเปลือกมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า และฆ่าเชื้อด้วยการแช่สารละลาย 0.1% โซเดียมไฮโปคลอไรด์ นาน 10 min แล้วล้างน้ำเปล่าอีก 3 ครั้ง แล้วนำมาแช่ในน้ำสะอาด (Soaking) เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำข้าวที่แช่มาเพาะงอก (Germinating) โดยใช้กระสอบป่านคลุมและพรมน้ำทุก ๆ 2 – 3 h เพื่อช่วยให้ความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการเพาะงอกมีค่าประมาณ 80 – 85% โดยระยะเวลาการเพาะงอกข้าวนาน 48 h ซึ่งทำให้ได้ข้าวเปลือกงอกที่มีรากยาวระหว่าง 0.1 – 0.5 cm เมื่อได้ข้าวเปลือกงอกแล้วนำไปทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดจนกว่าจะได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 12 – 14% และนำไปกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่อง Rice dehuller (NW 150, Natrawee, Thailand) เพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอกซึ่งจะบรรจุในถุงสุญญากาศและเก็บรักษาที่ -20°C ก่อนนำไปใช้ในการทดลองต่อไป ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 (Chatchavanthatri et al., 2021)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตข้าวเปลือกงอก

(Chatchavanthatri et al., 2021)



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผลิตข้าวเปลือกงอก (ต่อ)

(Chatchavanthatri et al., 2021)

2.3 ข้าวพอง (Puffed rice)

ข้าวพอง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำข้าวเจ้าหรือข้าวเหนียวมาหุงให้สุก ผึ่งแดดหรืออบให้แห้งแล้วนำมาทอดหรือคั่วให้พองดัง รูปที่ 2.4 แล้วอาจนำคลุกกับส่วนผสมของน้ำน้ำตาลและแบะแซที่เคี่ยวจนเหนียวพอเหมาะ และอาจเติมสีผสมอาหารหรือส่วนประกอบอื่น เช่น งาดำ อัดเป็นแผ่น ตัดเป็นชิ้น ข้าวพองเป็นขนมที่กลับมาได้รับความนิยมในเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยผู้บริโภคส่วนใหญ่จะนิยมบริโภคเป็นขนม เนื่องจากเป็นตัวเลือกที่ห่างไกลจากผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นผลดีต่อสุขภาพอย่างมันฝรั่งทอด และเหตุผลสำคัญที่ทำให้ข้าวพองได้รับความสนใจ คือ **(1) ใยอาหาร** ข้าวพองทำจากข้าวกล้องที่ดีต่อสุขภาพ เนื่องจากมีใยอาหารในปริมาณสูงและการบริโภคเพียงครึ่งถ้วยก็นับว่าเพียงพอต่อปริมาณธัญพืชเต็มเมล็ดที่มีการแนะนำให้บริโภคต่อวัน **(2) พลังงาน** ข้าวจัดเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต ดังนั้นจึงให้พลังงานได้ตลอดทั้งวัน แตกต่างจากธัญพืชอื่น ๆ ที่จะถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว **(3) แคลอรีต่ำ** ข้าวพองจัดเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับคนที่ต้องการลดน้ำหนัก เนื่องจากให้แคลอรีที่ต่ำมาก ไม่มีส่วนประกอบของไขมัน อีกทั้งยังช่วยให้อิ่มนาน ซึ่งสามารถลดการกินนอกเหนือจากความจำเป็น และ **(4) คุณประโยชน์ด้านอารมณ์** นอกเหนือจากประโยชน์ด้านสุขภาพข้าวพองยังมีส่วนช่วยในด้านของอารมณ์ได้เป็นอย่างดี ช่วยในการควบคุมอารมณ์ เนื่องจากการบริโภคข้าวจะมีส่วนช่วยในการหลั่งสารในประสาทอย่างซีโรโทนินซึ่งมีส่วนช่วยในการปรับปรุงด้านอารมณ์

ขนมขบเคี้ยวเป็นหนึ่งในส่วนที่สำคัญที่สุดของอุตสาหกรรมอาหาร การออกแบบขนมขบเคี้ยวในปัจจุบันอาจเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนในการตอบสนองรสนิยมและความคาดหวังของผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลงไป และการค้นหาบางสิ่งที่ไม่เหมือนใครซึ่งดึงดูดใจผู้คนได้หลากหลาย ผู้ผลิตขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่ใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่บางรูปแบบเป็นพื้นฐานในการสร้างผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและผสมผสานรูปแบบต่าง ๆ ที่ช่วยเพิ่มภาพลักษณ์ด้านสุขภาพของขนมขบเคี้ยว และในปัจจุบันมีความสนใจอย่างต่อเนื่องในการลดการบริโภคไขมันในอาหารขบเคี้ยวนำไปสู่ความต้องการผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่สามารถให้เนื้อสัมผัสของอาหารทอด (Moraru & Kokini, 2003) และการทำพองยังเปิดโอกาสให้สร้างผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ขยายออกไป ซึ่งนอกจากเนื้อสัมผัสแล้วยังให้ข้อดีเพิ่มเติมในการเก็บรักษาส่วนประกอบทางโภชนาการที่ดีขึ้นและรสชาติที่ครบถ้วน (Gulati & Datta, 2016; Moraru & Kokini, 2003; Sagar & Suresh Kumar, 2010) โดยการพองตัวโดยทั่วไปหมายถึงความสามารถของวัสดุอาหารในการขยายปริมาตรอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำจากของเหลวเป็นไอซึ่งการเปลี่ยนเฟสนี้นำไปสู่แรงกดดันภายในที่ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น และจุดสำคัญอย่างหนึ่งที่นำไปสู่ความสำเร็จของการพองตัวคือการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิหรือความดัน (Whalen, 1992; Yewale & Chattopadhyay, 2013) ในการพองตัวที่มีการให้ความร้อนอย่างรุนแรงจะทำให้ความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการพองตัวยังทำให้ผลิตภัณฑ์มีรสชาติที่ยอมรับได้

และมีกลิ่นหอมที่พึงพอใจซึ่งเมล็ดข้าวพองเป็นวัสดุพร้อมรับประทานที่ปรุงสำเร็จแล้ว สามารถนำมาใช้ในอาหารขบเคี้ยว และใช้สำหรับเป็นวัตถุดิบสำหรับการพัฒนาอาหาร ตัวอย่างของการใช้กระบวนการพองตัว ได้แก่ การผลิตข้าวพอง (Hoke et al., 2005) ขนมขบเคี้ยวที่สะดวก เช่น ป๊อปคอร์น ข้าวตอก ข้าวพอง ข้าวฟ่าง ข้าวสาลีอบ ถั่วเหลืองพอง และพืชตระกูลถั่วอื่น ๆ เป็นที่นิยมอย่างมาก (Anderson, 1971; Jaybhaye et al., 2014) โดยทั่วไปเมล็ดธัญพืชจะพองได้ด้วยหลายวิธี ได้แก่ ลมร้อน ทรายร้อน ทอดในน้ำมันร้อน ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ และด้วยวิธีการพ่นด้วยปืนการคั่ว แต่การใช้น้ำมันในการทอดสามารถดูดซับและเปลี่ยนเป็นหืนได้ง่าย อย่างไรก็ตามการทำพองข้าวด้วยวิธีดั้งเดิมเป็นวิธีที่ง่าย ราคาไม่แพง และรวดเร็วที่สุด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของว่างพร้อมรับประทาน โดยหลักการพองตัวเป็นการระเบิดโดยการปล่อยไอน้ำอย่างกะทันหันและการขยายตัวของไอน้ำเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างเป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย (Sullivan and Craig, 1984)

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของข้าวพอง

จากการศึกษาผลเชิงคุณภาพและกระบวนการต่าง ๆ ในการทำข้าวพองของ Pompe et al. (2020) การขยายตัวเกิดจากความร้อนสูง ทำให้เกิดความดันภายในอันเนื่องมาจากการสะสมของไออย่างรวดเร็วในผลิตภัณฑ์ สิ่งนี้นำไปสู่การแยกชั้นบริเวณผิว และปัจจัยในการพองตัว ได้แก่ การเกิดชั้นเปลือกที่มีความหนา (Crust) ปริมาณความชื้น ความหนาของวัสดุ และอัตราการระเหยภายในวัสดุ โดยชั้นเปลือกที่หนาของข้าวก่อนทำพองจะช่วยลดการไหลออกของไอ ทำให้ความดันภายในเพิ่มขึ้นและขยายตัวได้ดีและการเพิ่มความหนาของชั้นเปลือกทำได้โดยการลวกด้วยน้ำและการอบแห้งในเตาอบ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่ากระบวนการทางเคมีกายภาพ 3 กระบวนการที่มีส่วนทำให้เกิดชั้นของเปลือก คือ (a) การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง (b) การเคลื่อนที่ของอะมิโลสและส่วนผสมที่ละลายน้ำได้อื่น ๆ ไปยังพื้นผิว และ (c) การหดตัวและปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นจะลดความแข็งแรงทางกล ทำให้พองตัวได้ง่ายขึ้น วัสดุที่หนาขึ้นจะพองตัวได้ยากขึ้นเนื่องจากมีความต้านทานทางกลเพิ่มขึ้น (Pompe et al., 2020)

รูปที่ 2.4 ข้าวกล้องงอกพอง

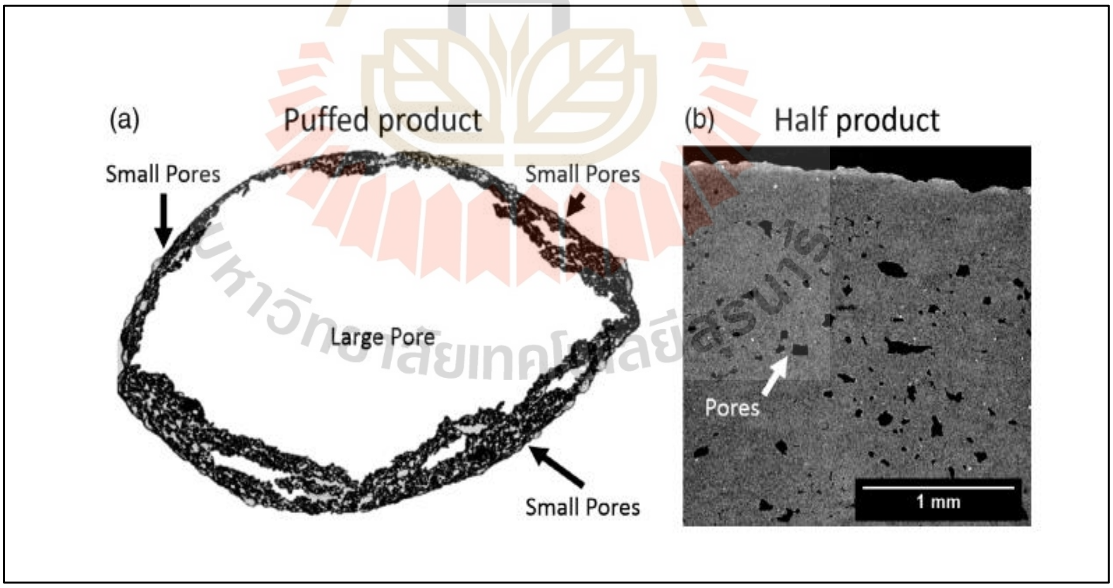
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการทำข้าวพอง

ข้าวพองเป็นที่นิยมมากในหลายประเทศซึ่งเป็นส่วนประกอบอาหารเช้า โดยถูกเตรียมด้วยหลายวิธี เช่น การให้ความร้อนในอากาศที่มีอุณหภูมิสูง, น้ำมัน, ทราย, หรือจากข้าวสารดิบในไมโครเวฟ หรือโดยปืนพอง ในระหว่างการพองตัวเมล็ดข้าวจะเพิ่มปริมาตรขึ้นหลายเท่าและกรอบทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้าวพองพร้อมรับประทานที่มีรูพรุน รูปที่ 2.5 ในกระบวนการพองตัวของข้าวพองมี ปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ การเลือกชนิดของข้าวที่เหมาะสมกับการทำพองและวิธีการให้ความร้อนในการทำพองของข้าวดิบ

Chinnaswamy & Bhattcharya (1983) ทำศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการนึ่ง การสี และการทำพอง โดยทำการทดลองกับข้าวเปลือกพันธุ์อินตันที่ได้มาจากตลาดในปริมาณมาก จากนั้นนำมาทำความสะอาด ตากให้แห้ง (ให้มีความชื้น 12 – 13% w.b.) และเก็บไว้ในภาชนะโลหะในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งการทดลองทั้งหมดดำเนินการ 5 – 10 เดือนหลังจากการเก็บเกี่ยว และสำหรับการนึ่งข้าวเปลือก 0.5 – 2 kg ถูกเติมในน้ำประปา 2 – 3 l ที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 80°C และคลุมภาชนะด้วยกระสอบปอและทิ้งไว้ค้างคืน (Bhattcharya & Indudhraswamy, 1967) จากนั้นระบายน้ำออกและหุงข้าวด้วยการนึ่ง (ข้าวเปลือกนึ่ง) หรือเช่นเดียวกับที่ทำในอุตสาหกรรม ข้าวเปลือกที่แช่แล้วถูกนึ่งบนถาดตะแกรงลวดเป็นเวลา 10 min ในหม้อนึ่งความดัน (0 – 3 barg) ซึ่งได้รับการทดสอบในขั้นต้น และเลือกความดัน 1.5 barg สำหรับการศึกษาในภายหลัง

สำหรับการให้ความร้อนด้วยทราย เป็นวิธีการหลักของ Ali & Bhattcharya (1976) สำหรับการผลิตข้าวพองแบบแผ่น โดยการนำทรายละเอียดประมาณ 250 g ถูกให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (200 – 300°C) ในเครื่องคั่วกาแฟแบบใช้มือหมุนเป็นทรงกระบอกและให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าที่มีความจุประมาณ 1 kg จากนั้นเทข้าวเปลือกที่แช่แล้วประมาณ 130 g ลงในเครื่องคั่วอย่างรวดเร็ว และข้าวเปลือกถูกหมุนที่อัตรา 80 – 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ต้องการ (0.5 – 4.5 min) หรือ จนกระทั่งเมล็ดข้าวพอง ร่อนทรายออก แล้วปล่อยข้าวให้เย็นตัวเป็นเวลา 30 min

โดยวิธีการนึ่งด้วยไอน้ำถูกนำมาใช้ในการศึกษาต่อ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายกว่าวิธีการลวกด้วยความร้อนแห้ง ข้าวเปลือกที่นึ่งแล้วถูกทำให้แห้งในห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 1 – 2 วัน (เพื่อให้ได้ความชื้น 10.5 – 11.0%, w.b. ข้าวที่ขัดสีแล้ว) แล้วสีในระดับการสี 8 – 10% สำหรับการศึกษาตามปกติ หรือ ให้ได้ระดับการสีข้าวที่ต้องการ ข้าวหักจะถูกนำออก ในการทดสอบผลกระทบความชื้นของข้าวนึ่งที่มีผลต่อปริมาตรการขยายตัว ข้าวเปลือกที่นึ่งแล้วจะถูกเก็บรวบรวมในช่วงเวลาต่าง ๆ กันในระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศ การสี จากนั้นข้าวนึ่งที่ขัดสีแล้ว (20 g ปรับความชื้น 10.5 – 11%) ถูกทำให้ร้อนด้วยทรายอุ่น 10 – 20 เท่าของน้ำหนัก (200 – 300°C) เป็นเวลา 10 – 11 s กล่าวคือ จนกระทั่งเสียงแตกก็หยุด



รูปที่ 2.5 ลักษณะรูพรุนภายในเมล็ดข้าว (a) เมล็ดข้าวทั้งเมล็ด (b) ตัดขวางของเมล็ดข้าวครึ่งเมล็ด

(Pompe, Briesen, & Datta, 2020)

2.4 สตาร์ช

สตาร์ชถูกกักเก็บเป็นเม็ดสตาร์ชเล็ก ๆ ที่พบในพืชบนบกอย่างมากมายและทั่วไป และยังมีความสำคัญสำหรับมนุษย์ในฐานะเป็นส่วนประกอบหลักในอาหาร (Zobel, 1984) เมื่อถูกทำให้ร้อนในน้ำร้อน พันธะระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลแป้งจะถูกทำลายลง ปล่อยให้ตำแหน่งพันธะของไฮโดรเจนจับกับน้ำ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เจลาติไนเซชัน ซึ่งจำเป็นต่อการใช้แป้งในอุตสาหกรรมและการทำอาหารทุกประเภท โดยมีลักษณะเฉพาะ เช่น การสูญเสียความเป็นผลึกและการหักเหของแสง การสะลายของอะมิโลส และการบวมของเม็ดสตาร์ชที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Waigh et al., 2000) ดังนั้นสตาร์ชจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวปรับพื้นผิวของอาหารในอุตสาหกรรมอาหารและเป็นสารยึดติดในอุตสาหกรรมอื่น ๆ

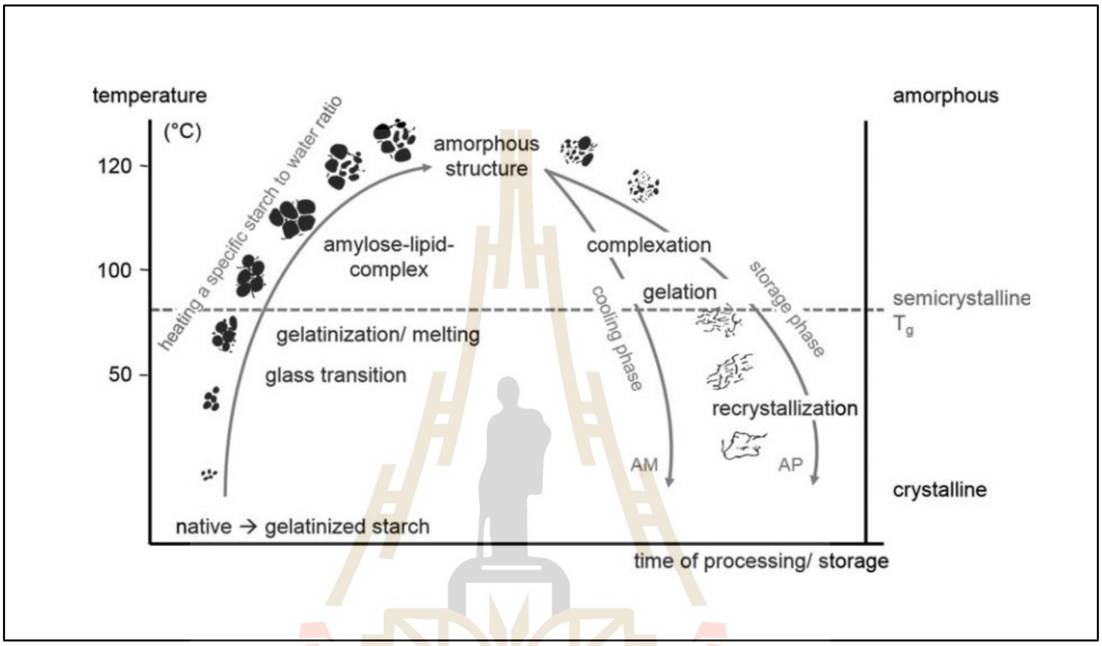
สตาร์ชนั้นประกอบด้วยด้วยพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยซ้ำของแอลฟาดี-กลูโคส (α-D-glucose units) ได้แก่ อะมิโลสและอะมิโลเพกตินเป็นหลัก โดยอะมิโลสเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง α-1,4 และอะมิโลเพคตินเป็นโพลีเมอร์โซ่กิ่งซึ่งประกอบด้วยโซ่หลักที่มีกลูโคสเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง α-1,6 ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดทางพฤกษศาสตร์ของสตาร์ชและสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ระหว่างการเจริญเติบโตของพืช ทำให้เม็ดสตาร์ชมีรูปร่างแตกต่างกัน และโดยทั่วไปเม็ดสตาร์ชจะมีรูพรุนตรงกลางที่เรียกว่า ฮิลัม (Waigh et al., 1997)

สมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชขึ้นกับปัจจัย ได้แก่ ความยาวและจำนวนของโมเลกุลอะมิโลสและสายโซ่กิ่งอะมิโลเพคติน สตาร์ชที่ขาดอะมิโลสอาจทำให้เกิดเจลมีลักษณะที่เหนียวซึ่งเรียกว่าแป้งข้าวเหนียว ซึ่งจากหลายงานวิจัยที่วิเคราะห์สตาร์ชด้วยการทำ X-ray diffractometry เป็นมุมกว้างสามารถจำแนกรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นกับสตาร์ชออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ A-type มักพบในแป้งธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าว (Hizukuri et al. 1983; Parker and Ring, 2001) B-type พบในแป้งธัญพืชที่มีอะมิโลสสูง (>50%) และ พืชหัว เช่น มันฝรั่ง ดอกลิลลี่ ทิวลิป ดอกบัว และพุทธรักษา (Hizukuri et al., 1983; Parker and Ring, 2001) C-type แสดงถึงรูปแบบผสมระหว่าง A-type และ B-type ซึ่งสามารถพบได้ในพืชเมืองร้อนและแป้งของพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่ว (Sugimoto & Watsuji, 2006) และเกาลัด (Iwaki & Sugimoto, 2004)

2.4.1 การเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกรเดชัน (Gelatinization and retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) จะทำให้พันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในสตาร์ชถูกทำลายและเกิดการคลายตัว แล้วรวมกับน้ำทำให้เกิดการพองตัวและมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลอะมิโลสแบบเกลียวจะคลายตัวแบบไม่เจาะจงแล้วเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับกัน

ด้วยพันธะไฮโดรเจนแล้วเกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเกลียวคู่ (Double helices) และมีการคายน้ำออกจากโมเลกุล (Syneresis) เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) เมื่อระยะเวลาผ่านไปกระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกลียวคู่ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่มีความหนาแน่นมากขึ้น (อริญา, 2555) ดัง รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงเม็ดสตาร์ชและอุณหภูมิ (Schirmer et al., 2015)

2.4.1.1 การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดเจลาติไนเซชัน

การศึกษาเกี่ยวกับการให้ความร้อนด้วยไอน้ำกับข้าวเปลือกที่มีความเป็นผลึกจนเปลี่ยนเป็นอสัณฐานเนื่องจากการเกิดการบวมน้ำและหลอมรวมกันแบบไม่ย้อนกลับ โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดได้ดีด้วยวิธี เช่น การแช่ในน้ำร้อน การให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่ความดันต่ำ (Himmelsbach et al., 2008; Ayamdoo et al., 2013) และการนึ่งข้าว ซึ่งวิธีเหล่านี้เป็นผลทำให้เกิดเจลลาติไนเซชันในสตาร์และทำให้น้ำหนักของผลผลิตเพิ่มขึ้น (Wu et al., 2002) และในระหว่างการเกิดเจลลาติไนเซชันทำให้เม็ดสตาร์ชถูกเชื่อมรอยแตกให้สนิทซึ่งเห็นได้ชัดในส่วนของเนื้อข้าว (Bauer & Knorr, 2004; Ituen & Ukpakha, 2011) และจากงานวิจัยของ Pompe et al. (2020) อธิบายเกี่ยวกับการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไอน้ำส่งผลให้เมล็ดข้าวมีความแน่นที่บริเวณชั้นผิวข้าว และการเกิดเจลลาติไนเซชันที่มากขึ้นยิ่งส่งผลให้ความแน่นที่ชั้นผิว

เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถทำพองได้ง่ายขึ้นด้วย และหลังจากการเกิดเจลลาติไนเซชัน ทำให้น้ำที่ผิวของเมล็ดข้าวจะไปพาอะมิโลสและองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้มารวมตัวและห่อหุ้มบริเวณผิวของเมล็ดข้าวซึ่งทำให้บริเณผิวมีความแข็งแรงมากขึ้น

2.4.1.2 การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน

การศึกษาปัจจุบันแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอุณหภูมิในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Bosmans, Lagrain, Fierens, & Delcour, 2013; Hesso et al., 2015) ที่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำและอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช มีงานวิจัยเกี่ยวกับบทบาทของโครงข่ายโปรตีนและสถานะของสตาร์ชร่วมกับการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Bosmans et al., 2013) โดยการให้อุณหภูมิต่ำจะสนับสนุนการกระจายตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินที่สูงขึ้นและรีโทรเกรเดชันมากขึ้นแต่ความแน่นต่ำ (Besbes, Jury, Monteau, & Le Bail, 2014; Besbes et al., 2016; Bosmans et al., 2013; Patel, Waniska, & Seetharaman, 2005)

2.4.2 การศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ช

2.4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างเคมีของสตาร์ชโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Synchrotron-radiation-based Fourier transform infrared, SR-FTIR)

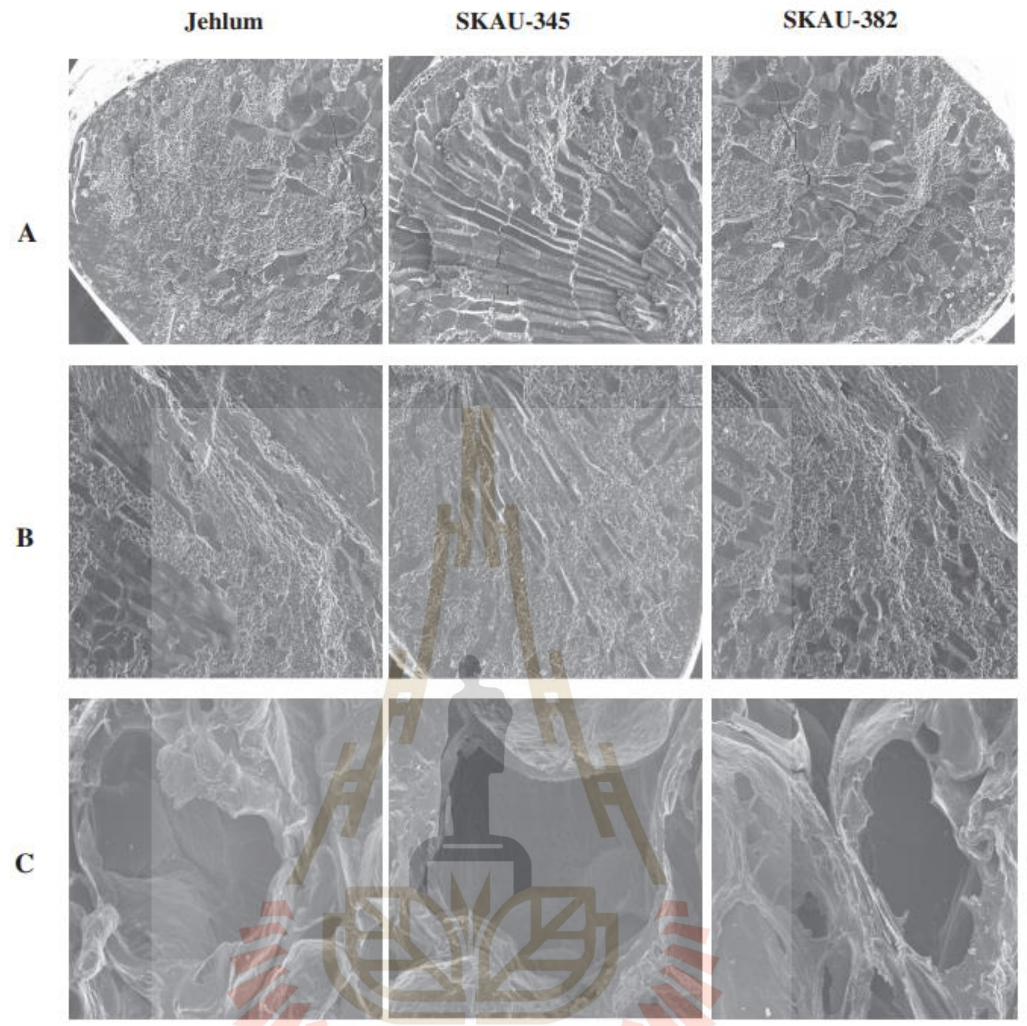
จากงานวิจัยของ Kongmon et al. (2020) อธิบายถึงการใช้เทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared absorption, IR) ของโมเลกุล โดยอาศัยการสั่นของพันธะทางเคมี (Chemical bonding vibration) ทั้งการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) และการสั่นแบบงอ (Bending vibration) ทั้งนี้การสั่นของพันธะเคมีที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดที่ความถี่เฉพาะจะทำให้ทราบชนิดของหมู่หน้าที่ (Functional group) ของโมเลกุลภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์ โดยแสดงลักษณะสเปกตรัม (Spectrum) ที่มีการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดช่วงความถี่หรือเลขคลื่น (Wavenumber) แตกต่างกัน โดยแสดงให้เป็นพีค (Peak) ของสเปกตรัม (Spectrum) ในแต่ละจุดสามารถบ่งบอกถึงองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) โปรตีน (proteins) และลิพิด (Lipids) ซึ่งมีพีคอยู่ในช่วงสเปกตรัมระหว่าง 1200 – 800 cm^{-1} 1700 – 1500 cm^{-1} และ 3000 – 2800 cm^{-1} ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Kong & Yu (2007) ได้อธิบายถึงการจำแนกโปรตีนแต่ละชนิด โดยมี Amide I และ Amide II ซึ่งสามารถพบในในช่วงความยาวคลื่น 1600 – 1690 cm^{-1} และ 1480 – 1575 cm^{-1} ตามลำดับ

2.4.2.2 การหาความเป็นผลึกของสตาร์ชด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering (WAXS)

จากงานวิจัยของ Pozo et al. (2018) สามารถถูกจำแนกสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภทคือ A-type B-type และ C-type โดย A-type สามารถพบได้ในสตาร์ช เช่น ข้าว ธัญพืช และข้าวโพด ซึ่งจะปรากฏพีคใหญ่ (Major peak) ที่ 2θ เท่ากับ 15.05°, 17.09°, 17.92° และ 23.00° และปรากฏพีคเล็กที่ 2θ เท่ากับ 11.27°, 26.33° ส่วน B-type สามารถพบได้ในสตาร์ช เช่น ข้าวที่มีอะมิโลสสูง ซึ่งจะปรากฏพีคใหญ่ที่ 2θ เท่ากับ 15.26°, 17.21°, 19.75°, 22.32° และ 24.08° และปรากฏพีคเล็กที่ 2θ เท่ากับ 5.81° และ 26.10° ส่วนชนิดสตาร์ช C-type เป็นการผสมกันระหว่าง A-Type และ B-Type ซึ่งสามารถพบได้ในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว โดยจะปรากฏพีคที่ 2θ เท่ากับ 15.06°, 17.09°, 19.34° และ 22.86° และมีงานวิจัยของ Kumar & Prasad, 2018 กล่าวว่า V-type สามารถพบได้ในสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับหมู่ฟังชันก์ เช่น ไอโอดีน แอลกอฮอล์ ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) กรดไขมัน และโปรตีน เป็นต้น ซึ่งจะปรากฏพีคที่ 2θ เท่ากับ 17.85° และ 24.75°

2.4.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

งานวิจัยของ Mir et al. (2016) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องดิบ ข้าวกล้องสุก และข้าวกล้องพอง ซึ่งแสดงใน รูปที่ 2.7 ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยข้าวกล้องดิบแสดงลักษณะโครงสร้างที่มีเนื้อแน่นและชิดกันและสามารถมองเห็นรอยแตกได้ในบางส่วนของเมล็ดข้าว ส่วนข้าวสุกที่ผ่านการให้ความร้อนมีลักษณะโครงสร้างที่บวมน้ำและมีการรวมตัวกันของเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้ลดรอยแตกหักให้เมล็ดข้าวและมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกของอะมิโลเพคตินไปเป็นอสัณฐาน ส่วนข้าวพองถูกพบรูพรุนจำนวนมากทั้งขนาดใหญ่และเล็ก และการที่มีการทำให้เกิดเจลาติไนเซชันก่อนการทำพองทำให้ข้าวถูกทำลายในส่วนของโปรตีนทำให้เกิดเป็นโพรงอากาศภายในเนื้อข้าวหลังจากการทำพอง (Chandrasekhar & Chattopadhyay, 1990)



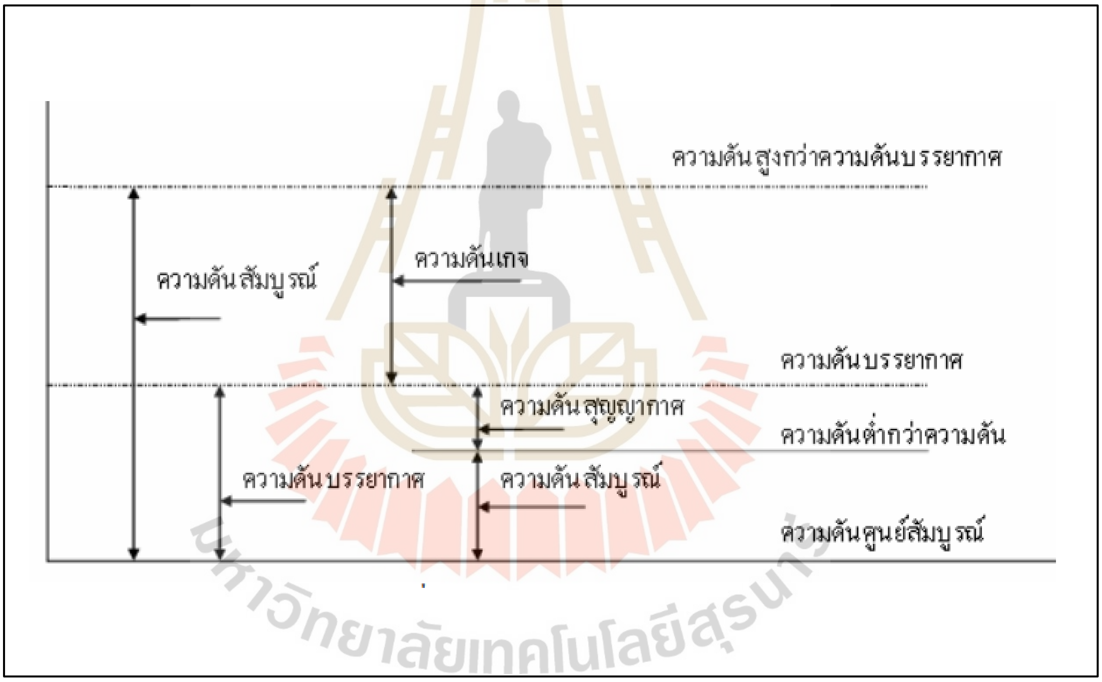
รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของข้าว โดย (A) ข้าวดิบ (B) ข้าวนึ่งที่ผ่านการทำแห้ง (C) ข้าวพอง

(Mir et al., 2016)

2.5 ความดัน (Pressure)

2.5.1 ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure, HP)

ความดัน (Pressure) คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่ต่อหน่วยพื้นที่ โดยมีหน่วย SI เป็น Pascal (Pa = 1 N/m^2) นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในหน่วยอื่น ๆ เช่น mm Hg, torr, psi, atm และ bar เป็นต้น โดยทั่วไปการวัดความดันจะถูกเปรียบเทียบกันระหว่างความดันค่าหนึ่งกับความดันที่ทราบค่าอยู่แล้วซึ่งนิยมใช้ค่าความดันบรรยากาศเพราะมีความเป็นมาตรฐานมากที่สุด ซึ่งความดันที่เปรียบเทียบความแตกต่างจากความดันบรรยากาศนี้ เรียกว่า ความดันเกจ (Guage pressure) และอีกกรณีเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความดันค่าหนึ่งกับความดันศูนย์สัมบูรณ์ โดยเรียกว่า ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) (กนต์ธร ชำนิประศาสน์, ม.ป.ป.) ดังแสดงใน รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของความดันแบบต่าง ๆ

โดยทั่วไปความดันมักจะเป็นแรงที่กระทำในของไหล (Fluid) หากเป็นของแข็งจะเรียกว่า ความเค้น (Stress) ซึ่งเมื่อของไหลหยุดนิ่ง ความดันที่อ่านจากเครื่องวัดเรียกว่า ความดันสถิตย์ (Static pressure) โดยความดันสถิตย์จุดใดจุดหนึ่งของของไหลที่หยุดนิ่ง จะมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะมีแรงกระทำในแนวใดก็ตาม ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าแรงที่กระทำทุกจุดมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะกระทำในทิศทางใดก็ตาม (กนต์ธร ชำนิประศาสน์, ม.ป.ป.) (รูปที่ 2.9 A) นอกจากนี้ ความดันที่กระทำโดยของ

ไหลที่หยุดนิ่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่ระดับความลึกหนึ่งโดยวัดจากผิวของไหลลงมา เรียกความดันนี้ว่า ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure, HP) (รูปที่ 2.9 B) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 และ 2.2

$$P_{HP} = P_0 + P_g \quad (2.1)$$

$$P_{HP} = P_0 + \rho gh \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{HP} คือ ความดันไฮโดรสแตติก

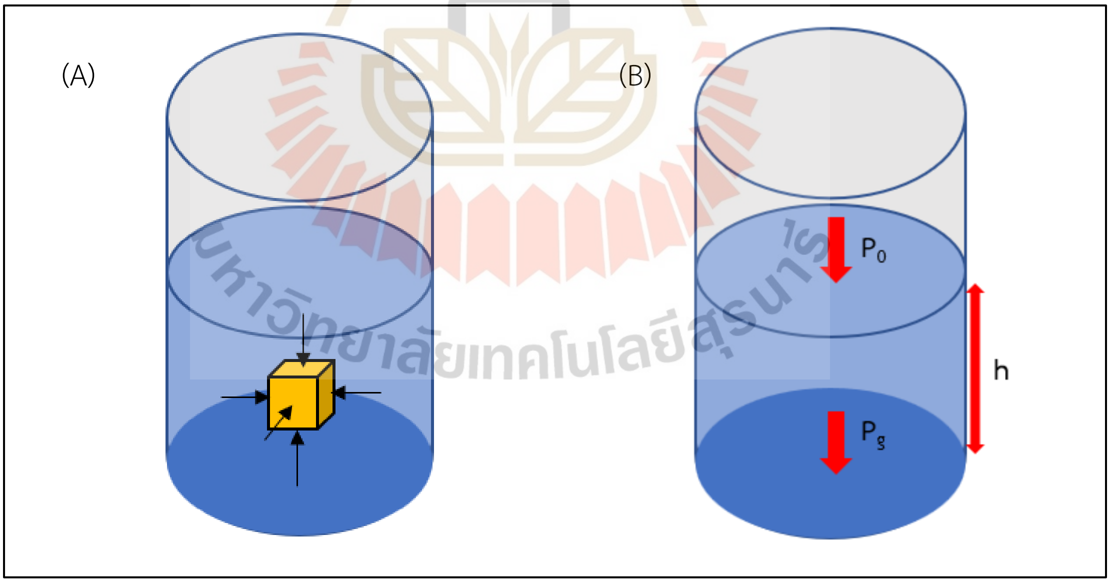
P_0 คือ ความดันเหนือผิวของไหล (เช่น ความดันบรรยากาศ)

P_g คือ ความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของไหล

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล หน่วย Kg/m^3

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง หน่วย m/s^2

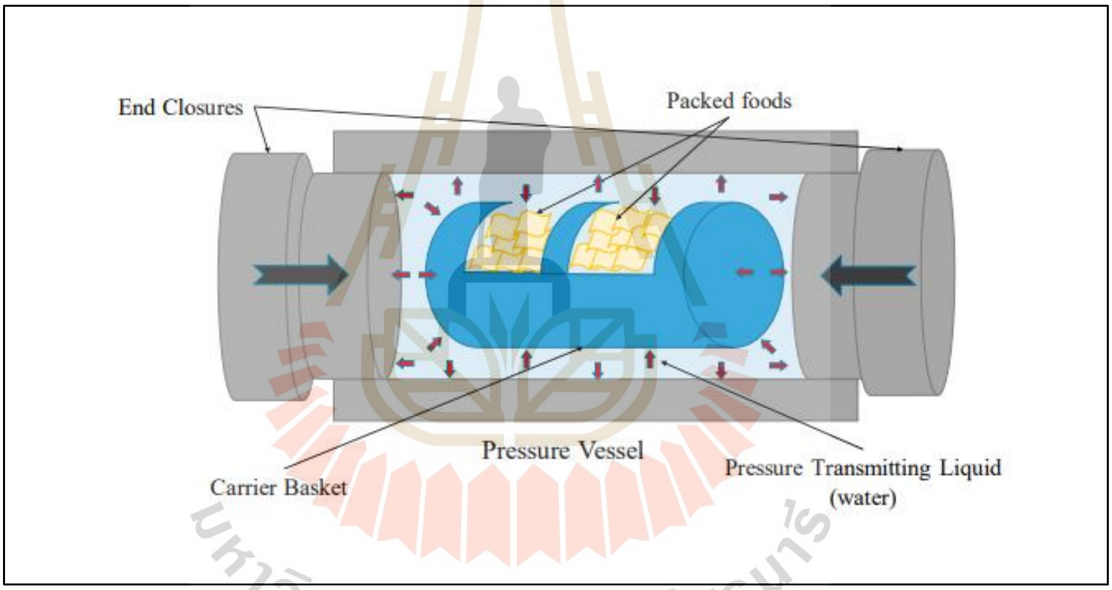
h คือ ระดับความลึก หน่วย m



รูปที่ 2.9 ความดันสถิตย์ โดย (A) แรงดันบนพื้นผิววัตถุจากทุกทิศทาง (B) แรงดันเหนือผิวของไหล (P_0) and ความดันที่เกิดจากน้ำหนักของของไหลที่ระดับความลึก h (P_g)

ซึ่งในงานวิจัยของ Farkas & Hoover (2000) ได้กล่าวว่าการให้ความดันภายในถังความดันจะทำให้ความดันทุกจุดเท่ากัน โดยไม่ขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และองค์ประกอบของอาหาร ซึ่งเป็นผลให้ช่วยลดเวลาในการแปรรูปอาหาร (Zimmermann & Bergman, 1993) และโดยทั่วไปจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการผ่านความดันให้กับอาหาร (Pressurizing medium) เพราะหาได้ง่าย สะดวกและปลอดภัยในการใช้กับอาหาร และปลอดภัยต่อถังความดันมากกว่าการใช้แก๊สที่เสี่ยงต่อการระเบิดเนื่องจากการเก็บพลังงานได้มากกว่าน้ำ (Earnshaw, 1996)

การใช้ความดันไฮโดรสแตติกสูง (High hydrostatic pressure, HHP) ร่วมกับการพัฒนาอาหารเป็นการนำอาหารมาอยู่ในสภาวะที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศมาก ๆ โดยอาหารจะถูกบรรจุในถุงสุญญากาศและวางในถังความดันดัง รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารด้วยความดันสูง

(Balakrishna, A. K., Wazed et al., 2020)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

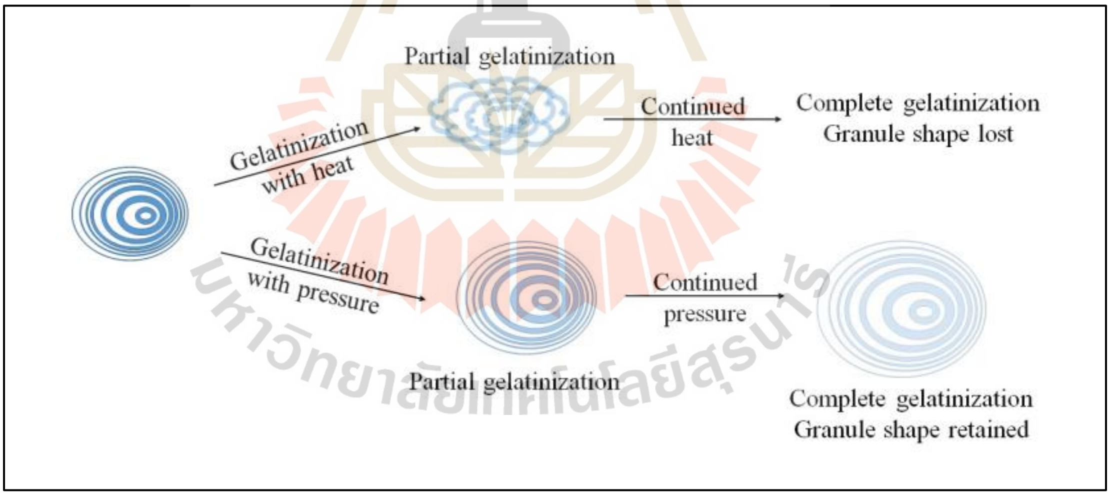
โดยการใช้ความดันสูงร่วมกับอาหารถูกใช้อย่างแพร่หลายในการยืดอายุการเก็บรักษาเนื่องจากความดันสูงไปยับยั้งการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ สปอร์ และ เอนไซม์ในอาหาร และการใช้ความดันสูงยังช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของอาหารได้อีกด้วย โดยมีงานวิจัยบอกว่าการใช้ความดันสูง อุณหภูมิต่ำส่งผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน ซึ่งจะไปเปลี่ยนสมบัติและเพิ่มคุณภาพของอาหาร เช่น ลักษณะของเนื้อสัมผัส สารอาหาร กลิ่นรส เป็นต้น (Balakrishna, A. K., Wazed et al., 2020) ซึ่ง

ในงานวิจัยของ Barbato & Scoma (2020) ได้จำแนกว่าความดันไฮโดรสแตติกที่น้อยกว่า 30 – 40 MPa เป็นความดันไฮโดรสแตติกระดับปานกลาง (Mild hydrostatic pressure)

2.5.2 การใช้ความดันสูงต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน

โดยสตาร์ชเป็นการรวมตัวกันของสายคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด คือ อะมิโลส และอะมิโลเพคติน เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเนื่องจากน้ำและความร้อน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า เจลาติไนเซชัน และเมื่อลดอุณหภูมิทำให้เกิดการคืนตัวเรียก รีโทรเกรเดชัน และการใช้ความดันสูงส่งผลให้สตาร์ชสามารถเกิดเจลาติไนเซชันได้ที่อุณหภูมิต่ำ

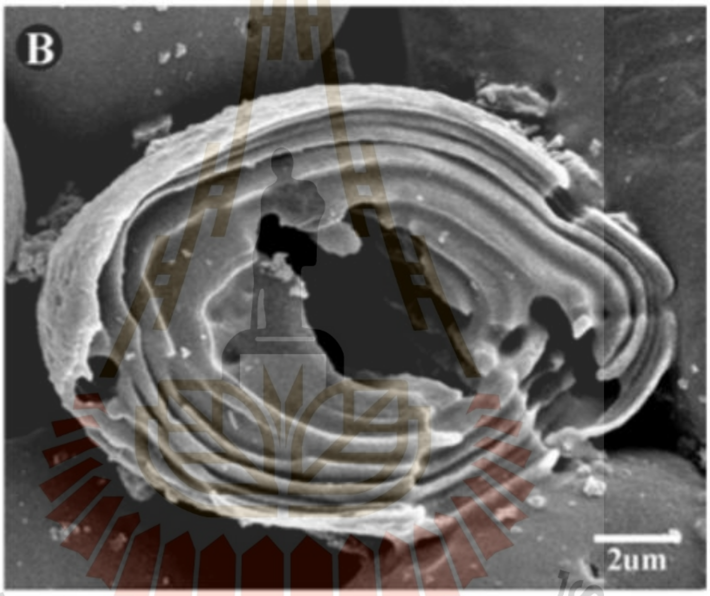
มีงานวิจัยใช้ความดันสูงเพื่อลดอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยการทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันระหว่างการใช้ความดันและการใช้ความร้อนส่งผลที่แตกต่างกัน โดยสตาร์ชที่ถูกให้ความร้อนผ่านน้ำร้อนจะทำให้เม็ดสตาร์ชขยายตัวและสูญเสียโครงสร้างวงแหวนรวมถึงความเป็นผลึก ส่วนการใช้ความดันจะช่วยรักษารูปร่างและโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชดังใน รูปที่ 2.11 และการใช้ความดันสูงส่งผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันที่เพิ่มมากขึ้น (Knorr et al., 2006; Teixeira, A. S. et al., 2018; Zhu, S. M. et al., 2016)



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบลักษณะเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการทำให้เกิดเจลาติไนเซชันด้วยความร้อนและความดัน

(Yamamoto et al., 2009)

ความดันมีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยสตาร์ชที่ผ่านของการใช้ความดันต่อการเกิดเจลาติไนเซชันได้รับการศึกษาอย่างมาก แม้ว่ากลไกของการเกิดเจลาติไนเซชันที่เกิดจากการใช้ความดันมีแนวโน้มที่จะแตกต่างจากการเกิดเจลาติไนเซชันด้วยความร้อนหรือทั้งความร้อนและความดัน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ปัจจัยที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสตาร์ชในกระบวนการผลิตอาหาร (Knorr et al., 2006) โดยสตาร์ชสามารถเปลี่ยนเป็นเจลโดยไม่สามารถย้อนกลับได้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชเมื่อถูกให้ความร้อนด้วยน้ำร้อน ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซับน้ำและบวมรวมถึงสูญเสียวงแหวน (Growth rings) รูปที่ 2.12



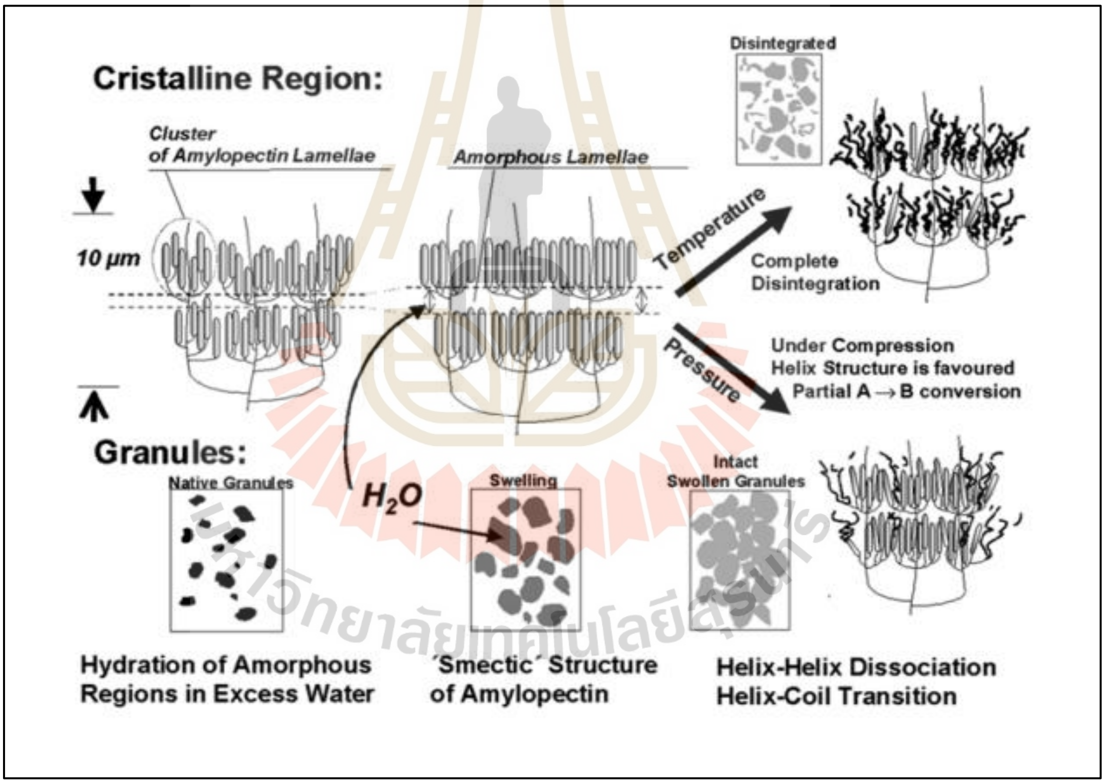
รูปที่ 2.12 ลักษณะภายในของเม็ดสตาร์ชที่สูญเสียวงแหวน

(Li, Vasanthan, Hoover, & Rossnagel, 2003)

งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการดูดน้ำและเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช (มันฝรั่ง) อย่างสมบูรณ์ จำเป็นต้องมีโมเลกุลของน้ำมากกว่า 14 ตัวต่อหนึ่งหน่วยกลูโคส (Donovan, 1979) เมื่อเก็บสตาร์ชที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชันไว้ในตู้เย็น จะเกิดผลึกใหม่และเนื้อสัมผัสที่แข็ง ปรากฏการณ์ที่สตาร์ชเกิดการแข็งตัวนี้เรียกว่า รีโทรเกรเดชัน (Hoover, 1995) โดยสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนเซชันด้วยความร้อนจะมีความไวต่อเอนไซม์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถย่อยสลายได้สูงโดยอะไมเลส ในขณะที่

สตาร์ชที่ผ่านการเกิดเจลาติไนเซชันด้วยความร้อนและผ่านการปรับสภาพแล้วจะทนทานต่อการย่อยของอะไมเลส

ในทางกลับกัน เจลสตาร์ชเกิดขึ้นได้เมื่อผสมสตาร์ชและน้ำด้วยความดัน ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าเจลาติไนเซชัน และการเกิดเจลาติไนเซชันด้วยความดันทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถบวมได้ในขณะที่ยังคงรักษารูปร่างของเม็ดและโครงสร้างแผ่น (Stute et al., 1996; Stolt et al., 2001; Fukami et al., 2010) ในงานวิจัยของ Knorr et al. (2006) เสนอว่าภายใต้ความดัน ทำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความคงตัวต่อความดันของพันธะไฮโดรเจนช่วยให้เกิดโครงสร้างเกลียว (รูปที่ 2.13) ซึ่งมีรายงานการเปลี่ยนแปลงผลึกจากไอโซมอร์ฟ A เป็น B ภายใต้ความดัน (Katopo et al., 2002)

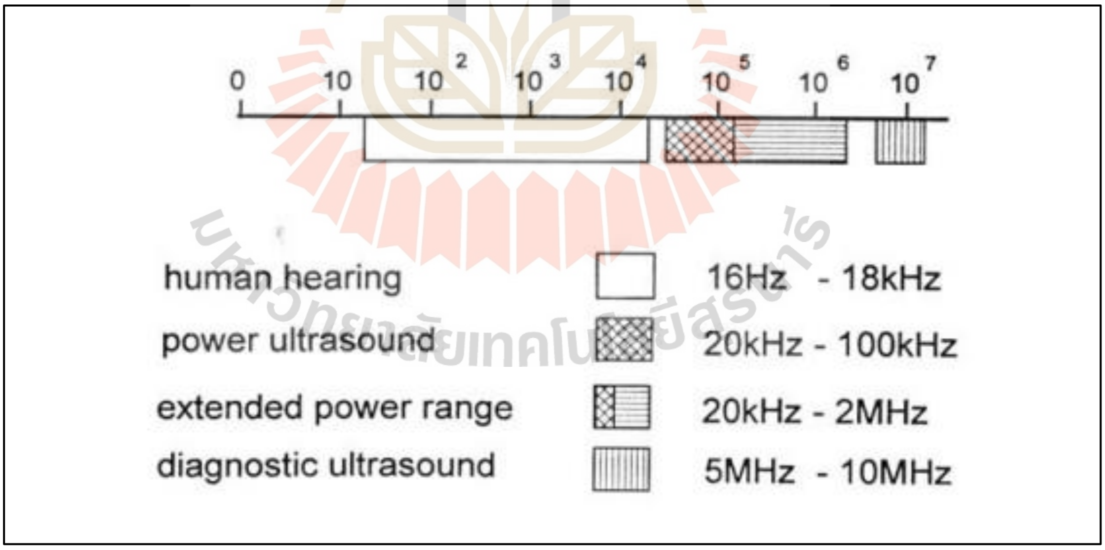


รูปที่ 2.13 การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ชภายใต้ความดันและความร้อนสูง (Knorr et al., 2006)

2.6 คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic waves)

คลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic waves) หรือคลื่นเสียงความถี่สูง หมายถึงพลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นใน 1 s ประมาณ 20,000 ครั้ง หรือสูงกว่านั้น (Hoover, 2000) หรือหมายถึงคลื่นความดัน (Pressure waves) ที่มีความถี่ (Frequency) สูงกว่าคลื่นเสียงปกติ (สูงกว่า 20,000 Hz) ซึ่งอยู่ในช่วงของความถี่ที่มนุษย์ไม่สามรถได้ยิน โดยทั่วไปแล้วคลื่นเสียง (Sound) ที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้นเกิดจากการสั่นสะเทือนของตัวกลางยืดหยุ่น (Elastic medium) ซึ่งมีช่วงความถี่ 20 – 20,000 Hz โดยคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางยืดหยุ่น ในลักษณะเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal waves) แต่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านภายในวัตถุแข็งอาจจะอยู่ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง (Transverse waves)

การนำคลื่นเสียงมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหรือกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ การใช้คลื่นเสียงกำลังต่ำและความถี่สูง (Low power and high frequencies) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ (Diagnostic ultrasound) และการใช้คลื่นเสียงกำลังสูงความถี่ต่ำ (High power and low frequencies) หรือที่เรียกว่า พาวเวอร์อัลตราซาวด์ (Power ultrasound) (รูปที่ 2.14) ที่มักนำมาประยุกใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร (Mason, 2005)



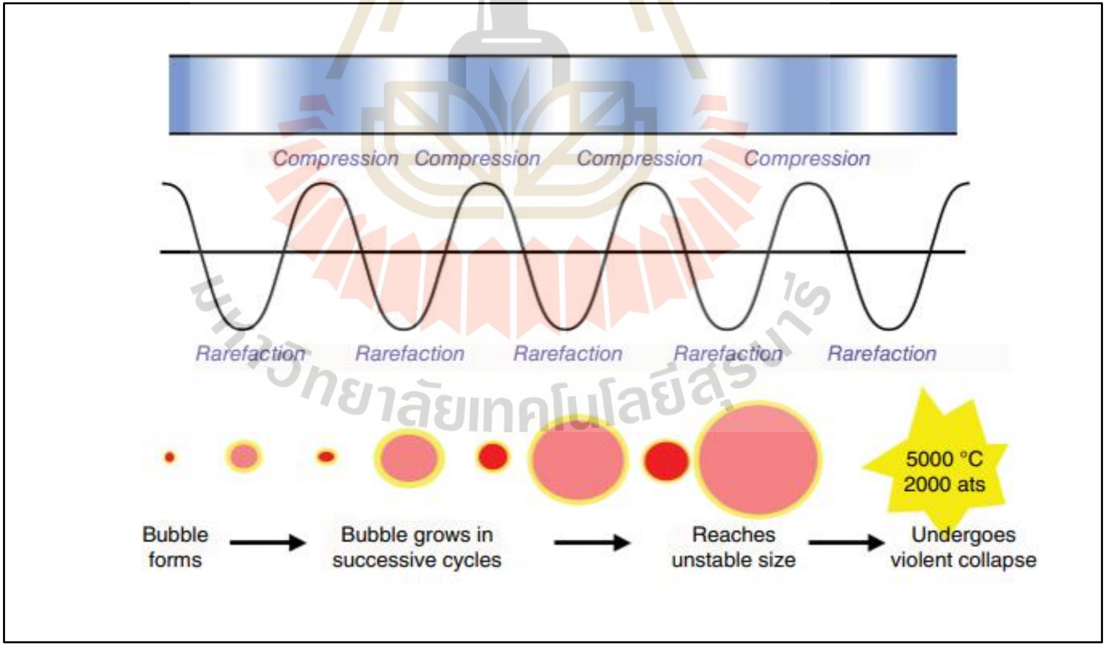
รูปที่ 2.14 ช่วงความถี่ของคลื่นเสียง

(Mason, 2005)

การใช้พาวเวอร์อัลตร้าซาวน์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทำให้เกิดผลต่อสมบัติทางกลและทางเคมีของอาหารเนื่องจากคลื่นดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ แคปวิเตชัน (Cavitation) และส่วนมากใช้คลื่นในช่วงความถี่ 20 – 40 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์อัลตร้าซาวน์ทั่วไปที่ใช้ในการทำความสะอาด การทำให้เซลล์แตก และในการขึ้นรูปพลาสติก เป็นต้น

2.6.1 ปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (Cavitation)

ปรากฏการณ์แคปวิเตชัน หมายถึง กระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือสารละลายที่ได้รับคลื่นเสียงความถี่สูง โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางกายภาพ (จากแรงทางกล) เนื่องมาจากฟองอากาศ (Bubbles) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นเสียงความถี่สูงจะถูกบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Stretch) ซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบทำให้เกิดฟองอากาศขึ้น และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นระยะและเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน (Atchley and Crum, 1998) เป็นผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งแตกออกในที่สุดดัง รูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดและสลายฟองอากาศจำนวนมากอย่างรวดเร็วจากปรากฏการณ์แคปวิเตชัน

2.6.2 การใช้คลื่นอัลตราโซนิก

จากการศึกษาของ Zhang et al. (2008) ที่เกี่ยวกับการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วยในการสกัด ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มปริมาณของผลผลิตจากการสกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชันและผลทางกล โดยปรากฏการณ์แคปวิเตชันจะสามารถทำลายเซลล์ผนังของพืชและช่วยให้สารละลายสามารถทะลุผ่านเข้าไปในตัววัสดุพืชและทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการภายในเซลล์ถูกปล่อยออกมา และผลทางกลเนื่องมาจากการใช้คลื่นอัลตราโซนิกอาจทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดซึ่งจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวทำละลายกับสารที่ต้องการสกัดโดยทำให้เพิ่มการทะลุของตัวทำละลายเข้าไปในวัสดุ โดยประโยชน์ของการใช้คลื่นความถี่สูง ได้แก่ ลดเวลาการสกัด ลดตัวทำละลาย สามารถสกัดที่อุณหภูมต่ำซึ่งลดการทำลายของสารสำคัญในตัวอย่าง

จากการศึกษาของ Zimare et al. (2021) กล่าวว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิกอาจเป็นเหตุทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อของพืช และอาจลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของฟีนอลิก และฟราโวนอยด์ ซึ่งอาจหมายถึงช่วยเพิ่มสารต้านอนุมูลอิสระด้วย และจากการศึกษาของ Phan et al. (2019) กล่าวว่าการใช้คลื่นอัลตราโซนิกที่กำลังสูงและนาน และการใช้ระยะเวลาในการเตรียมด้วยความร้อนนาน ยิ่งทำให้ประสิทธิภาพของสารที่ต้องการสกัดลดลง จากการศึกษาของ Sharma (2012) มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมในการทำข้าวพอง ซึ่งคลื่นอัลตราโซนิกจะช่วยให้ข้าวเกาะติดกันเป็นแผ่นและยังช่วยลดเชื้อราของข้าวพอง

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ (Materials)

ข้าวกล้องงอก

ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. cv.) (Khao Dok Mali 105, KDML105) ได้รับมาจากอำเภอโนนสูง จังหวัดนครราชสีมา โดยข้าวเปลือกได้ผ่านการทำแห้งด้วยการตากแดดจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายระหว่าง 12 – 14% wet basis (w.b.) โดยใช้เครื่องวัดความชื้น (SB900, Steinlite Corporation, Atchison, Kansas, USA) จากนั้นบรรจุข้าวเปลือกในถุงสุญญากาศและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อรอนำไปเพาะงอกข้าวเปลือกในขั้นตอนต่อไป วิธีการเพาะงอกข้าวเปลือกอ้างอิงจาก Chatchavanthatri et al. (2021) โดยนำข้าวเปลือกมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำเปล่า และฆ่าเชื้อด้วยการแช่สารละลาย 0.1% โซเดียมไฮโปคลอไรต์ นาน 10 min แล้วล้างน้ำเปล่าอีก 3 ครั้ง แล้วนำมาแช่ในน้ำสะอาด (soaking) เป็นเวลา 24 h จากนั้นนำข้าวที่แช่มาเพาะงอก (germinating) โดยใช้กระสอบป่านคลุมและพรมน้ำทุก ๆ 2 – 3 h เพื่อช่วยให้ความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการเพาะงอกมีค่าประมาณ 80 – 85% โดยระยะเวลาการเพาะงอกข้าวนาน 48 h ซึ่งทำให้ได้ข้าวเปลือกงอกที่มีรากยาวระหว่าง 0.1 – 0.5 cm เมื่อได้ข้าวเปลือกงอกแล้วนำไปทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดจนกว่าจะได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 12 – 14% และนำไปกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่อง Rice dehuller (NW 150, Natrawee, Thailand) เพื่อให้ได้ข้าวกล้องงอก (รูปที่ 3.1) ซึ่งจะบรรจุในถุงสุญญากาศและเก็บรักษาที่ -20°C ก่อนนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาสารต้านอนุมูลอิสระและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดได้แก่ DPPH (2,2’-diphenyl-1-picrylhydrazyl), ABTS (2,2′-azino-bis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid), Trolox (6-hydroxyl-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid), gallic acid, และ Folin–Ciocalteu reagent จาก Sigma-Aldrich สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์หา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปริมาณเกลือได้แก่ Silver nitrate ($AgNO_3$), Potassium chromate (K_2CrO_4) ชุดหาปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch) วิเคราะห์โดยใช้ชุดทดสอบ Resistant starch assay kit (Megazyme International, Wicklow, Ireland) และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber) วิเคราะห์โดยใช้ชุดทดสอบ Total dietary fiber assay kit (Megazyme International, Wicklow, Ireland)

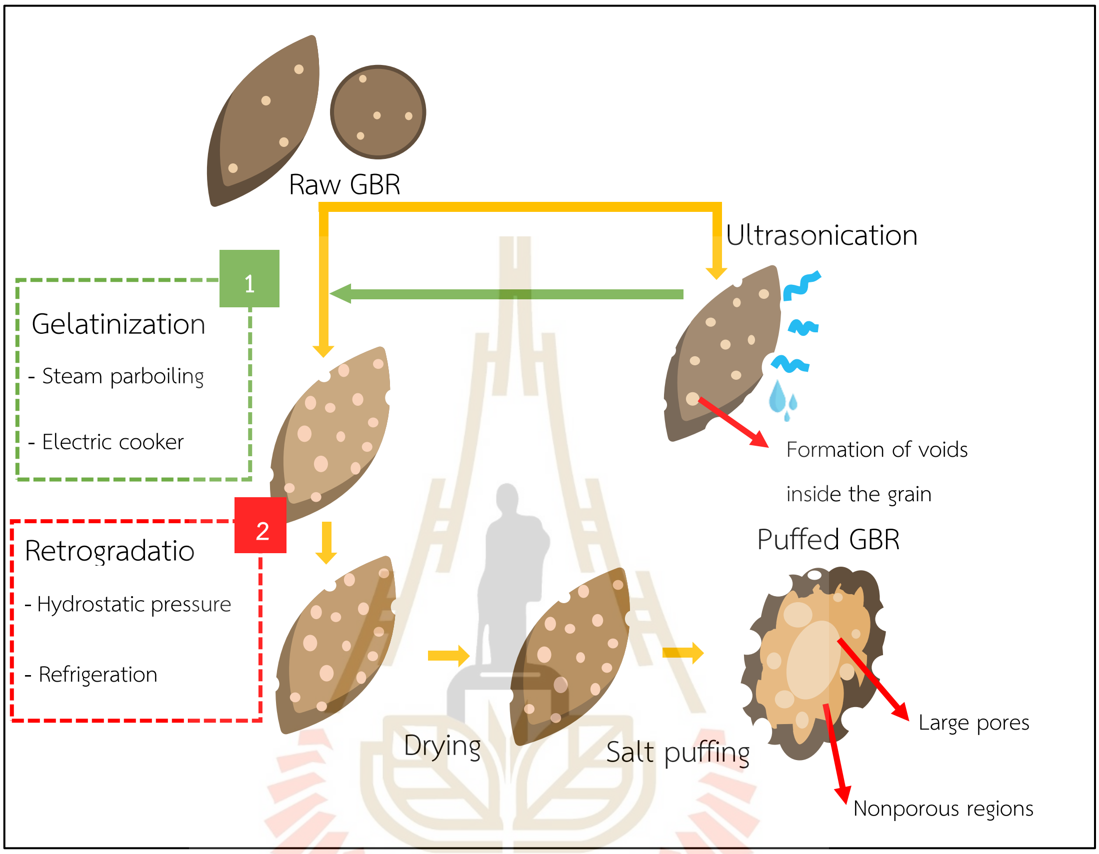
รูปที่ 3.1 ข้าวกล้องงอก (GBR) สำหรับงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 การเตรียมตัวอย่าง (Sample preparation)

การผลิตข้าวกล้องงอกพองสามารถแบ่งออกขั้นตอนออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง (Rice preparation) และการทำพอง (Puffing) ซึ่งทั้ง 2 ขั้นตอนนี้มีผลต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการพองในขั้นตอนการเตรียมข้าวนั้น เช่น การทำให้ข้าวกล้องงอกเกิดเจลาติไนเซชันสมบูรณ์ การเกิดรีโทรเกรเดชัน และปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกก่อนการทำให้พอง เป็นต้น สำหรับขั้นตอนการทำพองนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการอัตราการพอง เช่น วิธีการทำพอง อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการทำพอง เป็นต้น สำหรับการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง โดยแบ่งวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าว

กล้องงอกพอง และ (2) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการผลิตและปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง

ในการศึกษานี้ได้แบ่งวิธีการหุงข้าวกล้องงอกออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การนึ่งข้าว (Rice steaming) และการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (Electric rice cooking) โดยมีการทำ Pretreatment ข้าวกล้องงอกก่อนการหุงด้วยวิธีการต้ม (Boiling) การแช่ (Soaking) และการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasound assisted pretreatment) โดยสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 6 วิธีดังต่อไปนี้

1. การต้มข้าวกล้องงอกในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 min โดยใช้อัตราส่วนระหว่างข้าวกับน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 5 จากนั้นแยกน้ำออกแล้วนำไปนึ่งด้วยไอน้ำเดือดจนกระทั่งข้าวกล้องงอกสุก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 ± 5 min (Parboiled steamed rice, PS)

2. การทำ Pretreatment โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกด้วยอ่างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath, Bandelin, DT514BH, Berlin, Germany) ที่ความถี่ 35 kHz อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 min จากนั้นนำข้าวกล้องงอกไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 min โดยใช้อัตราส่วนระหว่างข้าวกับน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 5 จากนั้นแยกน้ำออกแล้วนำไปนึ่งด้วยไอน้ำเดือดจนกระทั่งข้าวกล้องงอกสุก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 ± 5 min (Ultrasound assisted parboiled steamed rice, UPS)
3. การแช่ข้าวกล้องงอกในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 60 min จากนั้นนำไปนึ่งด้วยไอน้ำเดือดจนกระทั่งข้าวกล้องงอกสุก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 70 ± 5 min (Soaked steamed rice, SS)
4. การทำ Pretreatment โดยใช้คลื่นคลื่นอัลตราโซนิก ที่ความถี่ 35 kHz ที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 min จากนั้นนำข้าวกล้องงอกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 60 min แล้วนำไปนึ่งด้วยไอน้ำเดือดจนกระทั่งข้าวกล้องงอกสุก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 70 ± 5 min (Ultrasound assisted soaked steamed rice, USS)
5. การหุงข้าวกล้องงอกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า (TOSHIBA, RC-5MM) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างข้าวกับน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 1.3 เป็นเวลา 40 min (Electric cooked rice, EC)
6. การทำ Pretreatment โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ที่ความถี่ 35 kHz อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 min จากนั้นนำไปหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้า โดยใช้อัตราส่วนระหว่างข้าวกับน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 1.3 เป็นเวลา 40 min (Ultrasound assisted electric cooked rice, UEC)

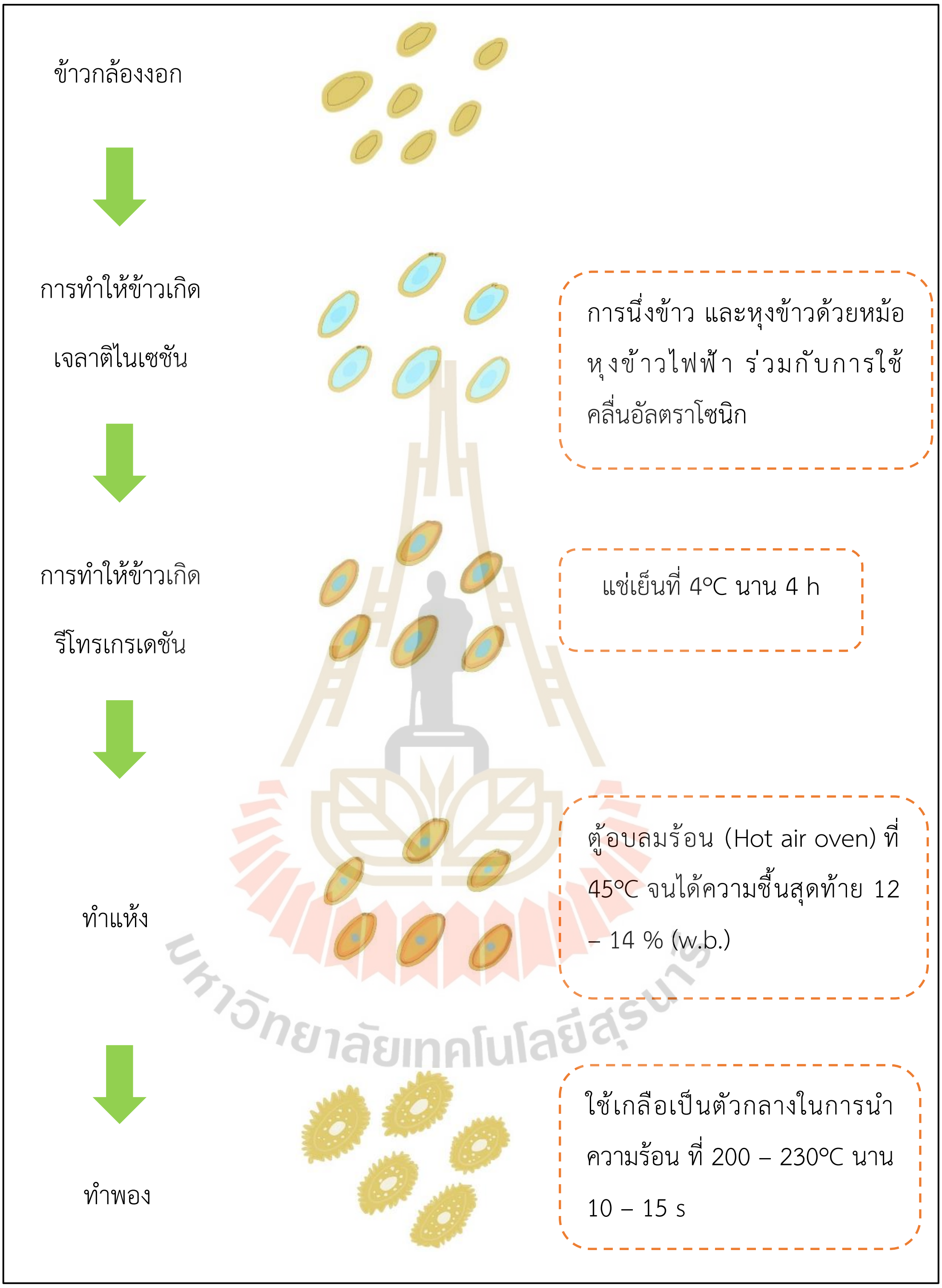
ตารางที่ 3.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง

NO.	Treatment	Ultrasound	Parboiled	Soaked	Steamed	Electric cooked
1	PS		/		/	
2	UPS	/	/		/	
3	SS			/	/	
4	USS	/		/	/	
5	EC					/
6	UEC	/				/

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หลังจากหุงข้าวกล้องงอกด้วยวิธีต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ข้าวกล้องงอกสุกถูกนำมาทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 4 h จากนั้นนำข้าวกล้องงอกสุกไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven, Memmert, UF110, GmbH Co. KG, Schwabach, Germany) อุณหภูมิ 45°C จนกว่าจะได้ความชื้นของข้าวประมาณ 10 – 14% (w.b.) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้งจะถูกนำไปทำพอง (Puffing) ครั้งละ 100 g โดยใช้แก๊ส LPG และใช้เกลือเป็นตัวกลางในการนำความร้อน ซึ่งอุณหภูมิในการทำพองอยู่ระหว่าง 200 – 230°C นาน 10 – 15 s (รูปที่ 3.3) จากนั้นแยกข้าวกล้องงอกพองออกมา ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนบรรจุในถุงปิดสนิทแล้วเก็บรักษาในโถดูดความชื้นเพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.3 วิธีการเตรียมและการทำพองข้าวกล้องงอกพอง

3.2.2 การศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง

ในการศึกษานี้ได้เลือกวิธีการหุงข้าวกล้องงอกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเป็นเวลา 40 min (Electric cooked rice, EC) จากหัวข้อ 3.2.1 โดยได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (รูปที่ 3.4) และระยะเวลาในการทำให้ข้าวกล้องงอกสุกเกิดการรีโทรเกรเดชันต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง(รูปที่ 3.5) จากการทดลองได้แบ่งข้าวกล้องงอกสุกออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 นำข้าวกล้องงอกสุกไปแช่เย็นที่ 4°C (ไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก) เป็นเวลา 0, 4, 24, และ 48 h ก่อนนำไปทำแห้ง ส่วนที่ 2 นำข้าวกล้องงอกสุกไปผ่านความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars เป็นเวลา 2 และ 4 h ที่อุณหภูมิ 30°C แล้วนำไปแช่เย็นที่ 4°C เป็นเวลา 0, 4, 24, และ 48 h ก่อนนำไปทำแห้ง และส่วนที่ 3 นำข้าวกล้องงอกสุกไปผ่านความดันไฮโดรสแตติกที่ 4 bars เป็นเวลา 2 และ 4 h ที่อุณหภูมิ 30°C แล้วนำไปแช่เย็นที่ 4°C เป็นเวลา 0, 4, 24, และ 48 h ก่อนนำไปทำแห้ง ซึ่งสามารถสรุปการออกแบบการทดลองได้ใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง

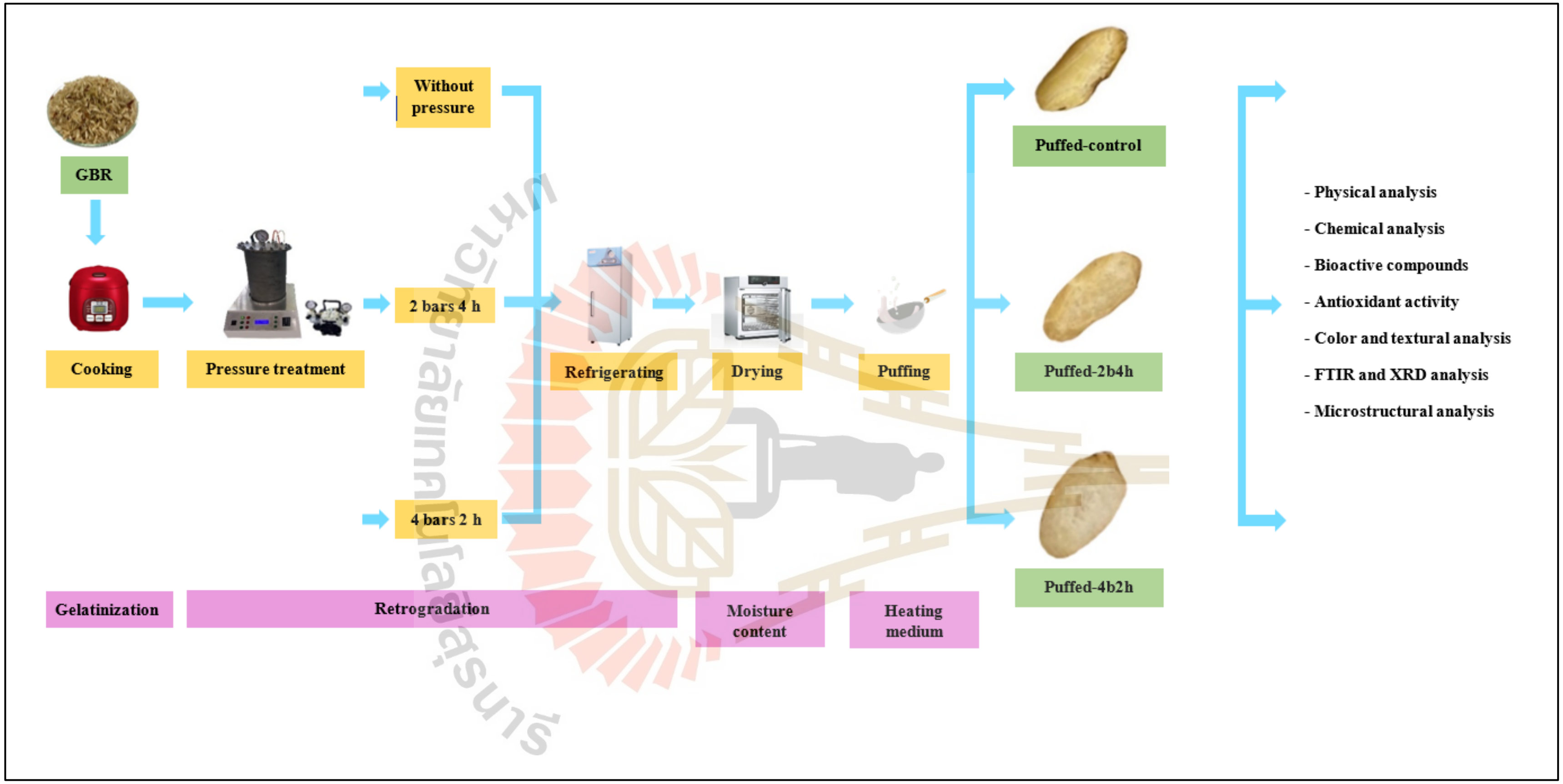
Retrogradation at 4°C for (h)	Non pressure treatment	Pressure at 2 bars		Pressure at 4 bars	
		2 h	4 h	2 h	4 h
0					
4					
24					
48					

จากนั้นนำข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันและการเกิดรีโทรเกรเดชันไปทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven, Memmert, UF110, GmbH Co. KG, Schwabach, Germany) อุณหภูมิ 45°C จนกว่าจะได้ความชื้นของข้าวประมาณ 10 – 14% (w.b.) ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการทำแห้ง (Pretreated GBR) จะถูกนำไปทำพอง (Puffing) ครั้งละ 100 g โดยใช้แก๊ส LPG และใช้เกลือเป็นตัวกลางในการนำความร้อน อุณหภูมิในการทำพองอยู่ระหว่าง 200 – 230°C นาน 10 – 15 s จากนั้นแยกข้าวกล้องงอกพองออกจากเกลือ ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนบรรจุในถุงปิดสนิทแล้วเก็บรักษาในโถดูดความชื้นเพื่อรอการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.4 ชุดถังความดันไฮโดรสแตติกสำหรับงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.5 การศึกษาผลของความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพ

3.3.1 สมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content) โดยการชั่งตัวอย่างครั้งละ 3 g แล้วนำไปวิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น (Moisture analyzer, OHAUS, MB-25, OHAUS Instruments Co., Ltd., Shanghai, China) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (รูปที่ 3.6)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) โดยชั่งตัวอย่างครั้งละ 1 g แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter, AquaLab Pre, METER Group, Inc, WA, USA) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (รูปที่ 3.7)

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Ash content) โดยนำข้าวกล้องงอกพองมาผ่านการบดลดขนาด แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ สามารถวิเคราะห์โดยใช้วิธีการหาโซเดียมคลอไรด์ในอาหารโดยตรงด้วยวิธีของ National Food Safety Standard โดยดัดแปลงจากงานวิจัยของ Xu et al. (2017) เริ่มจากการชั่งตัวอย่างข้าวกล้องงอกพอง 5 g ลงในถ้วยกระเบื้อง (Crucible cup) และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550ºC เป็นเวลา 48 h ด้วยเตาเผา (Furnace, Carbolite, CWF, Carbolite Gero Ltd., England) โดยวัดความชื้นก่อนและหลังเผาเพื่อวิเคราะห์หาเถ้า จากนั้นนำเถ้าละลายในน้ำ DI (Distilled water) 10 ml จากนั้นดูดสารลายเถ้าตัวอย่างไปใส่ขวดลูกชมพู่ด้วยปิเปต แล้วเติมสารละลาย 5% โพแทสเซียมโครเมต (K_2CrO_4) จำนวน 1 ml และผสมให้เข้ากัน จากนั้นทำการไทเทรตด้วย 0.1 M ซิลเวอร์ไนเทรต ($AgNO_3$) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีส้มอิฐ โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ความชื้นของข้าวกล้องงอกพอง

รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระของข้าวกล้องงอกพอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.2 สมบัติทางกายภาพ

ปริมาตรรวมของข้าวพองวัดโดยใช้กระบอกตวงปริมาตร (Graduated cylinder) ขนาด 100 ml (รูปที่ 3.8) โดยหาค่า ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) ปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) การขยายปริมาตร (Volume expansion) อัตราการพองตัว (Expansion ratio) และความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) (Maisont & Narkrugsa, 2009) สามารถคำนวณด้วยสมการ 1 - 5 ดังนี้

$$\text{Total yield (\%)} = \frac{\text{weight of puffed rice (g)}}{\text{weight of paddy rice (g)}} \qquad (1)$$

$$\text{Puffed yield (\%)} = \frac{\text{weight of puffed rice (g)}}{\text{weight of dried rice (g)}} \qquad (2)$$

$$\text{Volume expansion} = \frac{\text{volume of puffed rice (ml)}}{\text{weight of dried rice (g)}} \qquad (3)$$

$$\text{Expansion ratio} = \frac{\text{volume of puffed rice (ml)}}{\text{volume of dried rice (ml)}} \qquad (4)$$

$$\text{Bulk density (g/ml)} = \frac{\text{weight of puffed rice (g)}}{\text{volume of dried rice (ml)}} \qquad (5)$$

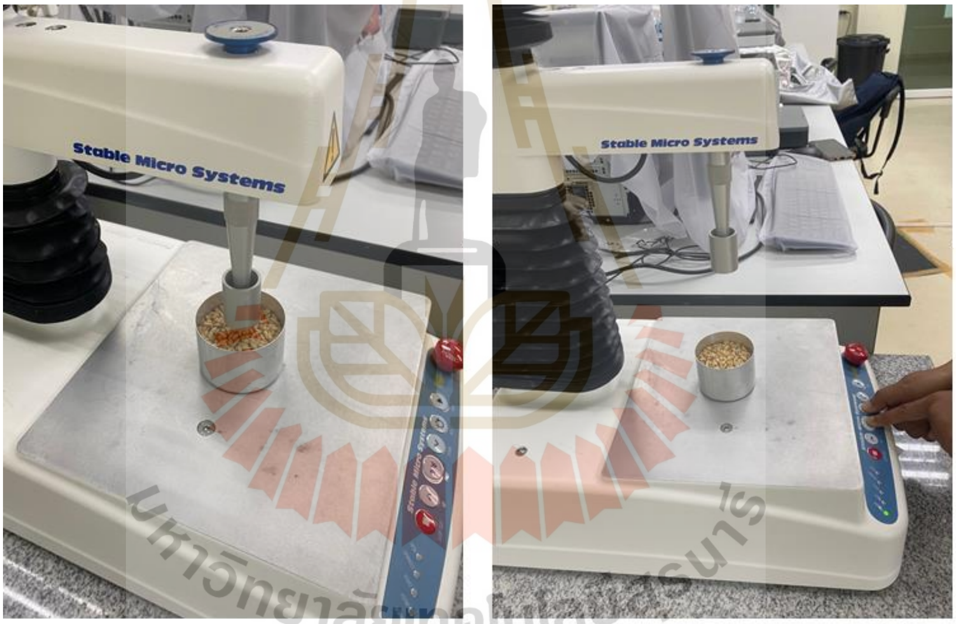
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.8 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง

การวิเคราะห์ค่าสีของข้าวกล้องงอกพองด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter, HunterLab, MiniScan EZ 4500L, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) ในระบบ L* a* b* โดยค่า L* หมายถึงค่าความสว่าง (Lightness) ค่า a* หมายถึงค่าความเป็นสีแดง (Redness) และค่า b* หมายถึงค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 6 ซ้ำ (รูปที่ 3.9)

รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพองด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XTPlus, texture technologies corp. and stable micro systems, ltd., MA, USA) ตัวเครื่องต่อกับหัววัดชนิดอลูมิเนียม Cylinder probe P/25 ในการวิเคราะห์ได้นำข้าวกล้องงอกพองปริมาณ 30 g ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm และความสูง 4 cm แล้วเคาะ 5 ครั้งก่อนนำไปวิเคราะห์ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แก่ Pre-test, Test, and Post-test speed เท่ากับ 1, 2 และ 10 mm/s ตามลำดับ ระยะการบีบอัด (Compression distance) ที่ 20% strain โดยวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความกรอบ (Crispness) ด้วย Texture Exponent Software (version 7.0.6.0, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 6 ซ้ำ (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง

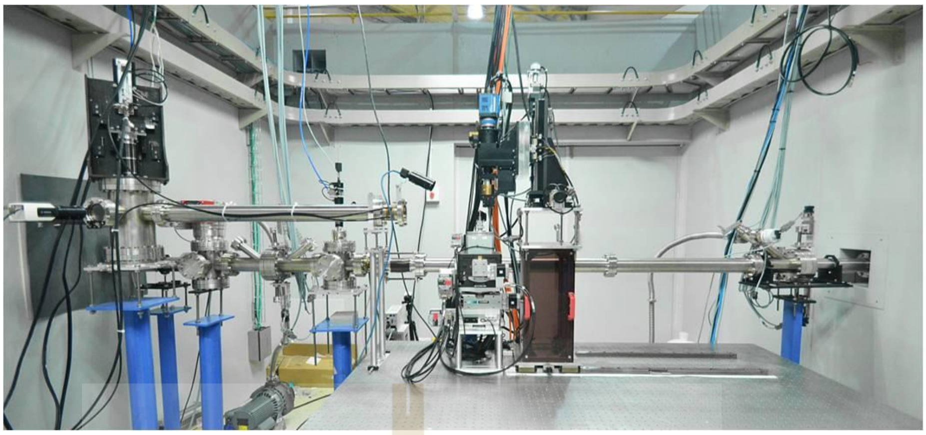
การวัดอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) ของเมล็ดข้าวกล้องงอกพอง โดยสุ่มนำเมล็ดข้าวกล้องงอกแต่ละชนิด ได้แก่ ข้าวกล้องงอก (GBR) ข้าวกล้องงอกผ่านการทำให้สุกและทำแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) มาวัดความยาวและความกว้างโดยใช้ Vernier caliper ตัวอย่างละ 30 ซ้ำ (Mir et al., 2016) (รูปที่ 3.11)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.11 การวิเคราะห์อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของข้าวกล้องงอกพอง

3.4 การถ่ายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของข้าวกล้องงอกพอง (Synchrotron-radiation-based X-ray tomographic microscopy, SR-XTM)

การศึกษาโครงสร้างทางระดับจุลภาคของเมล็ดข้าวกล้องงอกพองโดยใช้เทคนิคการภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ด้วยแสงซินโครตรอน (Synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy, SR-XTM) ที่ Beamline 1.2W ซึ่งใช้พลังงาน 1.2 GeV, 150 mA และเพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนไหวของวัสดุในขณะวัด วัสดุจะถูกยึดด้วยเทปหรือกาวบนแท่น และในกรณีนี้ใช้ฟอยล์อลูมิเนียม หนา 350 ไมครอนในการลดพลังงานให้เหลือ 11.5 KeV และใช้ sCMOs camera (pco. edge 5.5, 2560 × 2160 pixels, 16 bits) ในการเก็บภาพรังสี ตั้งแต่มุม 0 – 180° โดยมุมเพิ่มขึ้นทีละ 0.1° และการทำข้อมูล Background normalization และ CT reconstruction จัดการโดยใช้ Octopus Reconstruction software (TESCAN, Gent, Belgium) และการทำ 3D tomographic reconstruction จัดการโดยใช้ Drishti software (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 แสดงการถ่ายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของข้าวกล้องงอกพอง

3.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกพองโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

เตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) มาบดละเอียดและวางบน IR microscope (Bruker Hyperion 2000) ซึ่งเชื่อมต่อกับ Vertex 70 FTIR spectrometer (Bruker Optics, Ettlingen, Germany) ซึ่งตั้งอยู่ที่ Infrared Spectroscopy and Imaging Beamline (BL4.1) (Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Thailand) แล้วควบคุมและเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม OPUS 7.2 software ที่ความยาวคลื่น 4000 – 800 cm^{-1}, Spectral resolution 4 cm^{-1} และจำนวนสแกน 64 รอบ/ครั้ง โดยอ้างอิงกับอากาศ โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (รูปที่ 3.13)

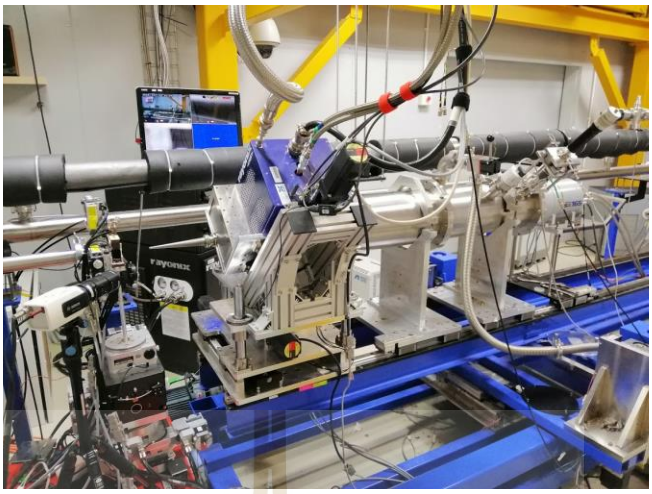
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.13 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกพองโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

3.6 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกสุกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering (WAXS)

เตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันและการแช่เย็น (Cook GBR) โดยถูกกดใส่แผ่นใส่ตัวอย่างแล้วมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ซึ่งใช้พลังงานแสง X-ray (9 keV) เป็นเวลา 5 min และเก็บข้อมูลที่ 2θ ในช่วง 3 – 35° (WAXS โดยคำนวณมุมเปรียบเทียบกับ X-ray จาก Cu-k alpha ซึ่งตัวอย่างถูกรักษาอุณหภูมิคงที่ 5°C ในขณะทำการวัด โดยค่าความเป็นผลึก (Crystallinity) ถูกคิดจากอัตราส่วนของพื้นที่ใต้พีคที่เป็นผลึก (Relative area of crystalline peaks) ต่อพื้นที่ใต้พีคทั้งหมด (Total area) โดยใช้โปรแกรม SAXSIT (Small Angle X-ray Scattering Image Tool) ที่ถูกพัฒนาโดยสถาบันวิจัยแสงซินโคร- ตรอน (BL1.3W: WAXS, Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Thailand) (รูปที่ 3.14)

$$\text{Total crystallinity (\%)} = \frac{\text{Area of crystalline peaks}}{\text{Area of amorphous peak} + \text{Area of crystalline peaks}} \text{ x } 100$$



รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกสุกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering (WAXS)

3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เตรียมตัวอย่างข้าวกล้องงอกพองทั้งเต็มเมล็ด ครึ่งเมล็ดตามภาคตัดขวาง และบดละเอียด โดยตัวอย่างถูกเคลือบด้วยทองก่อนนำมาวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยเครื่อง Field emission scanning electron microscope (FE-SEM, Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) ที่ระดับพลังงาน 10 kV ที่ขนาดกำลังขยายภาพ 17, 25 และ 1500 เท่า ตามลำดับ (รูปที่ 3.15)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อีมิสชัน

3.8 การวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds)

3.8.1 ปริมาณสารกาบา (GABA)

นำข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกพองแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการบดลดขนาด (<0.2 mm) มาวิเคราะห์ปริมาณสารกาบาด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC 1290, Agilent Technology, Santa Clara, USA) ตามวิธีของ Chatchavanthatri et al. (2021)

3.8.2 การวิเคราะห์สารแกมมา-โอรีซานอล (Gamma-oryzanol)

นำข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกพองแต่ละตัวอย่าง ที่ผ่านการสกัดแล้วมาวิเคราะห์ปริมาณแกมมา-โอรีซานอล โดยดัดแปลงจากวิธีของ Zullaikah et al. (2009) และ Joshi et al. (2016)

3.8.3 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic compound analysis)

การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) โดยใช้วิธีการ Folin-Ciocalteau method (Chatchavanthatri et al., 2021) เริ่มจากนำตัวอย่างที่สกัดด้วยเมทานอลจำนวน 0.25 ml มาผสมให้เข้ากับ Folin-Ciocalteau reagent จำนวน 0.25 ml แล้วบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 6 min จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 7.5% (w/v) จำนวน 2.5 ml แล้ว

ผสมสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นห่อด้วย Aluminum foil หรือเก็บในที่มืดทึบแสงเพื่อทำการบ่มเป็นเวลา 30 min แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 nm ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในหน่วย มิลลิกรัมของแกลลิกสมมูลย์ต่อกรัมของตัวอย่างแห้ง (mg GAE/g) ทำซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละตัวอย่าง

3.8.4 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีดีพีพีเอช (DPPH radical scavenging activity assay)

การวิเคราะห์ความสามารถในการยับยั้งสารต้านอนุมูลอิสระ โดยการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2 diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH radical scavenging activity assay) โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Chatchavanthatri et al. (2021) เริ่มจากการนำสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการสกัดด้วยเมทนนอล 100 µl มาผสมกับสารละลายเข้มข้น 100 µM ของ DPPH จำนวน 2.9 ml แล้วผสมสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่า จากนั้นเก็บไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 min แล้วทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm โดยใช้ UV-spectrophotometer (Shimazu, UV-2600, Kyoto, Japan) และ สารละลายมาตรฐานคือ Trolox (ความเข้มข้น 0, 5, 10, 25, 50, 100 mg/l) ถูกใช้เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรง (R^2 = 0.999) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงอยู่ในหน่วยของ มิลลิกรัมสมมูลย์ของ Trolox ต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง (mg TEAC/ g, d.b.) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำในแต่ละตัวอย่าง

3.8.5 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธีเอบีทีเอส (ABTS radical cation decolorization assay)

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2, 2′-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) ดัดแปลงวิธีการจาก Adebayo et al. (2018) เป็นการทดสอบโดยใช้สารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ reagent โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายเอบีทีเอสในน้ำกลั่นความเข้มข้น 7 mM ปริมาณ 15 ml ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ความเข้มข้น 140 mM 264 µl แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 12 – 16 h ก่อนนำไปใช้ให้เจือจางสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ reagent ที่เตรียมไว้ด้วยเมทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm เท่ากับ 0.70 ± 0.02 จากนั้นทำการทดสอบโดยเตรียมสารตัวอย่าง จำนวน 0.2 ml ผสมสารละลาย $ABTS^{\bullet+}$ reagent 2 ml ตั้งทิ้งไว้ที่มืดอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 min แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm ด้วยเครื่อง UV-spectrophotometer และสารละลายมาตรฐาน คือ Trolox (ความเข้มข้น 5, 20, 25, และ 50 mg/l) ถูกใช้เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ซึ่งเป็นสมการเส้นตรง (R^2 = 0.999) โดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงอยู่ในหน่วยของ มิลลิกรัมสมมูลย์ของ Trolox ต่อน้ำหนักตัวอย่างแห้ง (mg TEAC/ g, d.b.) โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.9 การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis)

การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวและการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่ออัตราการพองของข้าวกล้องงอกพองและการเปลี่ยนสมบัติทางเคมีกายภาพได้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ Completely randomized design (CRD) โดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's honestly significant different (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม Minitab® 17 (Minitab Inc., USA)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

การเพิ่มคุณภาพของข้าวกล้องงอกพองด้านความกรอบเกี่ยวข้องกับการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพอง (Rice preparation) และการทำพอง (Puffing) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง ซึ่งการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองเกี่ยวข้องกับการทำให้ข้าวกล้องงอกเกิดเจลาติไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยในการศึกษานี้แบ่งวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง และ (2) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

4.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกสุก ซึ่งมีผลต่อการพองตัวของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดยได้ศึกษาวิธีการหุงข้าว 6 วิธี ได้แก่ (1) การต้มข้าวกล้องงอกในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 min ก่อนนำไปนึ่งนาน 30 min (Parboiled steamed rice, PS) (2) การปรับสภาพข้าวกล้องงอกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 min ก่อนนำไปต้มในน้ำเดือดนาน 5 min และนึ่งนาน 30 min (Ultrasound assisted parboiled steamed rice, UPS) (3) การแช่ข้าวกล้องงอกนาน 60 min ก่อนนำไปนึ่งนาน 70 min (Soaked steamed rice, SS) (4) การปรับสภาพข้าวกล้องงอกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 min ก่อนนำไปแช่ 60 min และ นึ่งนาน 70 min (Ultrasound assisted soaked steamed rice, USS) (5) การหุงข้าวกล้องงอกด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้านาน 40 min (Electric cooked rice, EC) และ (6) การปรับสภาพข้าวกล้องงอกด้วยคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 5 min ก่อนนำไปหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้านาน 40 min (Ultrasound assisted electric cooked rice, EC) โดยหลังการทำข้าวกล้องงอกพองได้วิเคราะห์คุณภาพด้านสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM และการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR

4.1.1 ปริมาณผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) การขยายปริมาตร (Volume expansion) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดยการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตทั้งหมดได้มาจากการคำนวณอัตราส่วนของน้ำหนักของข้าวกล้องงอกพองต่อน้ำหนักของข้าวกล้องงอกเริ่มต้น พบว่าวิธีการหุงข้าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทั้งหมดของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 82.57 – 86.07% ปริมาณผลผลิตข้าวพองโดยคำนวณจากอัตราส่วนของน้ำหนักข้าวกล้องงอกพองต่อน้ำหนักข้าวแห้งก่อนการทำพอง พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 77.45 – 83.35% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) มีผลทำให้ปริมาณผลผลิตข้าวพองลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Puffed EC และ Puffed UEC เกิดการแตกหักระหว่างการทำพองได้ง่ายเพราะ สามารถความพองตัวได้เร็ว (จากการสังเกตระหว่างการทำพอง) และมีความพองตัวสูงกว่าข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากการหุงด้วยวิธีอื่น ๆ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณผลผลิตข้าวพองลดต่ำลง

การขยายปริมาตร (Volume expansion) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.90 – 2.63 และ 1.32 – 1.68 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Puffed SS และ Puffed USS มีการขยายปริมาตรและอัตราการพองตัวต่ำกว่า Puffed ที่ได้จากการหุงด้วยวิธีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทั้งไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) ทำให้ Puffed GBR มีแนวโน้มการขยายปริมาตรและอัตราการพองตัวสูงกว่า Puffed PS และ Puffed UPS อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วยในการเตรียมข้าวก่อนหุงสุก (UPS, USS, UEC) ไม่ส่งผลต่อการขยายปริมาตรและอัตราการพองของ Puffed GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) การขยายปริมาตร (Volume expansion) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Total yield (%)[2]	Puffed yield (%)[3]	Volume expansion[4]	Expansion ratio[5]
PS	82.57 ± 0.43^{a}	82.75 ± 0.61^{a}	2.29 ± 0.09^{b}	1.56 ± 0.08^{ab}
UPS	84.15 ± 2.69^{a}	83.21 ± 0.88^{a}	2.40 ± 0.07^{ab}	1.61 ± 0.02^{a}
SS	85.24 ± 1.23^{a}	83.35 ± 2.11^{a}	1.90 ± 0.20^{c}	1.29 ± 0.12^{b}
USS	86.07 ± 0.77^{a}	81.35 ± 0.72^{ab}	1.98 ± 0.06^{c}	1.32 ± 0.07^{b}
EC	84.14 ± 1.07^{a}	77.45 ± 0.99^{c}	2.58 ± 0.12^{ab}	1.68 ± 0.10^{a}
UEC	85.54 ± 2.01^{a}	79.03 ± 1.72^{bc}	2.63 ± 0.18^{a}	1.64 ± 0.24^{a}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2,3,4,5] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments (p<0.05).

ตารางที่ 4.2 แสดงผลความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีต่างกัน ได้แก่ PS, UPS, SS, USS, EC และ UEC โดยค่าความหนาแน่นปรากฏของ GBR เท่ากับ 0.72 g/ml ส่วน Pretreated GBR และ Puffed GBR มีค่าความหนาแน่นปรากฏระหว่าง 0.62 – 0.73 g/ml และ 0.30 – 0.44 g/ml ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ข้าวกล้องงอกที่ผ่านการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วยในการเตรียมข้าวก่อนหุงสุกมีผลทำให้ Pretreated UCE, Puffed USS และ Puffed UEC มีค่าความหนาแน่นปรากฏลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคลื่นอัลตราโซนิกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเมล็ดข้าว กล่าวคือคลื่นอัลตราโซนิกทำให้เกิดรูพรุนภายในเมล็ดจากการแตกของฟองอากาศ (Bubbles) เนื่องจากปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (Cavitation) การเกิดรูพรุนภายในเมล็ดข้าวมีผลทำให้ข้าวเกิดเจลาติไนเซชันได้สมบูรณ์ซึ่งส่งผลต่อการพองตัวได้ดีระหว่างกระบวนการทำพอง (Yu, S. et al., 2013; Ly, H.L. et al., 2018) นอกจานี้ Puffed GBR มีค่าความหนาแน่นปรากฏลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) เมื่อเทียบกับ GBR

และ Pretreated GBR ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการทำพองทำให้ Puffed GBR (ในส่วนของเอนโดสเปิร์ม) มีปริมาตรเพิ่มขึ้น (Mir et al., 2016)

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Bulk density (g/ml)[2]	
	Pretreated	Puffed
PS	0.73 ± 0.02^{aA}	0.36 ± 0.02^{bB}
UPS	0.68 ± 0.02^{abA}	0.44 ± 0.04^{aB}
SS	0.69 ± 0.03^{abA}	0.35 ± 0.01^{bcB}
USS	0.68 ± 0.02^{abA}	0.30 ± 0.02^{cB}
EC	0.65 ± 0.01^{abA}	0.41 ± 0.01^{aB}
UEC	0.62 ± 0.05^{bA}	0.30 ± 0.01^{cB}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$). Different uppercase letters in the same row indicate statistical differences between pretreated and puffed sample ($p<0.05$).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการทดลองใน ตารางที่ 4.3 แสดงถึงอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio, L/B) ซึ่งค่า L/B สามารถบอกถึงแนวโน้มการพองของข้าวพองที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่แตกต่างกันได้ โดยค่า L/B ต่ำ แสดงถึงค่าอัตราการพองของเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น (Mir et al., 2016) จากผลการทดลองพบว่า L/B ของ GBR, Pretreated GBR และ Puffed GBR มีค่า 3.46, 3.29 – 3.46 และ 2.55 – 3.21 ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS) มีผลทำให้ค่า L/B ของ Puffed EC, Puffed UCE และ Puffed UPS ต่ำกว่าข้าวกล้องงอกดิบ (GBR) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งบ่งบอกได้ว่า Puffed EC, Puffed UCE และ Puffed UPS มีความพองมากกว่า GBR และ Pretreated GBR นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า L/B ของ Puffed GBR ที่ได้จากการหุงในแต่ละวิธี พบว่า Puffed EC และ Puffed UEC มีค่า L/B ต่ำกว่า Puffed PS, Puffed SS และ Puffed USS อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามการใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วยในการเตรียมข้าวก่อนหุงสุกส่วนใหญ่ทำให้แนวโน้มการพองของข้าวเพิ่มมากขึ้นแต่ไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความพองอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

จากผลการทดลองสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพองแสดงให้เห็นว่า วิธีการหุงข้าวกล้องงอกมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของ Puffed GBR กล่าวคือ การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยทั้งไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS) มีผลทำให้การขยายปริมาตร (Volume expansion) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของ Puffed GBR เพิ่มขึ้น รวมทั้งอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio, L/B) ของ Puffed GBR ต่ำลง ซึ่งบ่งบอกว่า EC, UCE และ UPS มีผลทำให้ข้าวกล้องงอกพองมีการพองตัวมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหุงข้าวด้วยวิธีอื่น

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Length/breadth ratio[2]	
	Pretreated	puffed
PS	3.34 ± 0.16^{aA}	3.21 ± 0.20^{aA}
UPS	3.30 ± 0.15^{aA}	2.89 ± 0.28^{abcB}
SS	3.29 ± 0.13^{aA}	3.26 ± 0.30^{aA}
USS	3.35 ± 0.32^{aA}	3.12 ± 0.36^{abA}
EC	3.46 ± 0.12^{aA}	2.55 ± 0.54^{cB}
UEC	3.29 ± 0.26^{aA}	2.55 ± 0.14^{bcB}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$). Different uppercase letters in the same row indicate statistical differences between pretreated and puffed sample for each parameter ($p<0.05$).

4.1.2 ปริมาณความชื้นและปริมาณน้ำอิสระของข้าวกล้องงอกพอง

ตารางที่ 4.4 แสดงผลปริมาณความชื้น (Moisture content) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้นของ GBR, Pretreated GBR และ Puffed GBR มีค่า 8.50%, 10.20 – 13.53% และปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) มีค่าระหว่าง 0.90 – 2.47% ตามลำดับ โดยปริมาณความชื้นของ Pretreated GBR ในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วง 10 – 14 % ซึ่งเป็นช่วงปริมาณความชื้นที่เหมาะสมกับการทำพอง เนื่องจากการทำพองซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น มีผลทำให้ความชื้น (น้ำ) ภายในเมล็ดของข้าวแห้งก่อนการทำพอง ระเหยอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นแรงดันไอภายในเมล็ดข้าวดันให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวพองตัวได้ดี (Saha & Roy, 2020; Huang et al., 2018; Maisont & Narkrugsa, 2009) อย่างไรก็ตามปริมาณความชื้นของ Puffed GBR ต่ำกว่า Pretreated GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เนื่องมาจากการทำพองทำให้ความชื้น (น้ำ) ในเมล็ดข้าวระเหยออกไปอย่างรวดเร็วส่งผลให้

ข้าวกล้องงอกพองมีความชื้นลดลง โดยปริมาณความชื้นของ Puffed GBR อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Saha & Roy (2020) ซึ่งรายงานว่า ข้าวพองมีปริมาณความชื้นระหว่าง 1.15 – 1.37% และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยวภายในอาหารหรือน้ำที่ถูกนำไปใช้ดำเนินกิจกรรม (activity) ทางเคมีและจุลชีววิทยาได้ ซึ่งมีผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร รวมถึงอายุการเก็บรักษาของอาหาร (Santillana Farakos & Frank, 2014) โดยข้าวกล้องงอก (GBR) มี a_w 0.87 ซึ่งสูงกว่า Puffed GBR โดยมีค่า a_w ระหว่าง 0.22 – 0.32 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า a_w ของ Puffed GBR ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งมีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 723/2548) และมีความปลอดภัยด้านจุลชีววิทยาและเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งขององค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (US Food and Drug Administration, 2016) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ได้จากการหุงสุกด้วยวิธีต่าง ๆ มีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10% และค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งแสดงถึงผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.723/2548) มีความปลอดภัยด้านจุลชีววิทยา และสามารถเก็บรักษาได้นาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความชื้น (Moisture content) และปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ของตัวอย่าง

Treatment[1]	Moisture content (%)[2]		Water activity[3]
	Pretreated	puffed	
PS	10.20 ± 0.14^{bcA}	1.37 ± 0.14^{bB}	0.22 ± 0.04^{c}
UPS	11.35 ± 1.13^{abA}	1.17 ± 1.13^{bB}	0.31 ± 0.00^{b}
SS	12.58 ± 2.09^{aA}	2.47 ± 2.09^{aB}	0.32 ± 0.00^{b}
USS	13.53 ± 0.46^{aA}	0.90 ± 0.46^{bB}	0.22 ± 0.02^{c}
EC	13.50 ± 0.14^{aA}	1.33 ± 0.14^{bB}	0.24 ± 0.06^{bc}
UEC	12.33 ± 2.30^{aA}	1.17 ± 2.30^{bB}	0.24 ± 0.00^{bc}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2,3] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$). Different uppercase letters in the same row indicate statistical differences between pretreated and puffed sample for each parameter ($p<0.05$).

4.1.3 ปริมาณเถ้าและโซเดียมคลอไรด์ของข้าวกล้องงอกพอง

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณเถ้า (Ash content) และปริมาณเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl content) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดยปริมาณเถ้าเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์แร่ธาตุต่าง ๆ ที่เหลืออยู่ในรูปของเถ้า (Saha & Roy, 2022) โดยปริมาณเถ้าของ GBR และ Puffed GBR มีค่า 1.15% และ 1.33 – 1.84% ตามลำดับ ทั้งนี้การใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนแทนการใช้น้ำมันพืชระหว่างทำพองไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าของ Puffed GBR ยกเว้น Puffed UEC ที่มีปริมาณเถ้าสูงกว่า GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้ปริมาณเกลืออาจส่งผลต่อปริมาณเถ้าของ Puffed GBR อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ปริมาณเกลือของ GBR และ Puffed GBR พบว่า ตรวจวิเคราะห์ไม่พบเกลือใน GBR แต่พบใน Puffed GBR ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.05 – 0.27% ทั้งนี้ปริมาณเกลือของ Puffed GBR มาจากระหว่างกระบวนการทำพองที่ใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน โดยมีเกลือบางส่วนติดมากับผิวข้าวกล้องงอกพองที่มีลักษณะขรุขระโดย

จากการสังเกตด้วยตาเปล่า และดังแสดงใน รูปที่ 4.12 เมื่อคำนวณปริมาณโซเดียมในข้าวกล้องงอกพอง พบว่า Puffed GBR มีปริมาณโซเดียมระหว่าง 20 – 108 mg ต่อปริมาณข้าวกล้องงอกพอง 100 g ซึ่งเกณฑ์การใช้เกลือในอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขคือการใช้เกลือต่ำกว่า 1% ของน้ำหนักอาหาร นอกจากนี้ World Health Organization (WHO) แนะนำการรับประทานเกลือควรน้อยกว่าวันละ 5 g หรือโซเดียมน้อยกว่า 2000 mg จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำพองด้วยการใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนมีผลทำให้ปริมาณเกลือหรือปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 4.5 ปริมาณเถ้า (Ash content) และปริมาณเกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl content) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Ash (%)[2]	NaCl (%)[3]
GBR	1.15 ± 0.05^{b}	Not detected
P-PS	1.33 ± 0.06^{ab}	0.08 ± 0.02
P-UPS	1.54 ± 0.11^{ab}	0.16 ± 0.03
P-SS	1.68 ± 0.51^{ab}	0.22 ± 0.06
P-USS	1.62 ± 0.11^{ab}	0.27 ± 0.05
P-EC	1.38 ± 0.07^{ab}	0.05 ± 0.007
P-UEC	1.84 ± 0.60^{a}	0.16 ± 0.02

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2,3] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$).

4.1.4 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS) และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) ของข้าวกล้องงอกพอง

ตารางที่ 4.6 แสดงผลปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS) ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด (Total starch) และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) ของ GBR และ Puffed GBR พบว่า ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของ GBR มีค่า 0.048% เมื่อนำ GBR มาผ่านการหุงและทำพองทำให้ไม่พบปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ของ Puffed GBR ทั้งนี้การทำพองข้าวกล้องงอกส่งผลต่อการลดปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ไม่สามารถถูกย่อยและดูดซึมได้ที่ลำไส้เล็ก (Ratithammatorn, 2017) อย่างไรก็ตามปริมาณสตาร์ชทั้งหมดของ GBR และ Puffed GBR ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 67.52 – 72.83% ทั้งนี้ปริมาณสตาร์ชทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Huang et al., (2018) ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 67.24 – 78.07% นอกจากนี้สตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์สามารถบ่งบอกถึงปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) (Haralampu, 2000) โดยปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดของ Puffed GBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก GBR ทั้งนี้อาจเนื่องจากกระบวนการทำพองได้แก่ การเตรียมข้าวกล้องงอกและการทำพองส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกพอง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการหุงข้าวที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด แต่การทำข้าวกล้องงอกพองมีผลต่อการลดปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS) ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด (Total starch) และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber, TDF) ของ GBR และ Puffed GBR

Treatment[1]	RS (%)[2]	Total starch (%)[4]	TDF (%)[5]
GBR	0.048 ± 0.336	72.83 ± 0.61^{a}	8.77 ± 0.22^{b}
PS	Not detected	67.52 ± 0.29^{a}	10.73 ± 0.92^{ab}
UPS	Not detected	71.90 ± 2.33^{a}	12.82 ± 0.43^{a}
SS	Not detected	68.58 ± 1.36^{a}	12.48 ± 0.08^{a}
USS	Not detected	68.24 ± 0.87^{a}	12.57 ± 0.19^{a}
EC	Not detected	72.05 ± 2.21^{a}	10.72 ± 0.97^{ab}
UEC	Not detected	68.67 ± 0.06^{a}	11.45 ± 0.11^{a}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

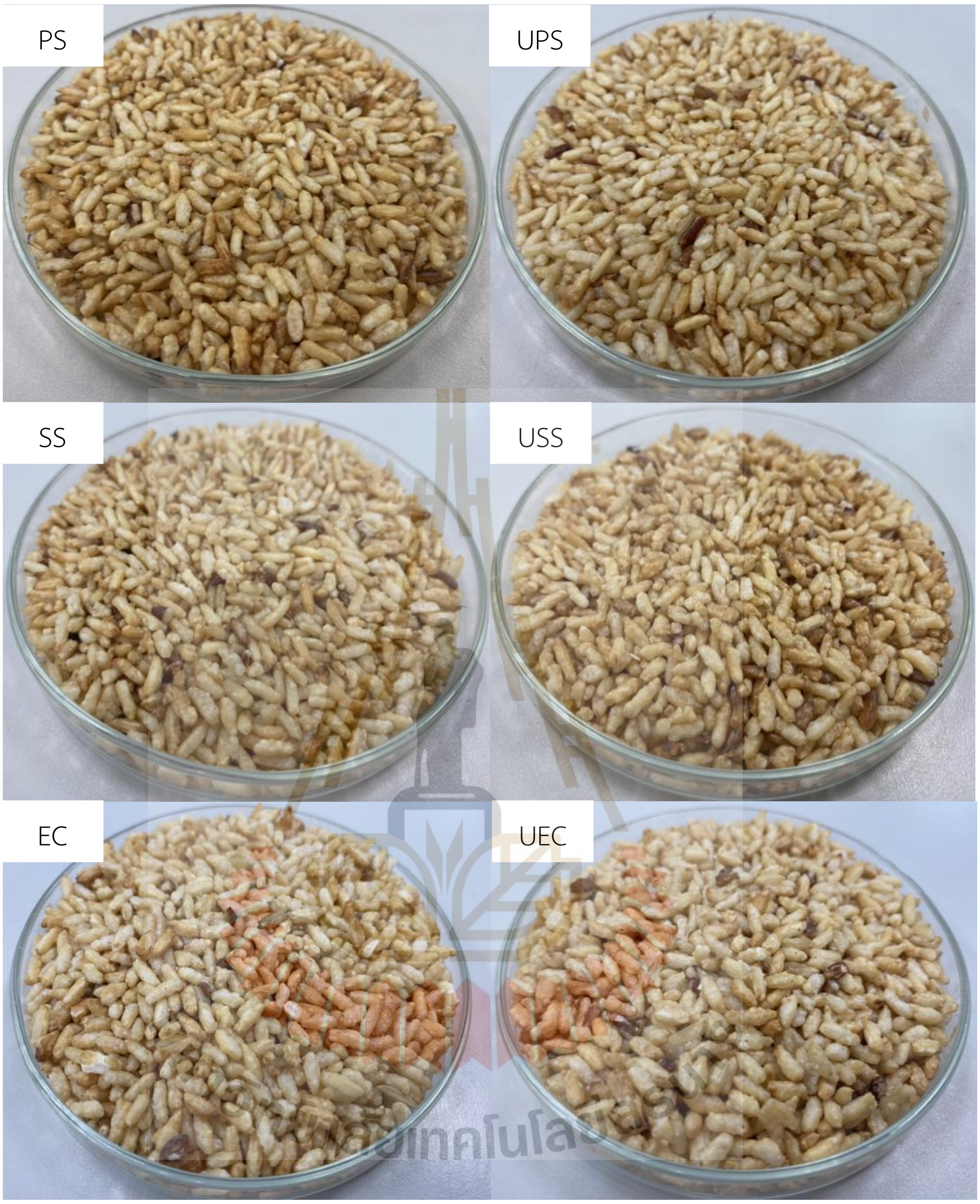
[2,3,4,5] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$).

4.1.5 ค่าสีของข้าวกล้องงอกกล้องงอกพอง

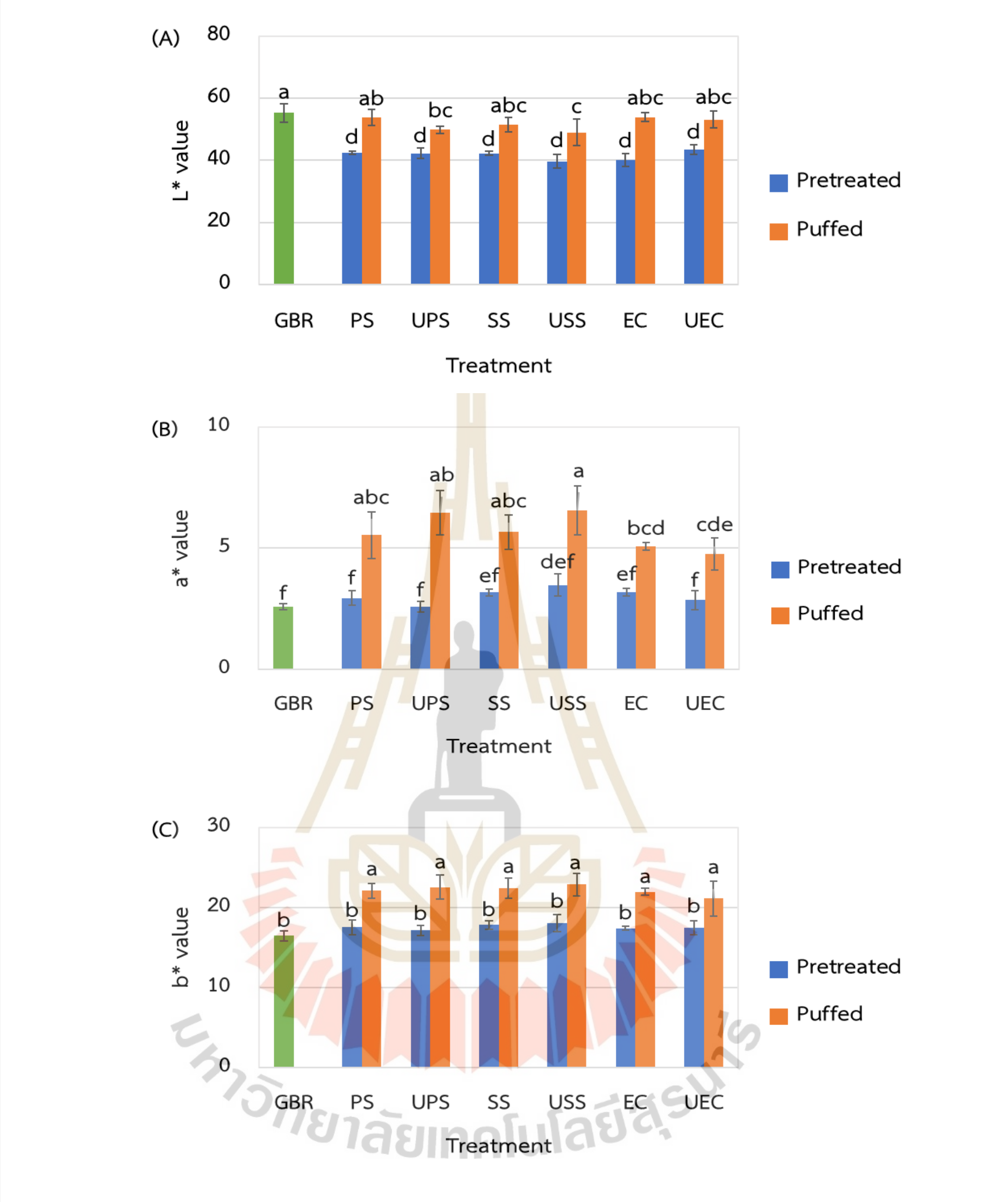
รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากหุงด้วยวิธีต่างกัน ซึ่งจากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่า Puffed EC และ Puffed UEC มีความพองมากกว่า Puffed GBR อื่น ๆ สอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพของ Puffed GBR ในหัวข้อ 4.1.1 นอกจากนี้ รูปที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสีของ GBR, Pretreated GBR และ Puffed GBR โดยค่าความสว่าง (L*) บ่งบอกถึงค่าความสว่างโดยค่ามีแนวโน้มไปทางบวกแสดงถึงสีขาว ส่วนค่ามีแนวโน้มไปทางลบแสดงถึงสีดำ ค่าความเป็นสีแดง (a*) บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีแดงไปจนถึงเขียว หากค่ามีแนวโน้มไปทางบวกแสดงถึงสีแดง ส่วนค่ามีแนวโน้มไปทางลบแสดงถึงสีเขียว ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีเหลืองไปจนถึงน้ำเงิน หากค่ามีแนวโน้มไปทางบวกแสดงถึงสีเหลือง ส่วนค่ามีแนวโน้มไปทางลบแสดงถึงสีน้ำเงิน จากผลการทดลองพบว่า GBR, Pretreated GBR และ Puffed GBR มีค่า L* 55.32, 39.72 – 43.53 และ 49.02 – 53.94 ตามลำดับ โดย Puffed GBR มีค่า L* ใกล้เคียงกับ GBR แต่ Pretreated GBR มีค่า L* ต่ำกว่า GBR, และ Puffed GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การทำพองซึ่งทำให้ข้าวเกิดการพองตัวส่งผลต่อการเพิ่มความสว่างให้กับข้าว

กล้องงอกพอง อย่างไรก็ตามการทำพองซึ่งใช้ความร้อนสูงระยะเวลาสั้น (200 – 230°C นาน 10 – 15 s) มีผลทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของ Puffed GBR เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ GBR และ Pretreated GBR โดย GBR, Pretreated GBR และ Puffed GBR มีค่า a* 2.58, 2.59 – 3.48 และ 4.75 – 6.57 ตามลำดับ และมีค่า b* 16.49, 17.14 – 18.07 และ 21.11 – 22.88 ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การทำข้าวกล้องงอกพองมีผลทำให้ค่าสีเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับ GBR และ Preatreated GBR แต่วิธีการหุงข้าวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า a* และ b* ของ Puffed GBR ที่ได้จากการหุงที่วิธีต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.1 แสดงภาพข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากวิธีการหุงแบบต่าง ๆ

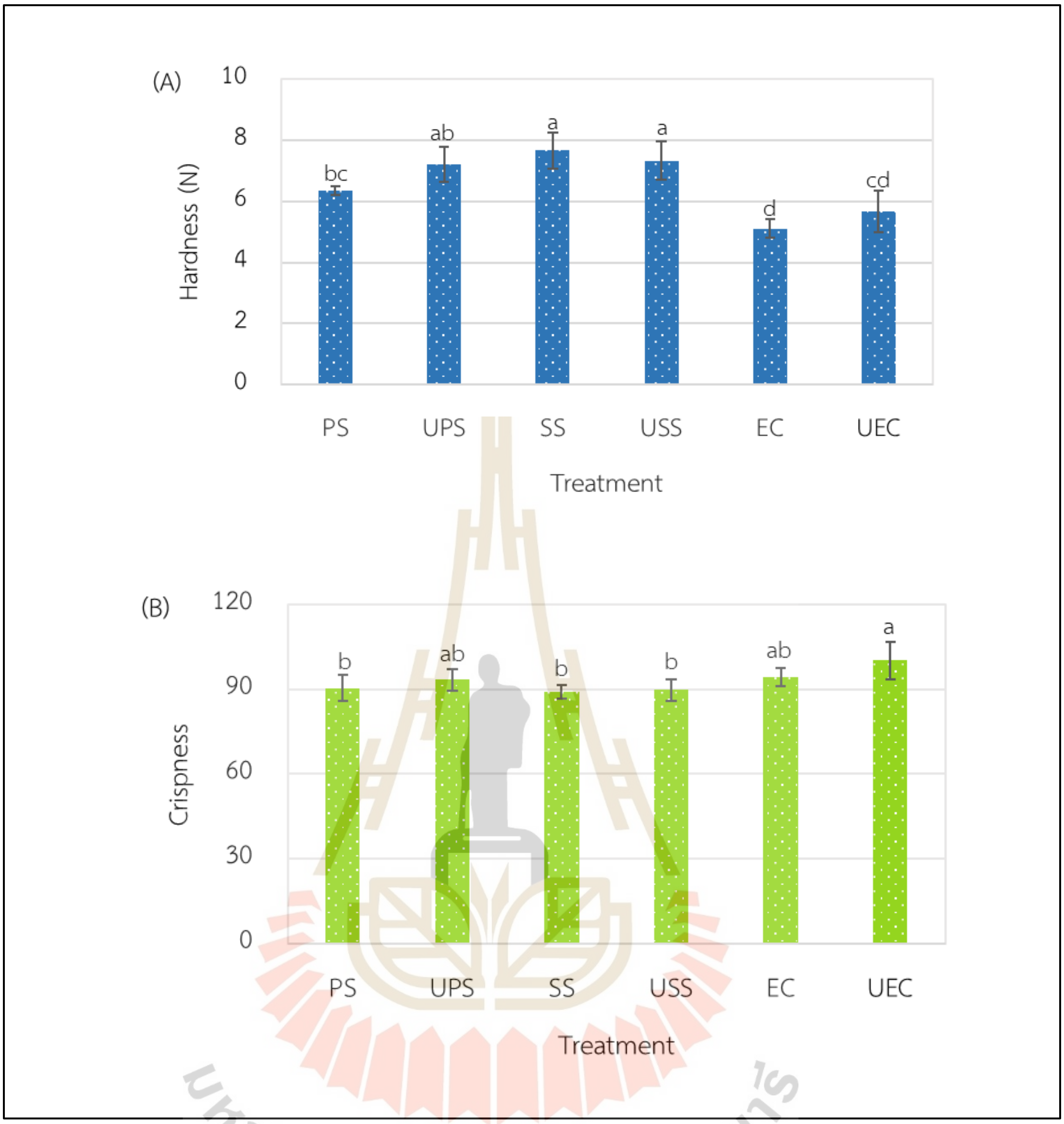


รูปที่ 4.2 ค่าสีของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการอบแห้ง (Pretreated GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดย (A) ค่าความสว่าง (L*), (B) ค่าความเป็นสีแดง (a*), และ (C) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4.1.6 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง

รูปที่ 4.3 แสดงผลลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (Hardness) และความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า Puffed GBR มีค่าความแข็งอยู่ระหว่าง 5.11 – 7.66 N (รูปที่ 4.3 A) และค่าความกรอบ (Crispness) มีค่าอยู่ระหว่าง 89.17 – 100.17 โดยวิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทำให้ได้ Puffed EC และ Puffed UEC มีค่าความแข็งต่ำว่า Puffed ที่ได้จากการหุงวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ Puffed UEC มีค่าความกรอบสูงกว่า Puffed PS, Puffed SS และ Puffed USS อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพและภาพถ่ายของ Puffed GBR ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วิธีการหุงข้าวมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง โดยการใช้วิธีการหุงข้าวหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS) มีผลในการเพิ่มความพองและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าและการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง ทำให้ข้าวกล้องงอกเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์มากกว่าการหุงด้วยวิธีแบบอื่น ซึ่งการเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์มีส่วนทำให้เมื่อทำแห้งข้าวจะทำให้เกิดชั้นที่ผิวของเมล็ดข้าว (Crust) ที่หนาและแข็งแรง (Pompe et al., 2020) จึงทำพองได้ดีขึ้นและมีความกรอบมากขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน (A) ความแข็ง (Hardness) และ (B) ความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4.1.7 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกพองที่ผ่านการหุงข้าวด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง เช่น กรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริก (กาบา) แกมมา-โอรีซานอล และสารประกอบฟีนอลิก เป็นต้น ตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกพอง พบว่า GBR มีปริมาณสารกาบาเท่ากับ 16.83 mg/100 g (ตารางที่ 4.7) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) ซึ่งรายว่าข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาอยู่ระหว่าง 6.43 – 29.76 mg/100 g เมื่อเทียบ GBR อย่างไรก็ตามปริมาณสารกาบาของ Puffed GBR มีค่าอยู่ระหว่าง 8.63 – 9.39 mg/100 g ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเทียบกับ GBR ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำข้าวกล้องงอกพอง (การเตรียมข้าวและการทำพอง) มีผลต่อการลดปริมาณสารกาบาลง 51 – 56% เมื่อเทียบกับ GBR

ตารางที่ 4.7 ปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	GABA (mg/100g)[2]
GBR	16.83 ± 0.01^{a}
PS	8.63 ± 0.00^{c}
UPS	9.07 ± 0.01^{bc}
EC	9.39 ± 0.36^{b}
UEC	9.00 ± 0.16^{bc}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p < 0.05$).

สารแกมมา-โอรีซานอล เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่พบมากในเมล็ดพืชโดยเฉพาะในส่วนของรำข้าว ซึ่งมีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ ลด LDL-cholesterol และเพิ่ม HDL-cholesterol (Gerhardt & Gallo, 1998; Rong et al., 1997; Wilson et al., 2002) นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการช่วยลดการเกิดเนื้องอก ป้องกันเลือดหนืด และต้านการอักเสบ (Lerma et al., 2009) ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่า GBR มีค่าอยู่ 61.85 mg/100 และ Puffed GBR มีค่าอยู่ระหว่าง 46.22 – 48.23 mg/100 g (ตารางที่ 4.8) ทั้งนี้กระบวนการทำข้าวกล้องงอกพอง (การเตรียมข้าวและการทำพอง) มีผลต่อการลดปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) พบว่า ข้าวกล้องงอก (GBR) มีปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอล 45.06 mg/100 g อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัยของ Bagchi et al. (2021) มีปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลอยู่ระหว่าง 24.00 – 74.00 mg/100 ทั้งนี้ปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลที่แตกต่างกันในแต่ละงานวิจัยอาจมาจากวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกและสายพันธุ์ข้าว จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการหุงข้าวแต่ละวิธีไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลของ Puffed GBR

สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content, TPC) ของ GBR มีค่าเท่ากับ 0.48 mg GAE/g ซึ่งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ GBR สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.48 – 0.88 mg GAE/g ส่วน Puffed GBR มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ระหว่าง 0.31 – 0.43 mg GAE/g (ตารางที่ 4.8) โดย Puffed UEC มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมากกว่าการหุงสุกด้วยวิธีการอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ Puffed GBR ลดลงอาจเนื่องมาจากการเตรียมข้าวพองต้องมีการผ่านการให้ความร้อนตั้งแต่การหุงข้าวและการทำพองจึงส่งผลให้มีการสูญเสียสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Mir et al., 2016)

จากการทดสอบฤทธิ์ (ความสามารถ) ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ของ GBR และ Puffed GBR ดังแสดงผลการทดลองใน ตารางที่ 4.8 พบว่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ของ GBR มีค่า 0.41 และ 0.53 mg TEAC/g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า GBR ของ Chatchavanthatri et al., (2021) (0.75 – 1.36 และ 0.85 – 1.31 mg TEAC/g ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามการทำข้าวกล้องงอกพองในงานวิจัยนี้มีผลในการลดความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากผลความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS พบว่า Puffed GBR ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.23 – 0.27 mg TEAC/g มีการลดลงจาก GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แต่ผลความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ของ Puffed GBR ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.12 – 0.27 mg TEAC/g พบว่าสารต้านอนุมูลอิสระ

ของ Puffed UEC ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) กับ GBR ส่วน Puffed GBR ที่ผ่านการหุงสุกด้วยวิธีที่ต่างกัน ไม่ส่งผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ทั้งของวิธี DPPH และ ABTS จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กระบวนการทำพองนั้นส่งผลต่อการลดความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดถูกทำลายไประหว่างการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกและการทำพอง และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพข้างต้น

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กระบวนการทำข้าวกล้องงอกพอง (การเตรียมข้าวด้วยการหุงข้าวแต่ละวิธีและการทำพอง) มีผลต่อการลดปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้แก่ สารกาบา สารแกมมา-โอรีซานอล สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะสารกาบาซึ่งลดลงประมาณ 51 – 56% เมื่อเทียบ GBR อย่างไรก็ตามวิธีการหุงข้าวแต่ละวิธีไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ยกเว้น วิธีการหุงข้าวหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.8 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Oryzanol (mg/100 g)[2]	TPC (mg GAE/g)[3]	DPPH (mg TEAC/g)[4]	ABTS (mg TEAC/g)[5]
GBR	61.85 ± 1.03^{a}	0.48 ± 0.01^{a}	0.41 ± 0.02^{a}	0.53 ± 0.01^{a}
P-PS	47.90 ± 3.41^{b}	0.33 ± 0.02^{b}	0.12 ± 0.05^{b}	0.23 ± 0.01^{b}
P-UPS	46.22 ± 3.94^{b}	0.35 ± 0.01^{b}	0.15 ± 0.04^{b}	0.23 ± 0.01^{b}
P-SS	47.69 ± 2.97^{b}	0.31 ± 0.01^{b}	0.16 ± 0.03^{b}	0.25 ± 0.02^{b}
P-USS	47.22 ± 4.70^{b}	0.33 ± 0.01^{b}	0.15 ± 0.03^{b}	0.24 ± 0.02^{b}
P-EC	46.22 ± 4.23^{b}	0.33 ± 0.02^{b}	0.17 ± 0.03^{b}	0.25 ± 0.03^{b}
P-UEC	48.23 ± 3.91^{b}	0.43 ± 0.05^{a}	0.27 ± 0.14^{ab}	0.27 ± 0.02^{b}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

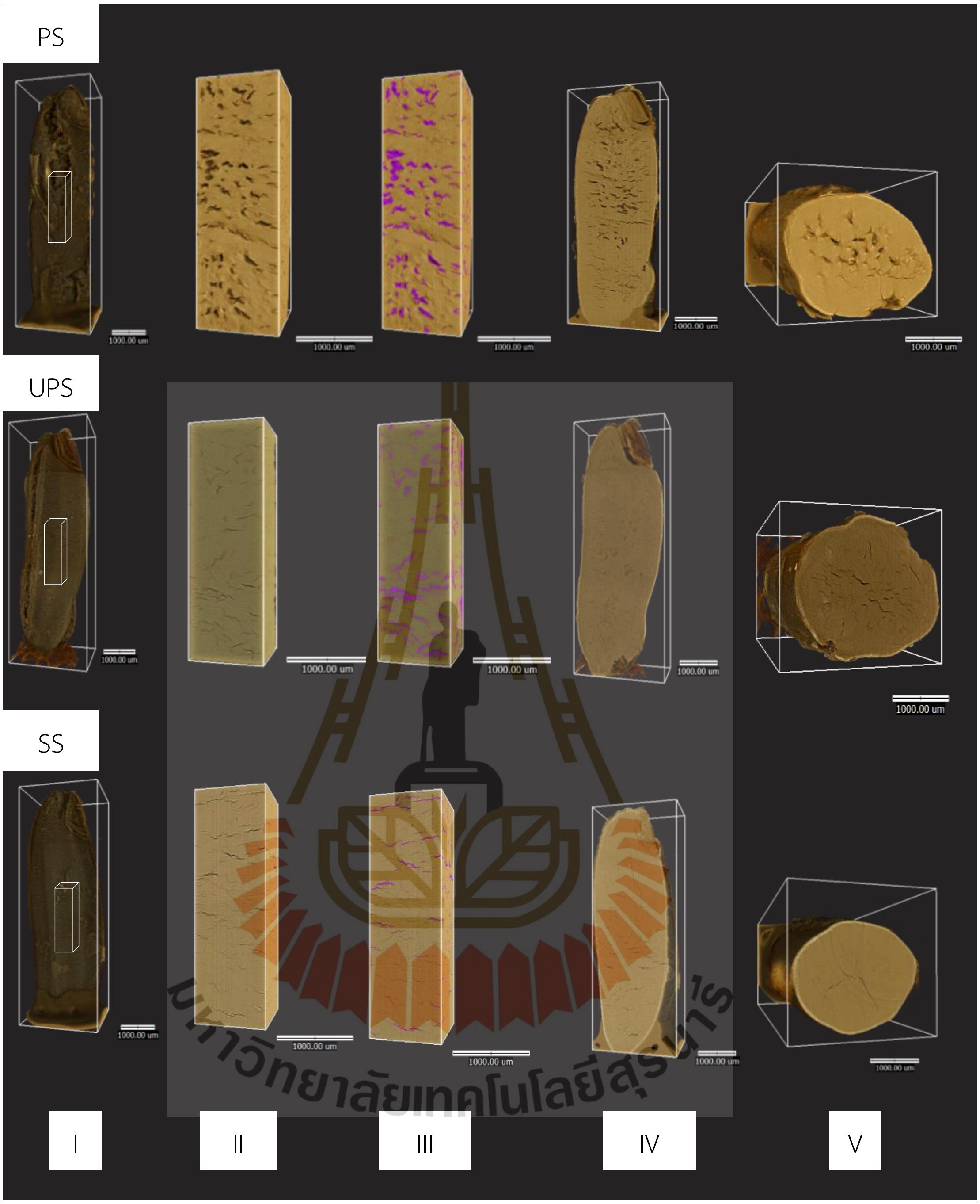
[2,3,4,5] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$).

4.1.8 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติของข้าวกล้องงอกพอง (Synchrotron-radiation-based X-ray tomographic microscopy, SR-XTM)

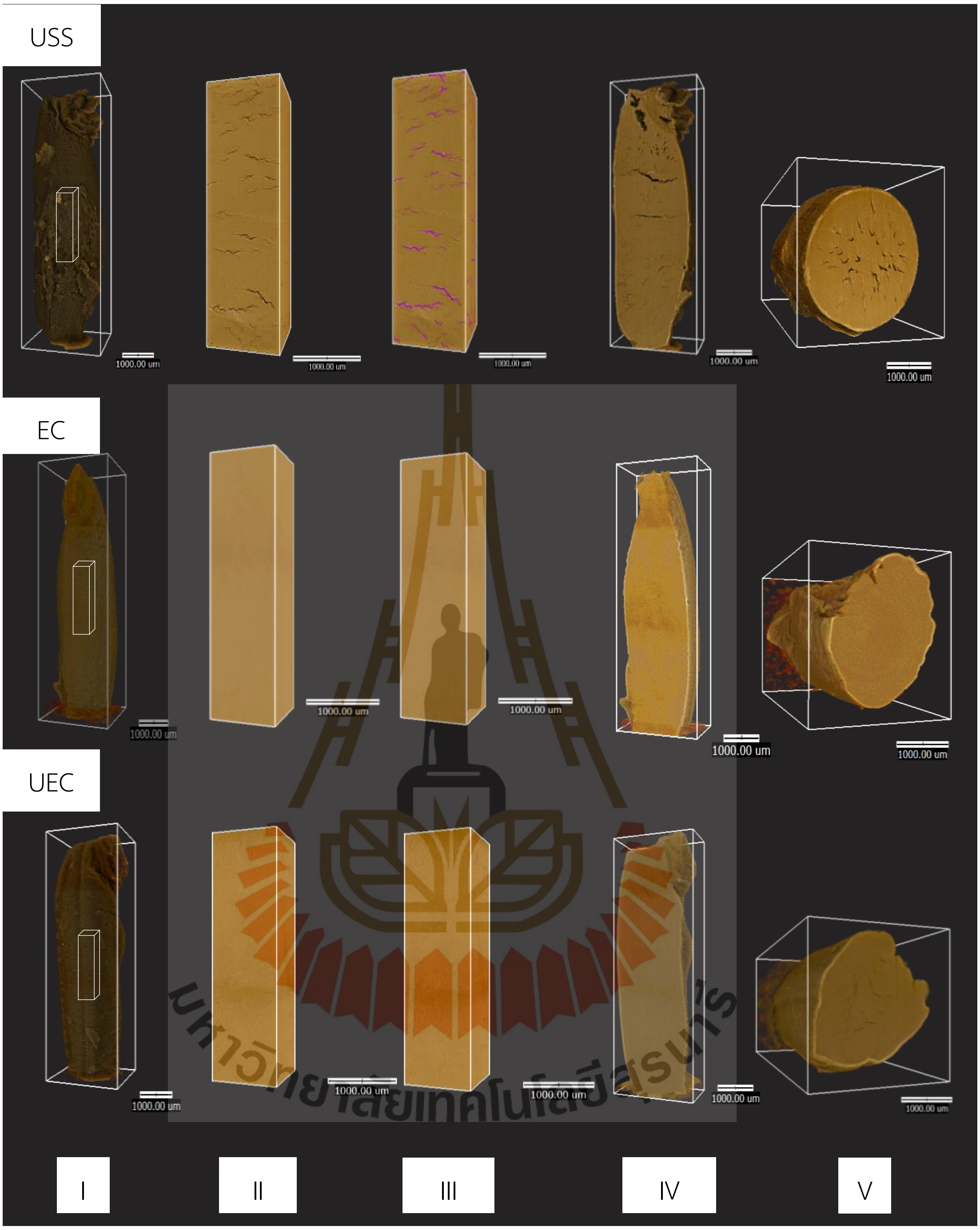
รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงถ่ายภาพด้วยเทคนิคเอกซเรย์คอมพิวเตอร์สามมิติในย่านของรังสีซินโครตรอน (Synchrotron-radiation-based X-ray tomographic microscopy, SR-XTM) ของ Pretreated GBR และ Puffed GBR ที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการหุงสุกที่แตกต่างกันตามลำดับ โดย รูปที่ 4.4 (I) แสดงลักษณะเมล็ดข้าวทั้งเมล็ดของ Pretreated GBR (II และ III) แสดงลักษณะโครงสร้างในภายในเมล็ดของ Pretreated GBR และ (IV และ V) แสดงภาพตัดตามแนวยาว

และแนวขวางของ Pretreated GBR จาก รูปที่ 4.4 ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่า วิธีการหุงข้าวหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) ส่งผลให้โครงสร้างภายในของเมล็ดข้าวแห้ง (Pretreated GBR) ไม่มีรูพรุน ซึ่งแตกต่างจากวิธีการหุงข้าวด้วยวิธีอื่น ซึ่งทำให้ภายในเมล็ดข้าวมีรูพรุน (สีม่วงแสดงช่องว่างภายในเมล็ด) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการหุงข้าวหม้อหุงข้าวไฟฟ้าทำให้ข้าวกล้องงอกเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ทำให้เม็ดสตาร์ชบวมและอัดกันแน่น เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.5 (I) แสดงลักษณะเมล็ดข้าวพองทั้งเมล็ดของ Puffed GBR (II และ III) แสดงลักษณะโครงสร้างในภายในเมล็ดของ Puffed GBR และ (IV และ V) แสดงภาพตัดตามแนวแนวและแนวขวางของ Puffed GBR พบว่า เมล็ดข้าวกล้องงอกพอง มีความพองมาก เมื่อเทียบกับ Pretreated GBR (รูปที่ 4.4) และภายในโครงสร้างของเมล็ดข้าวพองมีรูพรุนจำนวนและมีขนาดใหญ่ โดยเฉพาะ Puffed EC และ Puffed UEC ซึ่งมีความพองและรูพรุนขนาดใหญ่กว่า รวมทั้งบริเวณขอบของข้าวกล้องงอกพองมีความบางกว่า Puffed GBR อื่น ทั้งนี้อาจเกิดจากการข้าวเกิดเจลาติไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า เมื่อนำไปทำแห้งจะทำให้เกิดชั้นที่ผิวของเมล็ดข้าว (Crust) ที่หนาและแข็งแรง (Pompe et al., 2020) และเมื่อนำไปทำพองจึงทำให้เกิดความดันภายในเมล็ดได้มากกว่าเพราะที่ผิวหนาและมีรูน้อยกว่า อากาศจึงผ่านออกไปได้น้อยกว่าจึงส่งผลให้ Puffed EC และ Puffed UEC มีความพองมากกว่าสูตรอื่น จาก SR-XTM นี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการหุงข้าวด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และ และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS) มีผลทำให้ Puffed EC, Puffed UEC และ Puffed UPS มีความพองตัวมากกว่า Puffed GBR ที่ได้จากการหุงด้วยวิธีอื่น และผลจากภาพถ่าย SR-XTM สอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพ (หัวข้อ 4.1.1) และลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความกรอบ (หัวข้อ 4.1.6) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

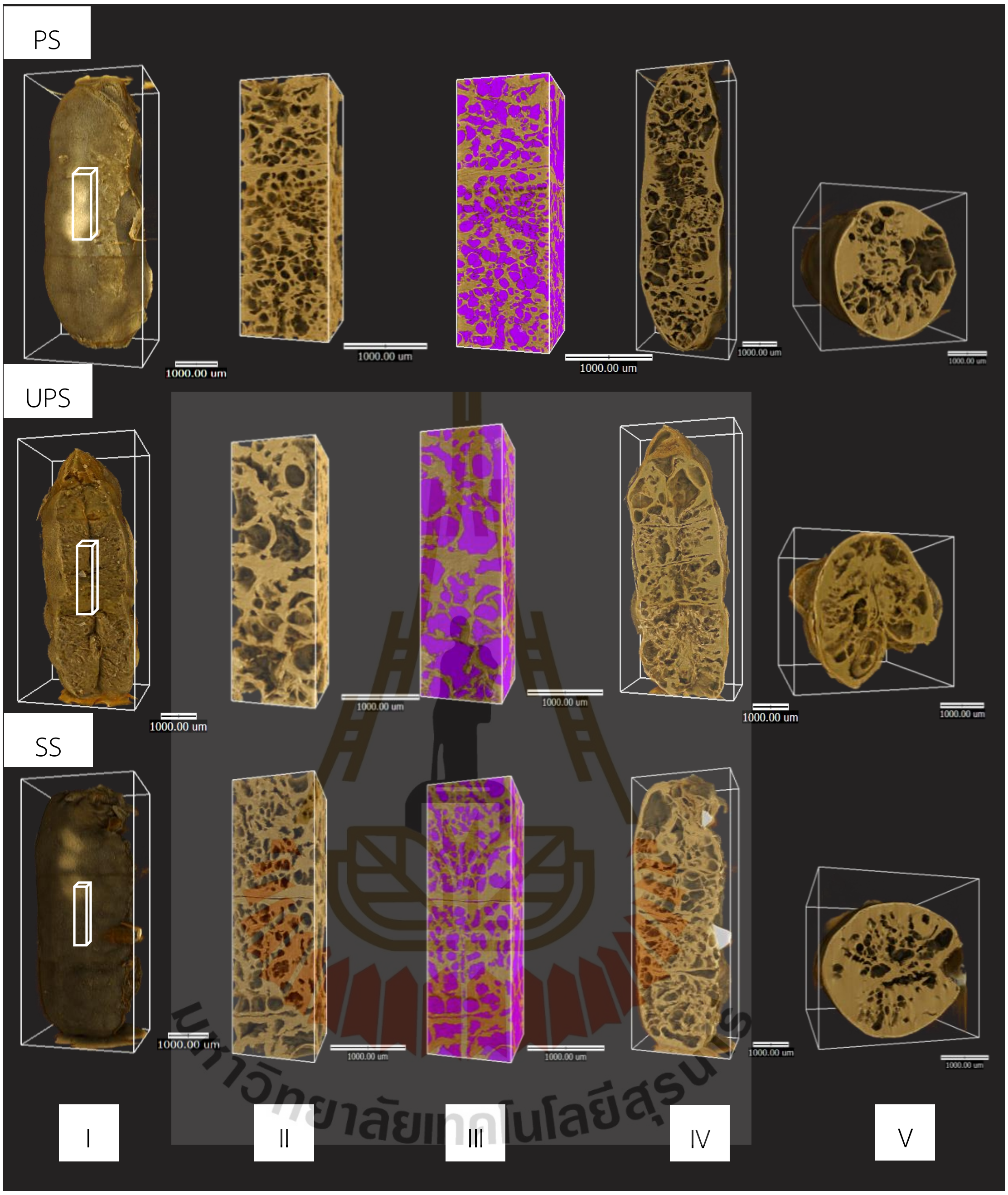
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



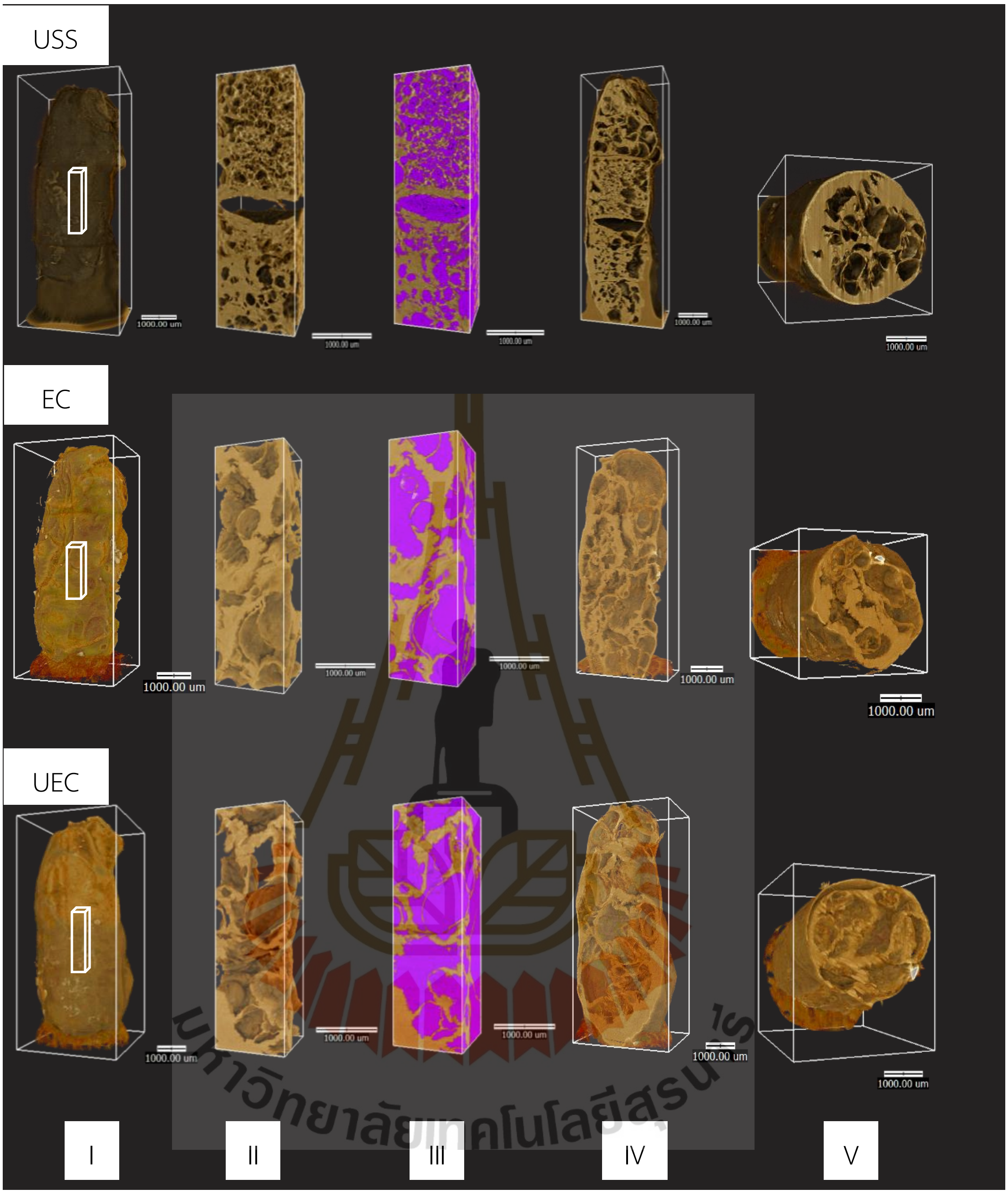
รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SR-XTM ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการทำแห้ง (Pretreated GBR): (I) เมล็ดข้าว, (II) รูพรุน, (III) รูพรุนและอากาศ, (IV) ตัดตามแนวยาว, และ (IV) ตัดตามแนวขวาง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SR-XTM ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการทำแห้ง (Pretreated GBR): (I) เมล็ดข้าว, (II) รูพรุน, (III) รูพรุนและอากาศ, (IV) ตัดตามแนวยาว, และ (IV) ตัดตามแนวขวาง (ต่อ)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SR-XTM ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR): (I) เมล็ดข้าว, (II) รูพรุน, (III) รูพรุนและอากาศ, (IV) ตัดตามแนวยาว, และ (IV) ตัดตามแนวขวาง



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SR-XTM ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR): (I) เมล็ดข้าว, (II) รูพรุน, (III) รูพรุนและอากาศ, (IV) ตัดตามแนวยาว, และ (IV) ตัดตามแนวขวาง (ต่อ)

4.1.9 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกพองโดยใช้แสงซินโครตรอนกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

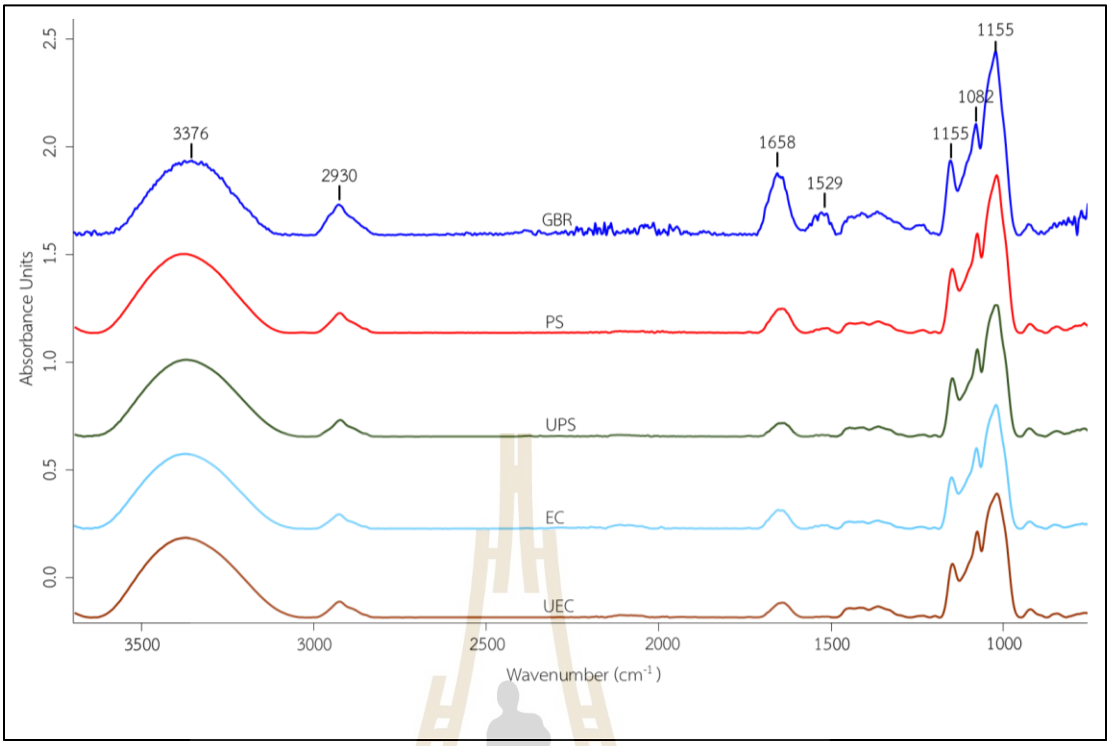
งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared absorption, IR) ของโมเลกุล โดยอาศัยการสั่นของพันธะทางเคมี (Chemical bonding vibration) ทั้งการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) และการสั่นแบบงอ (Bending vibration) ทั้งนี้การสั่นของพันธะเคมีที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดที่ความถี่เฉพาะจะทำให้ทราบชนิดของหมู่หน้าที่ (Functional group) ของโมเลกุลภายในโครงสร้างของสารอินทรีย์ โดยแสดงลักษณะสเปกตรัม (Spectrum) ที่มีการดูดกลืนพลังงานอินฟราเรดช่วงความถี่หรือเลขคลื่น (Wavenumber) แตกต่างกัน (Kongmon et al., 2020) ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ GBR และ Puffed GBR ได้ใช้แสงซินโครตรอนย่านพลังงานอินฟราเรดกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Synchrotron-radiation-based Fourier transform infrared, SR-FTIR) รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตราเฉลี่ย SR-FTIR ของ GBR และ Puffed GBR ที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีการหุงที่แตกต่างกัน โดยการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1} พบว่า สเปกตรา SR-FTIR ของ GBR และ Puffed GBR มีลักษณะคล้ายกัน โดยมีพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เด่นชันในเลขคลื่น 3376, 2930, 1658, 1529, 1155, 1082 และ 1155 cm^{-1} โดยพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเลขคลื่น 3500 – 3000 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H) (Erturk and Meral, 2019) พีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเลขคลื่น 2925 และ 2921 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นแบบยืดของ C–H หมู่เมททิลลีน (Methylene group, CH_2) (Junyusen et al., 2022; Vlachose et al., 2006) นอกจากนี้สเปกตรา SR-FTIR ของโปรตีน (Proteins) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) แสดงการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น 1700 – 1500 cm^{-1} และ 1200 – 960 cm^{-1} ตามลำดับ (Kongmon et al., 2020; Junyusen et al., 2022) โดย GBR มีความเข้มของการดูดกลืนที่ 1658 cm^{-1} และ 1529 cm^{-1} สูงกว่า Puffed GBR อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กระบวนการทำพองได้แก่ การเตรียมข้าวกล้องงอกและการทำพองมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนภายใน Puffed GBR

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) ที่ได้จากสเปกตราของ SR-FTIR เลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1} แสดงใน รูปที่ 4.7A โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่า องค์ประกอบร่วม 2 องค์ประกอบได้แก่ องค์ประกอบร่วมที่ 1 (PC-1) และ 2 (PC-2) ของ GBR และ Puffed GBR เป็นตัวแทนของความแปรปรวนทั้งหมด (Total data variation) เท่ากับ 69% โดย PC-1 ได้จำแนก Puffed PS และ Puffed EC ออกจาก GBR, Puffed UPS และ Puffed UEC อย่างชัดเจน และ PC-2 ได้แยก Puffed UPS และ Puffed UEC ออกจากกันชัดเจน เมื่อพิจารณาสเปกตราของ Second derivative SR-

FTIR แสดงใน รูปที่ 4.7B พบว่า การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในเลขคลื่น 1200 – 960 cm^{-1} ซึ่งเป็นช่วงสเปกตรา SR-FTIR ของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) มีความแตกต่างกันของ GBR และ Puffed GBR โดยเฉพาะ Puffed UPS, Puffed UEC, และ GBR แตกต่างกันมากกับ Puffed PS และ Puffed EC จากผลการวิเคราะห์ PCA แสดงให้เห็นว่า การใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการปรับสภาพข้าวก่อนการหุงอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตของ Puffed GBR

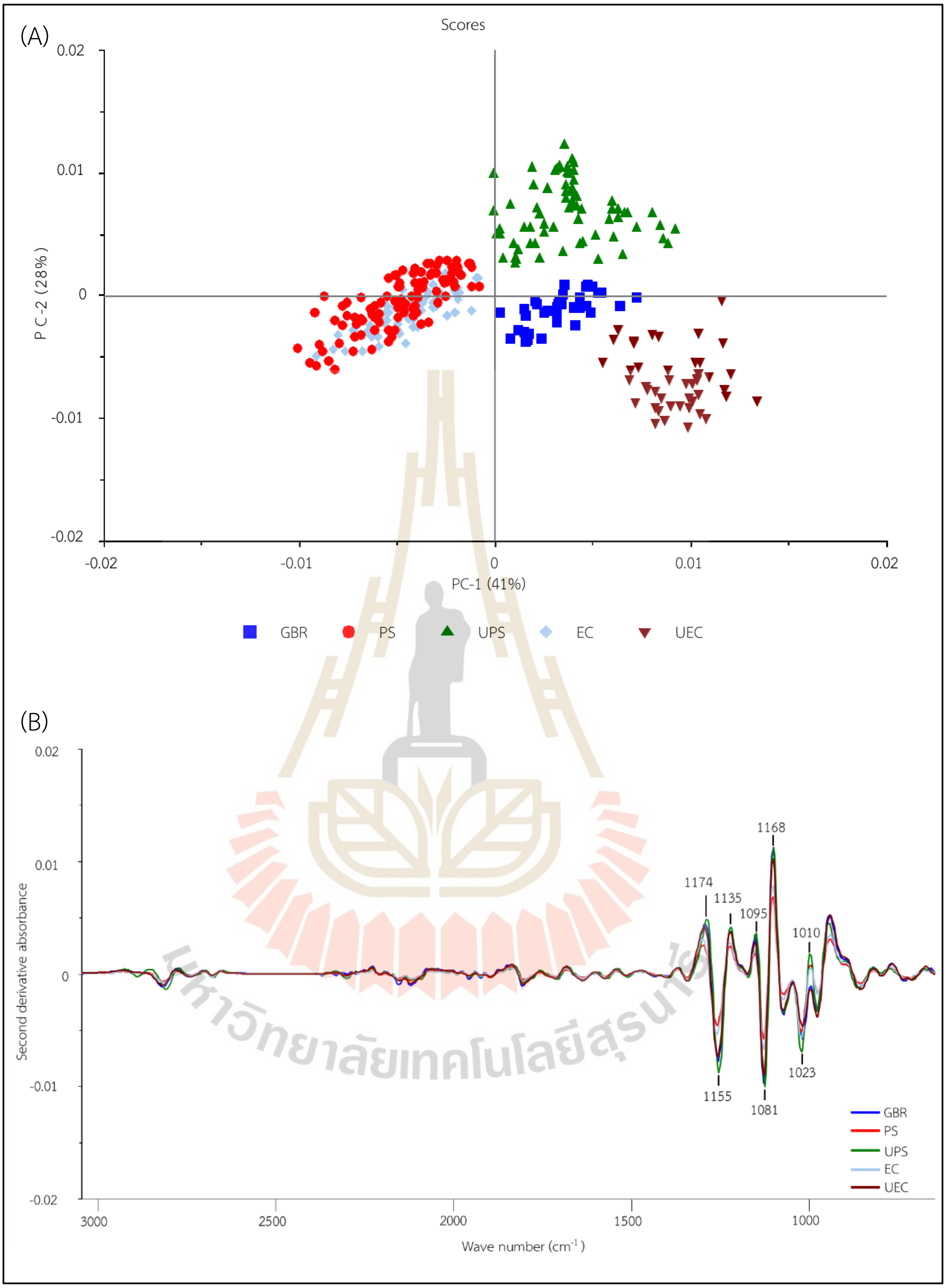
รูปที่ 4.8 แสดงผลการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Hierarchical cluster analysis, HCA) ของ GBR และ Puffed GBR โดยได้สร้างแผนภาพต้นไม้หรือเดนโดรแกรม (Dendrogram) ซึ่งจะช่วยยืนยันผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) พบว่า สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ GBR และ Puffed GBR โดยภายในกลุ่ม Puffed GBR นั้น Puffed UEC และ Puffed UPS มีความใกล้เคียงกันมากกว่า Puffed PS และ Puffed EC ผลการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มนี้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) (รูปที่ 4.7A)

จากรายงานวิจัยของ Kong & Yu (2007) ระบุว่า สเปกตราของโปรตีนและเพปไทด์ประกอบด้วยหมู่เอไมด์ (Amide) A, B, และ I-IV โดย Amide I และ Amide II พบการสั่น (Vibration) เนื่องจากการดูดกลืนแสงมากกว่า Amide อื่น ๆ ทั้งนี้การดูดกลืนแสงของ Amide I ในช่วงเลขคลื่น 1690 – 1600 cm^{-1} ทำให้เกิดการสั่นแบบยืดของพันธะ C=O ประมาณ 80% ซึ่งพบมากในโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน (Secondary structure of protein) ส่วนการดูดกลืนแสงของ Amide II ในช่วงเลขคลื่น 1575 – 1480 cm^{-1} ทำให้เกิดการสั่นแบบงอของพันธะ N-H ประมาณ 40 – 60% ในงานวิจัยนี้ ตารางที่ 4.9 แสดงผลพื้นที่ใต้พีคของสเปกตรา SR-FTIR ของ Amide I และ Amide II ในช่วงเลขคลื่น 1700 - 1617 cm^{-1} และ 1576 - 1493 cm^{-1} พบว่า GBR มีพื้นที่ใต้พีคของ Amide I สูงกว่า Puffed GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ยกเว้น Puffed PS อย่างไรก็ตามพื้นที่ใต้พีคของ Amide II ไม่แตกต่างกันระหว่าง GBR และ Puffed GBR นอกจากนี้ผลรวมของ Amide I และ Amide II ช่วยบ่งบอกถึงปริมาณโปรตีนใน GBR และ Puffed GBR ซึ่งพบว่า การทำพองข้าวกล้องงอกโดยใช้วิธีการหุงข้าวที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีน ยกเว้นการหุงข้าวหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (UCE) ทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคลื่นอัลตราโซนิกมีผลทำให้โครงสร้างของโปรตีนถูกทำลายจากการแตกของฟองอากาศ (Bubbles) จากปรากฏการณ์แคปวิเตชัน (Cavitation) (Phan et al., 2018) จากรายงานวิจัยของ Kongmon et al. (2020) พบว่า ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีพื้นที่ใต้สเปกตราของโปรตีนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย SR-FTIR สูงกว่าที่ได้จากงานวิจัยนี้



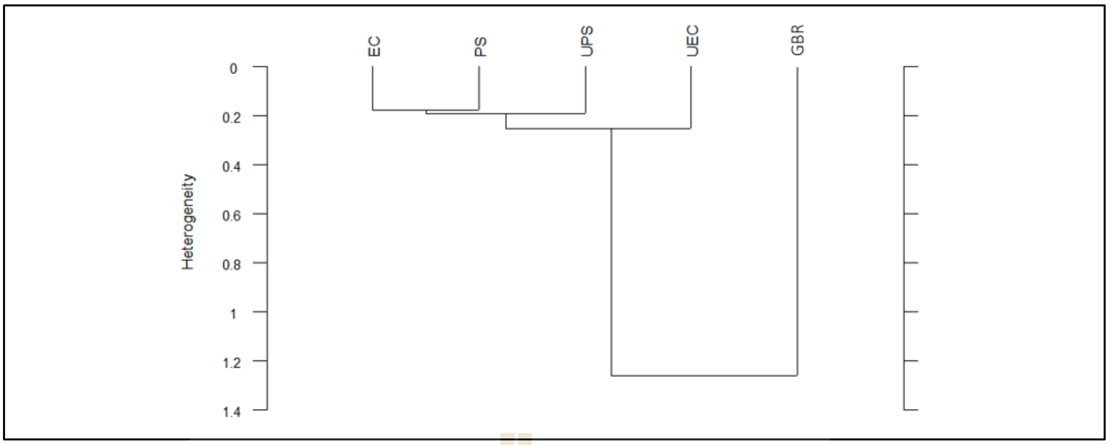
รูปที่ 4.6 สเปกตรา SR-FTIR ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.7 (A) การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) จากสเปกตราของ SR-FTIR โดยมีองค์ประกอบร่วมที่ 1 (PC-1) และ 2 (PC-2) และ (B) การปรับสเปกตรา SR-FTIR ด้วยวิธี Second derivative ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1}



รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มข้อมูล (Hierarchical cluster analysis, HCA) ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ในช่วงเลขคลื่นระหว่าง 3700 – 800 cm^{-1}

ตารางที่ 4.9 พื้นที่ใต้พีคของ amide I และ amide II ของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Amide I (1700 - 1617 cm^{-1})[2]	Amide II (1576 - 1493 cm^{-1})[3]	Amide I and Amide II[4]
GBR	0.0030 ± 0.0010^{a}	0.0013 ± 0.0006^{a}	0.0043 ± 0.0015^{a}
PS	0.0020 ± 0.0000^{ab}	0.0010 ± 0.0000^{a}	0.0030 ± 0.0000^{ab}
UPS	0.0013 ± 0.0006^{b}	0.0007 ± 0.0006^{a}	0.0020 ± 0.0010^{ab}
EC	0.0013 ± 0.0006^{b}	0.0010 ± 0.0000^{a}	0.0023 ± 0.0006^{ab}
UEC	0.0010 ± 0.0000^{b}	0.0007 ± 0.0006^{a}	0.0017 ± 0.0006^{b}

[1] GBR: germinated brown rice, PS: parboiling and steaming, UPS: ultrasound-assisted parboiling and steaming, SS: soaking and steaming, USS: ultrasound-assisted soaking and steaming, EC: electric rice cooker, UEC: ultrasound-assisted electric rice cooker.

[2,3,4] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$).

4.2 ผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

งานวิจัยในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกสุก ซึ่งมีผลต่อการพองตัวของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของระดับและระยะเวลาการใช้ความดันไฮโดรสแตติก และระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่อคุณภาพด้านการพองตัวและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง และ (2) การศึกษาคุณภาพของข้าวกล้องงอกพองที่เตรียมจากสภาวะที่เหมาะสม โดยวิเคราะห์คุณภาพด้านสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี Wide-angle X-ray scattering (WAXS) และการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค

4.2.1 ผลของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

การศึกษาในส่วนนี้ได้หาสภาวะที่เหมาะสมของระดับและระยะเวลาในการใช้ความดันไฮโดรสแตติกกับข้าวกล้องงอกสุก รวมทั้งระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกเพื่อทำให้ข้าวกล้องงอกสุกเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชันก่อนนำไปทำแห้งและทำพองในขั้นต่อต่อไป โดยระดับและระยะเวลาของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกเพื่อปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุก ได้แก่ 2 และ 4 bars เป็นเวลา 2 และ 4 h ตามลำดับ สำหรับการศึกษาระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอก ได้แก่ 0, 4, 24 และ 48 h หลังจากข้าวกล้องงอกสุกได้ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็น ข้าวกล้องงอกสุกได้ถูกนำไปทำแห้งและทำพองเพื่อศึกษาคุณภาพด้านการพองตัวและความกรอบของ Puffed GBR ดังต่อไปนี้

4.2.1.1 อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้างของข้าวกล้องงอกพอง

จาก ตารางที่ 4.10 แสดงผลการทดลองการหาค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้าง (Length and breadth ration, L/B) ของเมล็ดข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ได้จากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับและระยะเวลาแตกต่างกัน รวมทั้งระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกก่อนการทำแห้งและทำพอง โดย L/B ช่วยบ่งบอกอัตราการพองตัวของ Puffed GBR ได้ โดยค่า L/B ต่ำ แสดงถึงค่าอัตราการพองของเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น (Mir et al., 2016) ในการศึกษานี้พบว่า การเพิ่มระยะเวลาของการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกจาก 0 h เป็น 48 h ของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (control) และตัวอย่างที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 2 h และ 4 h และที่ 4 bars นาน 2 h ทำให้ Puffed GBR มีค่า L/B ลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระหว่างการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกมีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีภายในเมล็ดข้าวกล้องงอกสุกเปลี่ยนแปลงไป โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพ

คตินเกิดการจัดเรียงตัวใหม่และสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุล ซึ่งเรียกว่า สตาร์ชเกิดการคืนตัวหรือเกิดรีโทรเกรเดชัน และเมื่อนำข้าวไปทำแห้งมีผลทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวแข็งแรงมากขึ้น การทำพองโดยใช้อุณหภูมิสูงส่งผลให้น้ำภายในเมล็ดข้าวระเหยอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นแรงดันไอภายในเมล็ดข้าวดันให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวพองตัว เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่และเมล็ดข้าวมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง (Pompe et al., 2020) อย่างไรก็ตามการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 4 bars นาน 4 h และระยะเวลาการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกระหว่าง 0 – 48 h ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนค่า L/B ของ Puffed GBR ($p>0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระดับความดันที่สูงและการใช้ความดันเป็นเวลานานมีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกสุกเกิดการคืนตัวหรือเกิดรีโดรเกรดันชันมากเกินไป ทำให้ระหว่างการทำพองนั้นแรงดันไอน้ำภายในเมล็ดข้าวไม่เพียงพอต่อการดันโครงสร้างภายในที่แข็งแรงมากให้พองตัว ซึ่งทำให้ Puffed GBR มีการพองตัวที่ต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบผลของระดับและระยะเวลาของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่แต่ละระยะเวลาการแช่เย็นข้าวกล้อง พบว่า การใช้ระดับความดันที่สูงและการใช้ความดันเป็นเวลานาน (4 bars 4 h) มีผลทำให้การพองตัวเพิ่มมากขึ้น (ค่า L/B ต่ำลง) อย่างไรก็ตามหากระยะเวลาการแช่เย็นข้าวนาน 48 h การใช้ระดับความดันที่สูงและการใช้ความดันเป็นเวลานานมีผลทำให้การพองตัวต่ำ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมในการทำให้ Puffed GBR มีความพองตัวมากขึ้น (ค่า L/B ต่ำลง) คือ การใช้ระดับความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 2 h และ 4 h และที่ 4 bars นาน 2 h และระยะเวลาในการแช่เย็นนาน 48 h

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.10 อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

L/B	control	2bars[1]		4bars[1]	
		2h	4h	2h	4h
0h	-	2.72 ± 0.30^{aAB}	2.70 ± 0.32^{aAB}	2.88 ± 0.30^{aA}	2.60 ± 0.29^{aB}
4h	2.77 ± 0.34^{aAB}	2.73 ± 0.29^{aAB}	2.76 ± 0.28^{aAB}	2.89 ± 0.43^{aA}	2.61 ± 0.27^{aB}
24h	2.58 ± 0.33^{bA}	2.58 ± 0.21^{abA}	2.58 ± 0.31^{abA}	2.76 ± 0.25^{aA}	2.67 ± 0.35^{aA}
48h	2.43 ± 0.23^{bB}	2.51 ± 0.23^{bB}	2.47 ± 0.33^{bB}	2.49 ± 0.26^{bB}	2.77 ± 0.40^{aA}

[1] The values are means of thirty replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between treatments ($p<0.05$). Different uppercase letters in the same row indicate statistical differences between treatments ($p<0.05$).

4.2.1.2 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของข้าวกล้องงอกสุกด้วยเทคนิค Wide-angle X-ray scattering (WAXS)

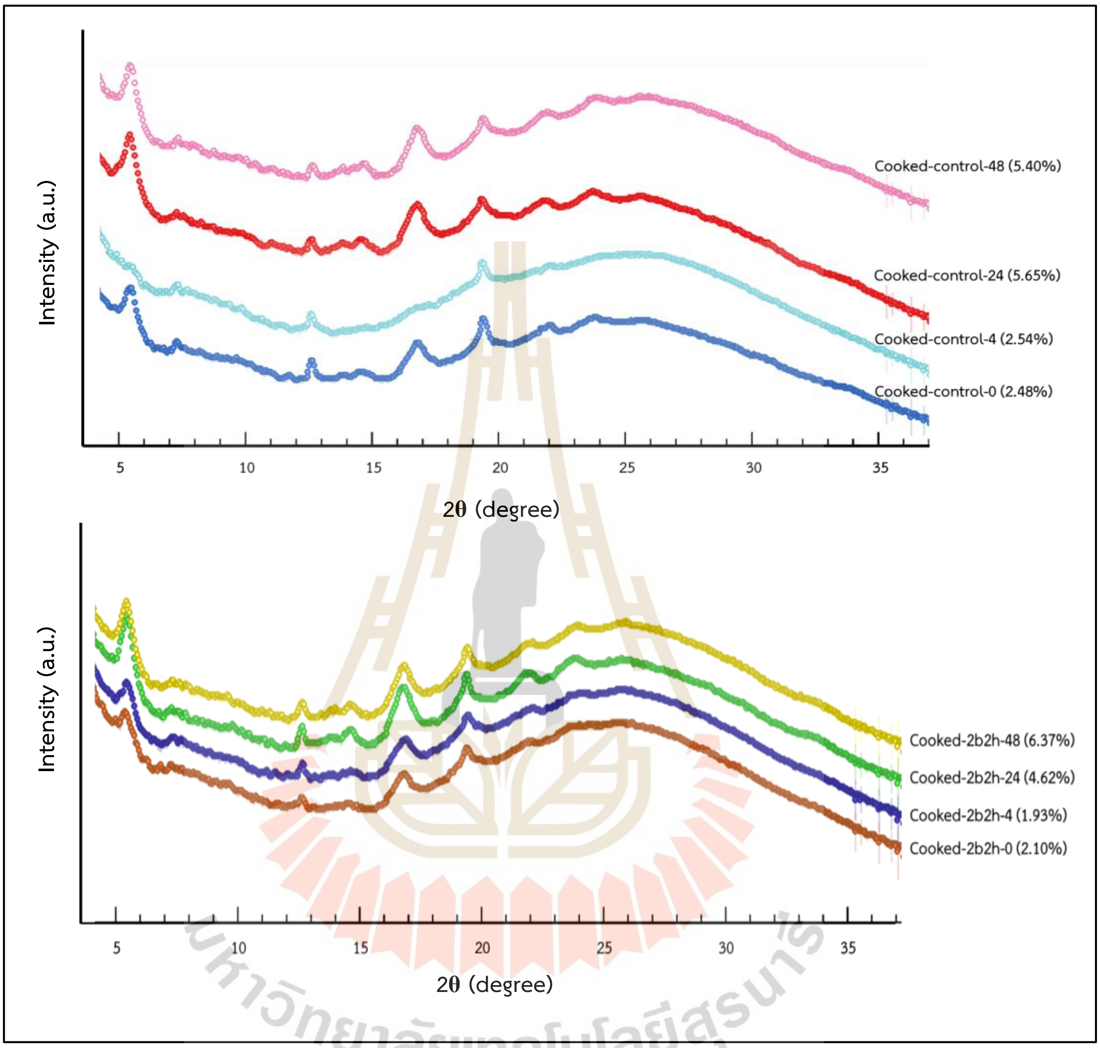
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของสตาร์ชข้าวกล้องงอกสุกที่ได้จากการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับและระยะเวลาต่าง ๆ รวมทั้งระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกด้วยใช้เทคนิค WAXS ทั้งนี้การเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผลึกของข้าวก่อนและหลังการทดลองช่วยบ่งบอกถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของสตาร์ชข้าวได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อคุณภาพด้านความพองและความกรอบของข้าวกล้องงอกพอง จากรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะ WAXS curves ที่ 2θ ระหว่าง 3° – 35° และความเป็นผลึก (Relative crystallinity) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ได้จากการเตรียมที่แตกต่างกัน และตารางที่ 4.11 แสดงผลของพื้นที่ใต้พีค (Peak area) ที่ได้จากการอินทิเกรตพีคจาก WAXS curves ซึ่งพบพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5°, 16.8°, 19.4°, 21.8° และ 23.8° ตามลำดับ

จากลักษณะของ WAXS curves ที่ 2θ เท่ากับ 5.5°, 16.8°, 19.4°, 21.8° และ 23.8° (รูปที่ 4.9) พบว่า โครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวกล้องงอกสุกสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชแบบ B-type และ V-type ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวอย่างข้าวกล้องงอกสุกได้ผ่านการทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วย WAXS นอกจากนี้ระหว่างการเก็บรักษาโดยการแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 0 – 48 h มีผลทำให้สตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชันและอาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมัน (Amylose-lipid complex)

(Buleon et al.,1998; Kumar & Prasad, 2018; พามขุดทด, 2560) จาก Pozo et al. (2018) รายงานว่า โครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของสตาร์ชธรรมชาติ (Native starch) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ A-type, B-type และ C-type จากการศึกษาด้วย X-ray diffraction (XRD) จะพบลักษณะของพีคที่ 2θ แตกต่างกัน กล่าวคือ A-type จะพบพีคใหญ่ (Major peak) ที่ 2θ เท่ากับ 15.05°, 17.09°, 17.92° and 23.00° และพีคเล็กที่ 2θ เท่ากับ 11.27° และ 26.33° โดย A-type สามารถพบได้ทั้งในสตาร์ชจากข้าว ธัญพืช และข้าวโพด เป็นต้น ส่วน B-type สามารถพบได้ในสตาร์ชจากข้าวที่มีอะมิโลสสูง ซึ่งพบพีคใหญ่ที่ 2θ เท่ากับ 15.26°, 17.21°, 19.75°, 22.32° และ 24.08° และพีคเล็กที่ 2θ เท่ากับ 5.81° และ 26.10° และสตาร์ช C-type เป็นการผสมกันระหว่าง A-type และ B-type สามารถพบได้ในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว ซึ่งจะพบพีคที่ 2θ เท่ากับ 15.06°, 17.09°, 19.34° และ 22.86° อย่างไรก็ตาม Kumar & Prasad (2018) รายงานว่า โครงสร้างผลึกแบบ V-type เป็นโครงสร้างผลึกที่พบได้หลังจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสกับหมู่ฟังชันก์ของกรดไขมันและโปรตีน โดยจะปรากฏที่ 2θ เท่ากับ 17.85° และ 24.75° นอกจากนี้ Dupuis et al. (2014) รายงานว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะมิโลสและไขมันส่งผลให้สตาร์ชเกิดการพองตัว (Starch swelling) น้อยลง ซึ่งส่งเสริมต่อการเกิดสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Resistant starch, RS) จาก รูปที่ 4.9 พบว่า ความเป็นผลึก (Relative crystallinity) ของข้าวกล้องงอกสุกมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่เย็นนานมากขึ้นทั้งข้าวที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกมีผลต่อความเป็นผลึก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากระหว่างการแช่เย็นนั้นเกิดรีโทรเกรดันของโมเลกุลสตาร์ชในข้าวสุก ซึ่งมีผลทำให้มีความเป็นผลึกของข้าวเพิ่มมากขึ้น (Nagataki et al., 2018) จากงานวิจัยของ Buleon et al. (1998) พบว่า สตาร์ชที่มีความเป็นผลึกมากขึ้น ส่งผลให้เกิดสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มากขึ้น

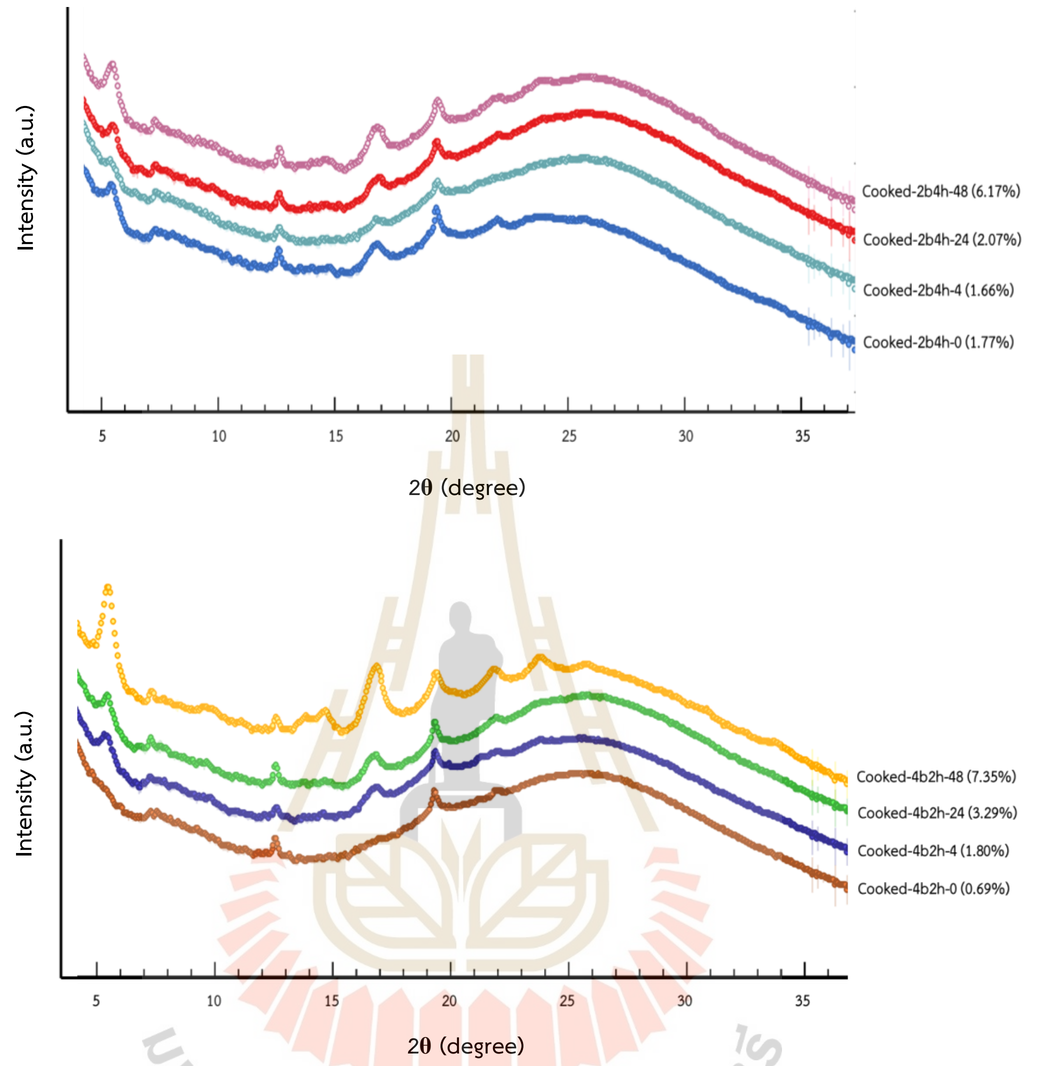
นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคและลักษณะของ WAXS curves (ตารางที่ 4.11) พบว่า ที่ 2θ เท่ากับ 5.5° มีพื้นที่ใต้พีคและความสูงของพีคเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาของการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกเพิ่มขึ้นจาก 0 h เป็น 48 h ซึ่งการเกิดพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5° อาจแสดงได้ถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชหลังจากแช่เย็น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nagataki et al. (2018) ซึ่งรายงานว่า การแช่เย็นข้าวสุกที่อุณหภูมิ 5°C เป็นเวลานาน 1, 3, 4 และ 5 วัน มีผลทำให้เกิดพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5° มากกว่าเมื่อเทียบกับข้าวสุกที่ไม่ผ่านการแช่เย็น (ไม่พบพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5°) นอกจากนี้ความสูงของพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5° เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่เย็นนานมากขึ้น ทั้งนี้การปรากฏของพีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5° ช่วยบ่งบอกถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวหลังจากการแช่เย็น โดยการเกิดรีโทรเกรเดชันทำให้การเกิดโครงสร้างผลึก (Crystalline structure) ของสตาร์ชภายในเมล็ดข้าวสุกนั่นเอง จากงานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของ

ระดับความดันไฮโดรสแตติกจาก 2 bars เป็น 4 bars และระยะเวลาการแช่เย็นข้าวนาน 48 h ส่งผลให้พีคที่ 2θ เท่ากับ 5.5° มีพื้นที่ใต้พีคและความสูงของพีคเพิ่มมากขึ้น

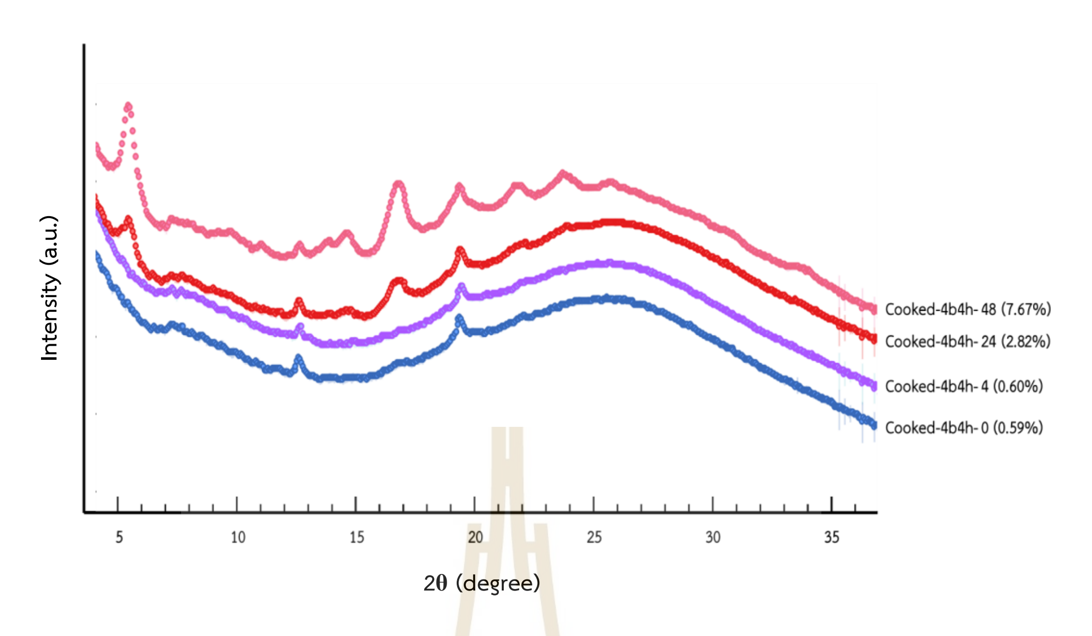


รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็นเป็นเวลา 0 – 48 h

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็นเป็นเวลา 0 – 48 h (ต่อ)



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วย Wide-angle X-ray scattering (WAXS) ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็นเป็นเวลา 0 – 48 h (ต่อ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.11 พื้นที่ใต้พีคของ WAXS curves ของข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านปรับสภาพด้วยความดันไฮโดรสแตติกและการแช่เย็นเป็นเวลา 0 – 48 h

Treatment[1]	5.5°	16.8°	19.4°	21.8°	23.8°
Cooked-control-0	0.14	0.11	0.13	0.02	0.03
Cooked-control-4	0.01	0.19	0.15	ND	ND
Cooked-control-24	0.26	0.33	0.22	0.03	0.03
Cooked-control-48	0.17	0.16	0.13	0.03	0.04
Cooked-2b2h-0	0.12	0.06	0.09	ND	ND
Cooked-2b2h-4	0.08	0.11	0.12	0.01	0.00
Cooked-2b2h-24	0.25	0.20	0.09	0.03	0.04
Cooked-2b2h-48	0.18	0.14	0.12	0.03	0.03
Cooked-2b4h-0	0.06	0.10	0.12	ND	ND
Cooked-2b4h-4	0.02	0.05	0.17	0.00	0.00
Cooked-2b4h-24	0.04	0.06	0.11	0.01	0.00
Cooked-2b4h-48	0.13	0.14	0.14	0.04	0.05
Cooked-4b2h-0	0.00	ND	0.10	ND	ND
Cooked-4b2h-4	0.05	0.05	0.12	ND	ND
Cooked-4b2h-24	0.09	0.10	0.13	0.02	0.01
Cooked-4b2h-48	0.44	0.35	0.17	0.06	0.08
Cooked-4b4h-0	0.00	ND	0.13	ND	ND
Cooked-4b4h-4	0.00	ND	0.09	ND	ND
Cooked-4b4h-24	0.10	0.11	0.15	0.02	0.01
Cooked-4b4h-48	0.43	0.28	0.20	0.05	0.07

[1] Control: without hydrostatic pressure treatment, 2b2h: 2 bars for 2 h, 2b4h: 2 bars for 4 h, 4b2h: 4 bars for 2 h, 4b4h: 4 bars for 4 h, and 0, 4, 24, 48 denote refrigerating of cooked rice for 0, 4, 24, and 48 h.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

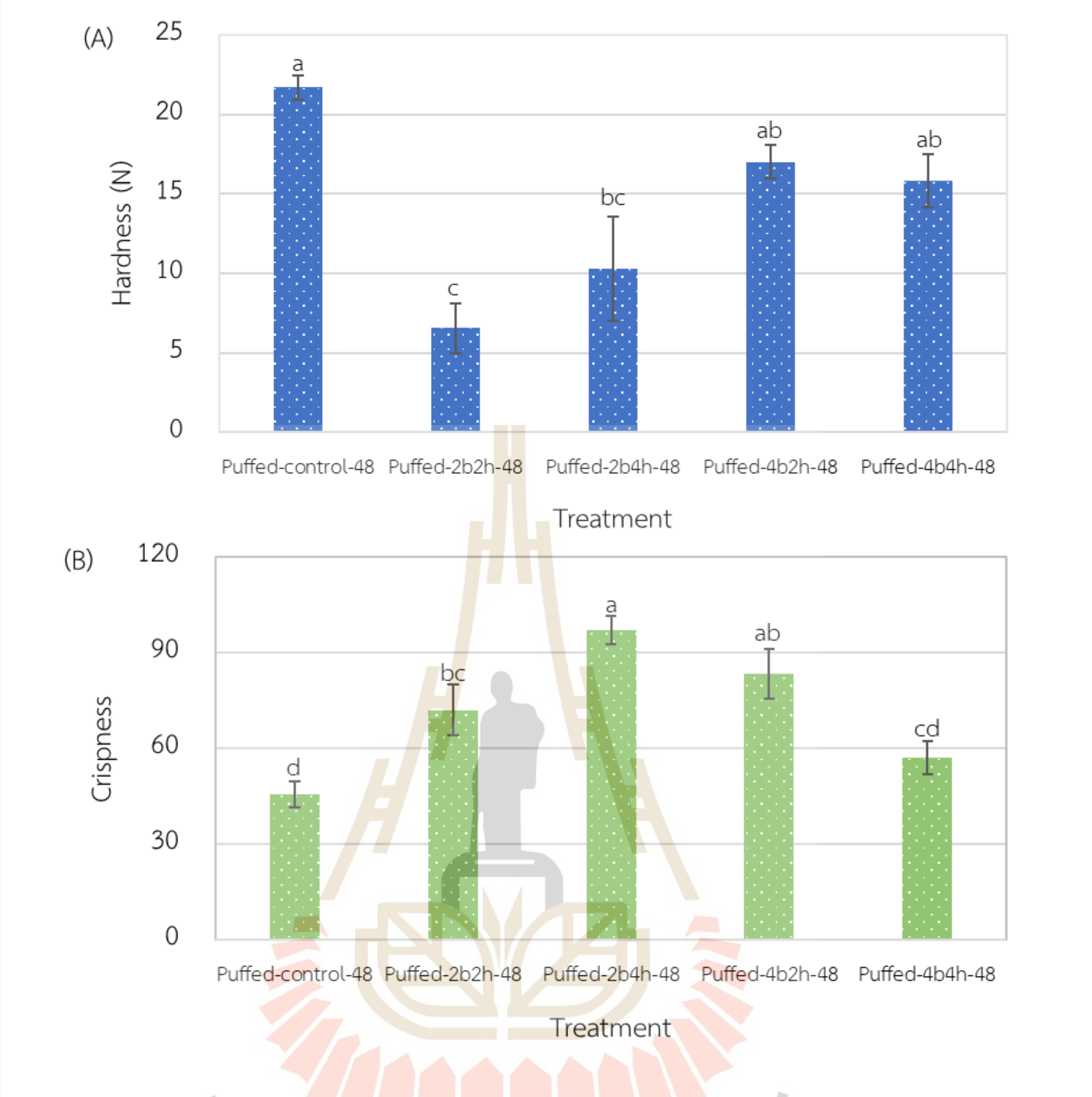
จากผลการทดลองการหาค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้าง (L/B) ซึ่งพบว่าการเพิ่มระยะเวลาการแช่เย็นข้าวเป็น 48 h ส่งให้ข้าวกล้องงอกพองมีความพองมากขึ้น (ค่า L/B ต่ำ) และความเป็นผลึก (Relative crystallinity) ของข้าวกล้องงอกสุกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ได้จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกโดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Control) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars และ 4 bars นาน 2 h และ 4 h ก่อนแช่เย็นนาน 48 h มาวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสและการเปลี่ยนแปลงด้านสีของข้าวกล้องงอกพองต่อไป

4.2.1.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง

รูปที่ 4.10 แสดงผลลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (Hardness) และความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความแข็ง (รูปที่ 4.10 A) ของ Puffed-control-48 มีค่าสูงสุด (21.72 N) การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 2 bars นาน 2 และ 4 h กับข้าวกล้องงอกสุกก่อนนำไปแช่เย็นนั้น มีผลต่อการลดลงของค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยค่าความแข็งมีค่าเท่ากับ 6.57 และ 10.29 N ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 4 bars นาน 2 และ 4 h ทำให้ค่าความแข็งลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ Puffed-control-48 ซึ่งมีค่าความแข็งเท่ากับ 17.02 และ 15.83 N ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ค่าความกรอบ (Crispness) ของ Puffed GBR (รูปที่ 4.10 B) พบว่า มีค่าความกรอบอยู่ระหว่าง 45.67 – 97.00 โดย Puffed-2b4h-48 และ Puffed-4b2h-48 มีค่าความกรอบสูงกว่า Puffed-control-48 และ Puffed-4b4h-48 อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดันต่ำ (2 bars) ระยะเวลานาน (4 h) และที่ระดับความดันสูงกว่า (4 bars) ระยะเวลาสั้นกว่า (2 h) มีผลต่อการเพิ่มค่าความกรอบของ Puffed GBR นอกจากนี้การใช้ความดันสูงและระยะเวลานาน (4 bars 4 h) ลดค่าความกรอบของ Puffed GBR ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระดับความดันที่สูงและการใช้ความดันเป็นเวลานานมีผลทำให้โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกสุกเกิดรีโดรเกรดันชันมากเกินไป ทำให้ระหว่างการทำพองนั้นแรงดันไอน้ำภายในเมล็ดข้าวไม่เพียงพอต่อการดันโครงสร้างภายในที่แข็งแรงมากทำให้ Puffed GBR มีการพองตัวที่ต่ำ และความกรอบต่ำลง

จากผลการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า เลือกการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดันต่ำ (2 bars) ระยะเวลานาน (4 h) และที่ระดับความดันสูงกว่า (4 bars) ระยะเวลาสั้นกว่า (2 h) เพื่อให้ได้ Puffed-2b4h-48 และ Puffed-4b2h-48 ที่มีค่าความกรอบสูง เหมาะที่จะนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพในหัวข้อ 4.2.2



รูปที่ 4.10 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน (A) ความแข็ง (Hardness) และ (B) ความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับและระยะเวลาในการใช้ความดันไฮโดรสแตติกกับข้าวกล้องงอกสุก รวมทั้งระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกเพื่อทำให้ข้าวกล้องงอกสุกเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชันก่อนนำไปทำแห้งและทำพอง โดยระดับและระยะเวลาของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกเพื่อปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุก ได้แก่ 2 และ 4 bars เป็นเวลา 2 และ 4 h ตามลำดับ สำหรับการศึกษาระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอก ได้แก่ 0, 4, 24, และ 48 h สามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้าง (L/B) ของข้าวกล้องงอกพอง มีค่าต่ำลง (อัตราการพองสูงขึ้น) เมื่อเพิ่มระยะเวลาการแช่เย็นข้าวเป็น 48 h แต่การใช้ระดับความดันไฮโดรสแตติกที่สูง (4 bars) และนาน (4 h) มีผลทำให้การพองตัวต่ำ ความเป็นผลึก (Relative crystallinity) ของข้าวกล้องงอกสุกและความสูงของพีคที่ 5.5° เพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการแช่เย็นนานมากขึ้น (48 h) ทั้งนี้การปรากฏของพีคที่ 5.5° ช่วยบ่งบอกถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ชข้าวหลังจากการแช่เย็น นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของระดับความดันไฮโดรสแตติกจาก 2 bars เป็น 4 bars และระยะเวลาการแช่เย็นข้าวนาน 48 h ส่งผลให้พีคที่ 5.5° มีพื้นที่ใต้พีคและความสูงของพีคเพิ่มมากขึ้น การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดันต่ำ (2 bars) ระยะเวลานาน (4 h) และที่ระดับความดันสูง (4 bars) ระยะเวลาสั้นกว่า (2 h) มีผลทำให้ได้ข้าวกล้องงอกพอง (Puffed-2b4h-48 และ Puffed-4b2h-48) ที่มีความกรอบสูง ดังนั้น ในการทดลองในหัวข้อ 4.2.2 จึงได้นำ Puffed-2b4h-48 และ Puffed-4b2h-48 มาวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เคมี และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่อไป

4.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

การศึกษาในหัวข้อนี้เกี่ยวกับการวิเคราะห์คุณภาพด้านสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วย SR-FTIR และ Wide-angle X-ray scattering (WAXS) และการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ซึ่ง Puffed GBR ที่นำมาวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ที่ได้จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกจากสภาวะที่เหมาะสมของระดับและระยะเวลาการใช้ความดันไฮโดรสแตติก และระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกก่อนนำไปทำแห้งและทำพอง (หัวข้อ 4.2.1) โดยสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 4 h และ 4 bars นาน 2 h ก่อนนำไปแช่เย็นข้าวที่อุณหภูมิ 4°C นาน 48 h

4.2.2.1 ปริมาณผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องงอกพอง

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดยการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตทั้งหมดได้มาจากการคำนวณอัตราส่วนของน้ำหนักของข้าวกล้องงอกพองต่อน้ำหนักของข้าวกล้องงอกเริ่มต้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุก

โดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Puffed-control) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 4 h (Puffed-2b4h) และ 4 bars นาน 2 h (Puffed-4b2h) มีปริมาณผลผลิตทั้งหมดระหว่าง 45.24 – 46.92% ทั้งนี้การใช้ความดันไฮโดรสแตติกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทั้งหมดของข้าวกล้องงอกพอง ($p>0.05$) อย่างไรก็ตาม ปริมาณผลผลิตข้าวพองซึ่งวิเคราะห์ได้จากการคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำหนักข้าวกล้องงอกพองต่อน้ำหนักข้าวแห้งก่อนการทำพอง พบว่า มีค่าอยู่ระหว่าง 89.03 – 91.74% ซึ่งปริมาณผลผลิตข้าวพองของ Puffed-4b2h มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระหว่างการทำพองนั้น Puffed-4b2h มีการแตกหักได้ง่ายกว่า เนื่องจากสามารถความพองตัวได้เร็วและมีความพองตัวสูงกว่าข้าวกล้องงอกพองอื่น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณผลผลิตลดต่ำลง

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density), อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้าง (Length/breadth ratio, L/B) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกโดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Puffed-control) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 4 h (Puffed-2b4h) และ 4 bars 2 h (Puffed-4b2h) จากผลการทดลองพบว่า ข้าวกล้องงอกพองมีความหนาแน่นปรากฏระหว่าง 0.33 – 0.41 g/ml โดย Puffed-4b2h มีค่าความหนาแน่นปรากฏต่ำกว่า Puffed-control อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ค่า L/B อยู่ระหว่าง 2.36 – 2.72 ซึ่ง Puffed-4b2h มีค่า L/B ต่ำกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากรายงานของ Mir et al. (2016) ระบุว่า L/B ช่วยบ่งบอกอัตราการพองตัวของ Puffed GBR ได้ โดยค่า L/B ต่ำ แสดงถึงค่าอัตราการพองของเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้น จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า Puffed-4b2h มีอัตราการพองตัวสูงกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์หาอัตราการพองตัว (Expansion ratio) โดยหาได้จากการคำนวณอัตราส่วนของปริมาตรข้าวกล้องงอกพองต่อปริมาตรของข้าวแห้งก่อนการทำพอง พบว่า อัตราการพองตัวอยู่ระหว่าง 1.34 – 1.45 ซึ่งวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกทั้งไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการพองของข้าวกล้องงอกพอง ($p>0.05$) อย่างไรก็ตาม แนวโน้มอัตราการพองตัวของ Puffed-4b2h สูงกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h

ตารางที่ 4.12 ปริมาณผลผลิตทั้งหมด (Total yield) และปริมาณผลผลิตข้าวพอง (Puffed yield) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Total yield (%)[2]	Puffed yield (%)[3]
Puffed-control	46.92 ± 2.07[a]	91.74 ± 1.59[a]
Puffed-2b4h	46.25 ± 1.18[a]	91.00 ± 0.56[ab]
Puffed-4b2h	45.24 ± 1.85[a]	89.03 ± 1.46[b]

[1] Puffed-control: without hydrostatic pressure treatment, Puffed-2b4h: with hydrostatic pressure at 2 bars for 4 h, Puffed-4b2h: with hydrostatic pressure at 4 bars for 2 h.

[2,3] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between treatments ($p<0.05$).

ตารางที่ 4.13 ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) อัตราส่วนของความยาวต่อความกว้าง (Length/breadth ratio) และอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Bulk density (g/ml)[2]	L/B[3]	Expansion ratio[4]
Puffed-control	0.41 ± 0.04[a]	2.72 ± 0.44[a]	1.36 ± 0.12[a]
Puffed-2b4h	0.40 ± 0.04[ab]	2.67 ± 0.23[a]	1.34 ± 0.13[a]
Puffed-4b2h	0.33 ± 0.01[b]	2.36 ± 0.21[b]	1.45 ± 0.23[a]

[1] Puffed-control: without hydrostatic pressure treatment, Puffed-2b4h: with hydrostatic pressure at 2 bars for 4 h, Puffed-4b2h: with hydrostatic pressure at 4 bars for 2 h.

[2,3,4] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between treatments ($p<0.05$).

4.2.2.2 สมบัติทางเคมีของข้าวกล้องงอกพอง

ตารางที่ 4.14 แสดงผลปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ปริมาณเถ้า (Ash content) และปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl content) ของข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกโดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Puffed-control) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 4 h (Puffed-2b4h) และ 4 bars นาน 2 h (Puffed-4b2h) และเปรียบเทียบกับข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกพอง (2.50 – 4.53%) มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องงอก (8.50%) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้อาจเพราะกระบวนการทำพองซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงและระยเวลาสั้น มีผลทำให้ความชื้น (น้ำ) ภายในเมล็ดของข้าวแห้งก่อนการทำพอง ระเหยอย่างรวดเร็วและเกิดเป็นแรงดันไอภายในเมล็ดข้าวดันให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวพองตัว ส่งผลให้ข้าวกล้องงอกพองมีความชื้นลดลง โดยปริมาณความชื้นของข้าวแห้งก่อนการทำพองของ Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีค่าเท่ากับ 10.87%, 12.93% และ 12.93% ตามลำดับ (ไม่ได้แสดงผลในตาราง) ซึ่งปริมาณความชื้นก่อนการทำพองควรมีค่าระหว่าง 10 – 14 % (Saha & Roy, 2020; Huang et al., 2018; Maisont & Narkrugsa, 2009) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกพอง พบว่า Puffed-4b2h มีปริมาณความชื้น (2.50%) ต่ำกว่า Puffed-control (4.53%) และ Puffed-2b4h (3.07%) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระดับแรงดันที่ 4 bars และระยะเวลานาน 2 h มีความเหมาะสมที่ทำให้โครงสร้างทางเคมีของข้าวกล้องงอกสุกเกิดการคืนตัวหรือเกิดรีโดรเกรดันชัน เมื่อนำไปทำแห้งทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวแข็งแรง และระหว่างการทำพองแรงดันไอน้ำสามารถดันโครงสร้างภายในของข้าวทำให้เกิดการพองตัวและระเหยน้ำออกได้ดี จาก Saha & Roy (2020) รายงานว่า ข้าวพอง (Puffed rice) มีปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 1.15 – 1.37% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นของข้าวกล้องงอกพองในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.723/2548) ระบุว่า ปริมาณความชื้นของข้าวพองต้องไม่เกิน 10%

ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) เป็นค่าที่บ่งบอกถึง ปริมาณน้ำที่ไม่ถูกยึดเหนี่ยวภายในอาหาร หรือน้ำที่ถูกนำไปใช้ดำเนินกิจกรรม (activity) ทางเคมีและจุลชีววิทยาได้ ซึ่งมีผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร รวมถึงอายุการเก็บรักษาของอาหาร (Santillana Farakos & Frank, 2014) โดย Puffed-4b2h มีค่า a_w เท่ากับ 0.13 ซึ่งต่ำกว่า Puffed-control (0.24) และ Puffed-2b4h (0.27) อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามข้าวกล้องงอกพองในงานวิจัยนี้มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งขององค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (US Food and Drug Administration, 2016) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ข้าวกล้องงอกพอง (Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h) มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 10% และค่า

a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งมีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.723/2548) และมีความปลอดภัยด้านจุลชีววิทยา

ปริมาณเถ้า (Ash content) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์แร่ธาตุต่าง ๆ ที่เหลืออยู่ในรูปของเถ้า (Saha & Roy, 2022) จากผลการทดลองใน ตารางที่ 4.15 พบว่า ข้าวกล้องงอก (GBR) มีปริมาณเถ้า 1.41% และข้าวกล้องงอกพองมีปริมาณเถ้าระหว่าง 1.85 – 2.01% โดยปริมาณเถ้าของข้าวกล้องงอกพองมีค่าสูงกว่า GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มาเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน (Heating medium) ในระหว่างการทำพอง แทนการใช้น้ำมันพืช ซึ่งการใช้ NaCl ส่งผลให้ค่าปริมาณเถ้าของ Puffed GBR เพิ่มขึ้น

ปริมาณโซเดียมคลอไรด์ของข้าวกล้องงอกพองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.38 – 0.63% โดยไม่พบใน GBR ทั้งนี้ Puffed-4b2h มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ค่าต่ำกว่า Puffed-control อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะผิวของ Puffed-control ค่อนข้างขรุขระและพองตัวน้อยเมื่อเทียบกับ Puffed-4b2h ซึ่งมีผิวเรียบและพองตัวได้มากกว่าโดยจากการสังเกตด้วยตาเปล่า และดังแสดงใน รูปที่ 4.11 (ซึ่งอาจส่งผลให้เกลือที่ใช้ระหว่างการทำพองติดมาที่ผิวของ Puffed-control มากกว่านั่นเอง) นอกจากนี้ภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคโดยใช้ FE-SEM (รูปที่ 4.14) ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะผิวของข้าวกล้องงอกพองซึ่งพบว่า Puffed-control มีผิวที่ขรุขระมากกว่า Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h เมื่อคำนวณปริมาณโซเดียมในข้าวกล้องงอกพอง พบว่า Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีปริมาณโซเดียมเท่ากับ 252, 208, และ 152 mg ตามลำดับ ต่อปริมาณข้าวกล้องงอกพอง 100 g ซึ่งเกณฑ์การใช้เกลือในอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขคือการใช้เกลือต่ำกว่า 1% ของน้ำหนักอาหาร นอกจากนี้ World Health Organization (WHO) แนะนำการรับประทานเกลือควรน้อยกว่าวันละ 5 g หรือโซเดียมน้อยกว่า 2000 mg

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	Moisture content (%)[2]	a_w[3]	Ash content (%)[4]	NaCl content (%)[5]
GBR	8.50 ± 0.00[a]	0.86 ± 0.00[a]	1.41 ± 0.43[b]	ND
Puffed-control	4.53 ± 0.06[b]	0.24 ± 0.01[c]	2.01 ± 0.18[a]	0.63 ± 0.25[a]
Puffed-2b4h	3.07 ± 0.21[c]	0.27 ± 0.00[b]	1.97 ± 0.09[a]	0.52 ± 0.09[ab]
Puffed-4b2h	2.50 ± 0.17[d]	0.13 ± 0.01[d]	1.85 ± 0.07[a]	0.38 ± 0.05[b]

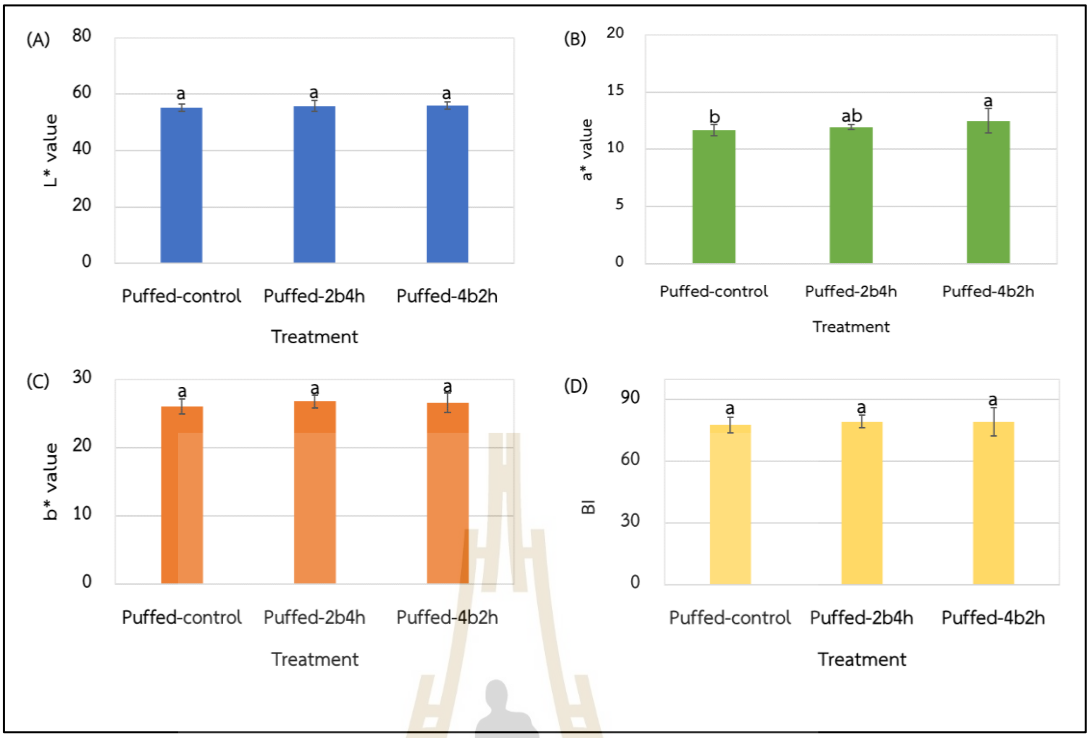
[1] GBR: germinated brown rice, Puffed-control: without hydrostatic pressure treatment, Puffed-2b4h: with hydrostatic pressure at 2 bars for 4 h, Puffed-4b2h: with hydrostatic pressure at 4 bars for 2 h, ND: not detected.

[2,3,4,5] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between treatments ($p<0.05$).

4.2.2.3 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง

รูปที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง ซึ่งค่าความสว่าง (L*) บ่งบอกถึงค่าความสว่างโดยค่ามีแนวโน้มไปทางบวกแสดงถึงสีขาว ส่วนค่ามีแนวโน้มไปทางลบแสดงถึงสีดำ ค่าความเป็นสีแดง (a*) บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีแดงไปจนถึงเขียว หากค่ามีแนวโน้มไปทางบวกแสดงถึงสีแดง ส่วนค่ามีแนวโน้มไปทางลบแสดงถึงสีเขียว ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีเหลืองไปจนถึงน้ำเงิน หากค่ามีแนวโน้มไปทางบวกแสดงถึงสีเหลือง ส่วนค่ามีแนวโน้มไปทางลบแสดงถึงสีน้ำเงิน และ Browning index (BI) แสดงถึง ความเข้มของสีน้ำตาลของข้าวกล้องงอกพอง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ พบว่า Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีค่า L* อยู่ระหว่าง 55.25 – 56.00 a* อยู่ระหว่าง 11.68 – 12.49 b* อยู่ระหว่าง 26.04 – 26.74 และ BI อยู่ระหว่าง 77.74 – 79.42 ทั้งนี้การเตรียมข้าวกล้องงอกสุกโดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Puffed-control) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L* b* และ BI อย่างไรก็ตาม ค่า a* ของ Puffed-4b2h สูงกว่าของ Puffed-control อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

รูปที่ 4.11 ข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ที่ผ่านการปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุกด้วยการใช้ความดันไฮโดรสแตติก



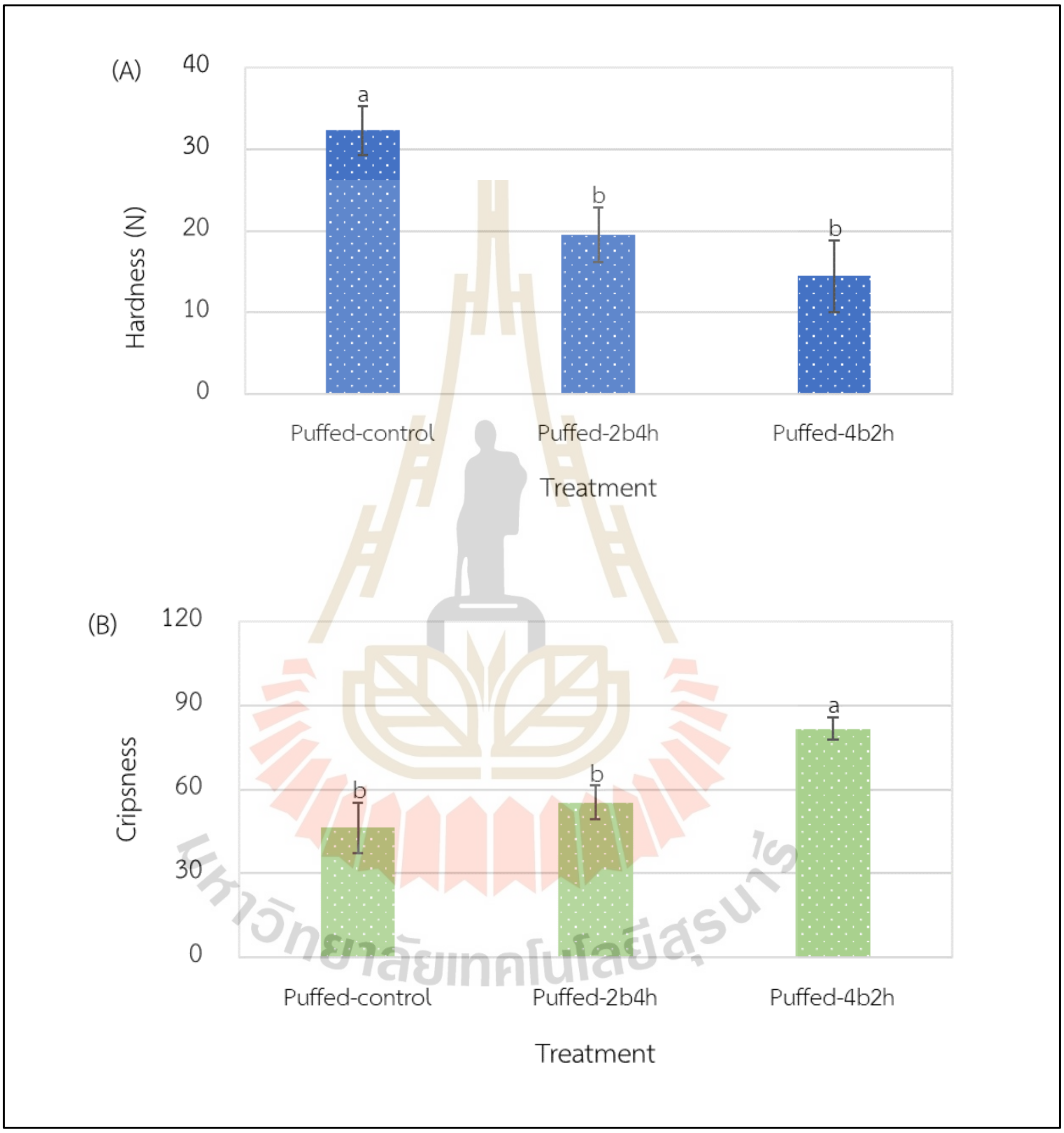
รูปที่ 4.12 ค่าสีของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดย (A) ค่าความสว่าง (L*), (B) ค่าความเป็นสีแดง (a*), (C) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) และ (D) ดัชนีความเป็นสีน้ำตาล (Browning index, BI) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4.2.2.4 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง

รูปที่ 4.13 แสดงผลลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง (Hardness) และความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่า Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีค่าความแข็ง (รูปที่ 4.13 A) อยู่ระหว่าง 14.48 – 32.31 N และค่าความกรอบ (รูปที่ 4.14 B) อยู่ระหว่าง 46.33 – 81.75 N โดยค่าความแข็งของ Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h ต่ำกว่า Puffed-control อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) นอกจากนี้ค่าความกรอบของ Puffed-4b2h สูงกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) จากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นปรากฏและ L/B (ตารางที่ 4.13) โดย Puffed-4b2h มีค่า L/B ต่ำกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h แสดงถึง Puffed-4b2h มีความพองตัวสูงกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h ทั้งนี้ Saha & Roy (2020) รายงานว่า ค่าความกรอบของข้าวพองมีผลมาจากการทำพองที่ใช้ อุณหภูมิสูงและระยะเวลาสั้น ส่งผลให้ข้าวพองเกิดการสูญเสีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความชื้นอย่างรวดเร็วและทำให้โครงสร้างของเมล็ดข้าวมีความยืดหยุ่นลดลงจึงทำให้มีความกรอบมากขึ้น จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับ 4 bars นาน 2 h มีผลต่อการเพิ่มค่าความกรอบและลดค่าความแข็งของข้าวกล้องงอกพอง



รูปที่ 4.13 ลักษณะเนื้อสัมผัสด้าน (A) ความแข็ง (Hardness) และ (B) ความกรอบ (Crispness) ของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) ตัวอักษรต่างกันในกราฟแท่งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

4.2.2.5 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) ของข้าวกล้องงอกพอง

ข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice, GBR) เป็นข้าวที่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง เช่น กรดแกมมา-อะมิโนบิวทิริก (กาบา) แกมมา-โอรีซานอล และสารประกอบฟีนอลิก เป็นต้น กาบาเป็นกรดอะมิโนชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) สามารถออกฤทธิ์ยับยั้งหรือต้านทาน (Inhibitor) เพื่อรักษาความสมดุลของระบบสารสื่อประสาท ช่วยลดความดันโลหิต ช่วยทำให้สมองผ่อนคลาย ป้องกันโรคอัลไซเมอร์ ป้องกันโรคเบาหวาน และยับยั้งการสร้างเซลล์มะเร็ง (กรกฎ และคณะ, 2561) ใน ตารางที่ 4.15 แสดงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกพอง พบว่า GBR มีปริมาณสารกาบาเท่ากับ 16.83 mg/100 g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) ซึ่งรายว่าข้าวกล้องงอกมีปริมาณสารกาบาอยู่ระหว่าง 6.43 – 29.76 mg/100 g ในงานวิจัยนี้พบว่า GBR ที่ผ่านการหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าเป็นเวลานาน 40 นาที (Cooked GBR) มีปริมาณของสารกาบาเท่ากับ 10.21 mg/100 g (ข้อมูลไม่ได้แสดงในตาราง) ซึ่งปริมาณสารกาบาของ Cooked GBR ลดลง 40% เมื่อเทียบ GBR อย่างไรก็ตามปริมาณสารกาบาของ Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีค่าอยู่ระหว่าง 9.20 – 9.63 mg/100 g ซึ่งมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อเทียบกับ GBR และ Cooked GBR ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำข้าวกล้องงอกพอง (การเตรียมข้าวกล้องงอกสุกและการทำพอง) มีผลต่อการลดปริมาณสารกาบาลง 42 – 45% เมื่อเทียบ GBR

แกมมา-โอรีซานอล จัดเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant compound) ที่พบมากในเมล็ดพืชโดยเฉพาะในส่วนของรำข้าว (Chatchavanthatri et al., 2021; Junyusen et al., 2022) มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระและลด LDL-cholesterol และ เพิ่ม HDL-cholesterol (Gerhardt & Gallo, 1998; Rong et al., 1997; Wilson et al., 2002) และยังมีประโยชน์ในเรื่องของการช่วยลดการเกิดเนื้องอก ป้องกันเลือดหนืด ต้านการอักเสบ (Lerma et al., 2009) จากผลการทดลองพบว่า GBR, Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอล 58.38, 51.25, 55.76 และ 57.28 mg/100 g ตามลำดับ (ตารางที่ 4.15) ทั้งนี้ Puffed-control มีปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลลดลงต่ำกว่า GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามข้าวกล้องงอกพองที่ได้จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกโดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกและผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอล จากงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) พบว่า ข้าวกล้องงอก (GBR) มีปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอล 45.06 mg/100 g อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัยของ Bagchi et al. (2021) มี

ปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลอยู่ระหว่าง 24.00 – 74.00 mg/100 ทั้งนี้ปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอลที่แตกต่างกันในแต่ละงานวิจัยอาจมาจากวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกและสายพันธุ์ข้าว

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content, TPC) ของ GBR มีค่าเท่ากับ 0.57 mg GAE/g ซึ่งมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของ GBR สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chatchavanthatri et al. (2021) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.48 – 0.88 mg GAE/g ส่วน Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ระหว่าง 0.47 – 0.54 mg GAE/g (ตารางที่ 4.15) โดย Puffed-control มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดลดลงต่ำกว่า GBR อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารแกมมา-โอรีซานอล จากงานวิจัยของ Mir et al (2016) พบว่าข้าวพองมีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ระหว่าง 0.34 – 0.46 mg GAE/g ทั้งนี้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของข้าวพองขึ้นกับสายพันธุ์ข้าวและกระบวนการทำพองที่ใช้

จากการทดสอบความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ของข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องงอกพอง (ตารางที่ 4.15) พบว่า ความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ของ GBR มีค่า 0.29 และ 0.47 mg TEAC/g ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า GBR ของ Chatchavanthatri et al., (2021) (0.75 – 1.36 และ 0.85 – 1.31 mg TEAC/g ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามการทำข้าวกล้องงอกพองในงานวิจัยนี้มีผลในการลดความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS อย่างมีนัยสำคัญ โดย Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีค่าความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS 0.17 และ 0.31 – 0.37 mg TEAC/g ตามลำดับ ($p<0.05$) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำพองนั้นส่งผลต่อการลดความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิดถูกทำลายไประหว่างการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกและการทำพอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.15 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวกล้องงอก (GBR) และข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR)

Treatment[1]	GABA (mg/100 g)[2]	Oryzanol (mg/100 g)[3]	TPC (mg GAE/g)[4]	DPPH (mg TEAC/g)[5]	ABTS (mg TEAC/g)[6]
GBR	16.83 ± 0.01[a]	58.38 ± 3.37[a]	0.57 ± 0.03[a]	0.29 ± 0.03[a]	0.47 ± 0.04[a]
Puffed-control	9.63 ± 0.16[b]	51.25 ± 1.35[b]	0.47 ± 0.03[b]	0.17 ± 0.03[b]	0.31 ± 0.01[b]
Puffed-2b4h	9.20 ± 0.02[c]	55.76 ± 1.74[ab]	0.52 ± 0.02[ab]	0.17 ± 0.06[b]	0.31 ± 0.01[b]
Puffed-4b2h	9.50 ± 0.01[bc]	57.28 ± 1.58[ab]	0.54 ± 0.01[ab]	0.17 ± 0.02[b]	0.37 ± 0.05[b]

[1] GBR: germinated brown rice, Puffed-control: without hydrostatic pressure treatment, Puffed-2b4h: with hydrostatic pressure at 2 bars for 4 h, Puffed-4b2h: with hydrostatic pressure at 4 bars for 2 h.

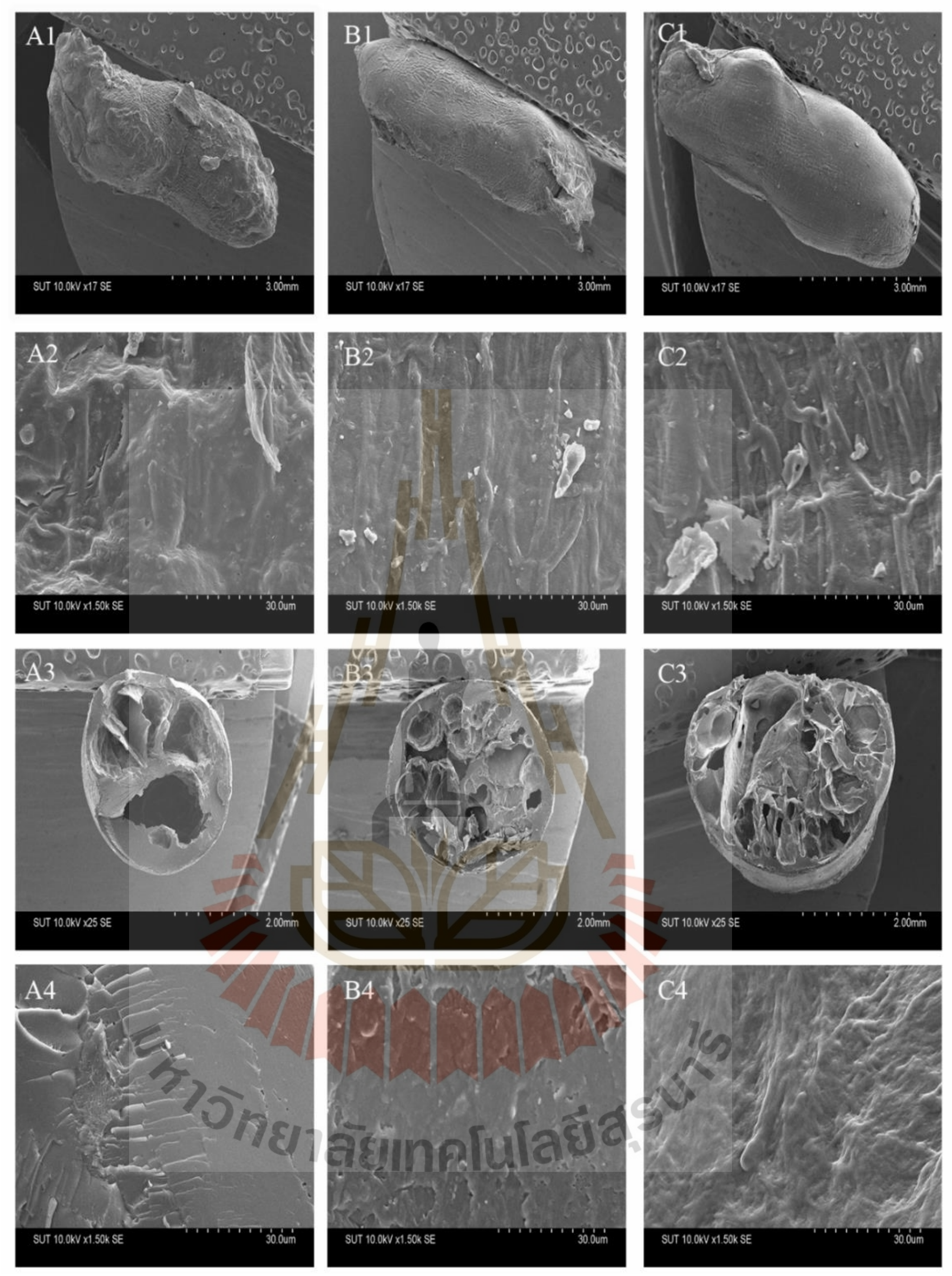
[2,3,4,5,6] The values are means of three replications ± standard deviations. Different lowercase letters in the same column indicate statistical differences between pretreatments ($p<0.05$).

4.2.2.6 โครงสร้างระดับจุลภาคของข้าวกล้องงอกพอง

การศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของ Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h ด้วย Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) ที่ขนาดกำลังขยายภาพ 17, 25 และ 1500 เท่า (รูปที่ 4.14) โดยแสดงลักษณะโครงสร้างของเมล็ดข้าวพองตามแนวยาว (longitudinal) ใน รูปที่ 4.15 (A1, B1, C1) โดย A, B และ C หมายถึง Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h ตามลำดับ พบว่า Puffed-4b2h มีลักษณะผิวที่เรียบและพองตัวกว่า Puffed-2b4h และ Puffed-control อย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับปริมาณโซเดียมคลอไรด์ที่พบว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์สูงกว่า อาจเนื่องมาจากผิวข้าวกล้องงอกพองที่ขรุขระนั่นเอง อย่างไรก็ตามลักษณะผิวของข้าวพองที่เรียบคล้ายกับในงานวิจัยของ Saha & Roy (2022) ใน รูปที่ 4.15 (A2, B2, C2) แสดงลักษระผิวของข้าวกล้องงอกพองเมื่อใช้กำลังขยายเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาภาพถ่ายตามแนวขวาง (cross-sections) ใน รูปที่ 4.15 (A3, B3, C3) พบว่า Puffed-4b2h มีรูพรุนจำนวนมากและมีขนาดใหญ่รวมทั้งชั้นบริเวณผิว (Crust) ของเมล็ดข้าวบางกว่า Puffed-2b4h และ Puffed-control อย่างชัดเจน ซึ่งผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายระดับจุลภาคนี้สอดคล้องกับค่าความแข็งและความกรอบที่ได้จากการใช้เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ที่พบว่า Puffed-4b2h มีค่าความกรอบมาก (เนื่องจากมีรู

พรุนจำนวนมากและขนาดใหญ่) รวมทั้งค่าความแข็งที่ต่ำกว่า (พื้นที่ขอบข้าวพองค่อนข้างบาง) ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mir et al. (2016) และ Maisont & Narkrugsa (2009) ที่พบว่า โครงสร้างของข้าวพองมีลักษณะรูพรุนขนาดใหญ่และชั้นบริเวณผิว (Crust) ของข้าวพองมีความบาง งานวิจัยของ Yamamoto et al. (2009) และ Pompe et al. (2020) รายงานว่า การทำให้ข้าวเกิดเจลได้อย่างสมบูรณ์มาก เมื่อนำข้าวนั้นมาทำแห้งจะทำให้เกิดชั้นที่ผิวของเมล็ดข้าว (Crust) ที่หนาและแข็งแรง ซึ่งหากนำมาทำพองจะทำให้ข้าวนั้นมีความพองและความกรอบมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเนื้อข้าวกล้องงอกพองดังแสดงใน รูปที่ 4.14 (A4, B4, C4) พบว่า Puffed-control มีโครงสร้างภายในที่อัดตัวกันแน่น ซึ่งอาจส่งผลถึงค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นและความกรอบที่ลดลงของข้าวกล้องงอกพองได้ เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างภายในของ Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h ที่ขรุขระไม่เรียบเนียนหรืออัดตัวกันไม่แน่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย FE-SEM ของ (A1-4) Puffed-control, (B1-4) Puffed-2b4h, และ (C1-4) Puffed-4b2h ระดับกำลังขยายที่ 17x, 25x, and 1,500x สำหรับ (1), (3), และ (2,4) ตามลำดับ

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง โดยได้แบ่งการศึกษาวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง และ (2) การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

5.1 การศึกษาผลของวิธีการหุงข้าวต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

5.1.1 วิธีการหุงข้าวกล้องงอกแต่ละวิธีมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องงอกพอง (Puffed GBR) โดย การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยทั้งไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) และการหุงโดยผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิกก่อนนำไปต้มและนึ่ง (UPS) มีผลทำให้ Puffed GBR มีการพองตัวและความกรอบมากขึ้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วย SR-XTM แสดงให้เห็นว่า Puffed EC และ Puffed UEC มีความพองตัวมากกว่าและชั้นผิวของเมล็ดบางกว่า Puffed GBR อื่น ๆ

5.1.2 Puffed GBR ที่ได้จากการหุงสุกด้วยวิธีต่าง ๆ มีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 10% และค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 และวิธีการหุงข้าวที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด และปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด อย่างไรก็ตามการทำพองด้วยการใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนมีผลทำให้ปริมาณเกลือหรือปริมาณโซเดียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

5.1.3 การทำข้าวกล้องงอกพองมีผลต่อการลดปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้แก่ สารกาบา สารแกมมา-โอรีซานอล สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยเฉพาะสารกาบาซึ่งลดลงประมาณ 51 – 56% เมื่อเทียบกับข้าวกล้องงอก (GBR) อย่างไรก็ตามวิธีการหุงข้าวแต่ละวิธีไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ แต่ปริมาณกาบาของ EC มีมากกว่า PS อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

5.1.4 การหุงด้วยหม้อหุงข้าวไฟฟ้าโดยทั้งไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (EC และ UCE) เหมาะสมกับการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองเพื่อเพิ่มคุณภาพด้านการพองตัวและความกรอบของ Puffed GBR

5.2 การศึกษาผลของการใช้ความดันไฮโดรสแตติกต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง

5.2.1 จากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของระดับและระยะเวลาในการใช้ความดันไฮโดรสแตติกกับข้าวกล้องงอกสุก รวมทั้งระยะเวลาในการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุก พบว่า การเพิ่มระยะเวลาการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกเป็น 48 h มีผลทำให้ Puffed GBR มีอัตราการพองตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดัน 2 bars ระยะเวลานาน 4 h และที่ระดับความดัน 4 bars ระยะเวลา 2 h มีผลทำให้ได้ Puffed GBR ที่มีการพองตัวและความกรอบสูง แต่การใช้ระดับความดันไฮโดรสแตติกที่สูง (4 bars) และนาน (4 h) มีผลทำให้การพองตัวของ Puffed GBR ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.2.2 จากการเตรียมข้าวกล้องงอกสุกโดยไม่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Puffed-control) และข้าวกล้องงอกสุกที่ผ่านการใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ 2 bars นาน 4 h (Puffed-2b4h) และ 4 bars 2 h (Puffed-4b2h) พบว่า การใช้ความดันไฮโดรสแตติกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทั้งหมดของ Puffed GBR แต่ Puffed-4b2h มีการพองตัวและความกรอบสูงกว่า Puffed-control และ Puffed-2b4h อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

5.2.3 Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีปริมาณความชื้นไม่เกิน 10% และค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งมีความปลอดภัยด้านจุลชีววิทยา อย่างไรก็ตาม Puffed-4b2h มีปริมาณโซเดียมคลอไรด์ต่ำกว่า Puffed-control อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

5.2.4 Puffed-control, Puffed-2b4h และ Puffed-4b2h มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้แก่ สารแกมมา-โอรีซานอล สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ไม่แตกต่างกัน แต่ Puffed-control มีปริมาณสารกาบาสูงกว่า Puffed-2b4h อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แต่ไม่แตกต่างกับ Puffed-4b2h

5.2.5 จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคด้วย FE-SEM พบว่า Puffed-4b2h มีลักษณะผิวที่เรียบ ความพองตัวสูง และขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า นอกจากนี้ชั้นผิวของ Puffed-4b2h มีความบางกว่า Puffed-2b4h และ Puffed-control อย่างชัดเจน โดย Puffed-control ยังมีโครงสร้างภายในที่อัดตัวกันแน่นมาก

5.2.6 การใช้ความดันไฮโดรสแตติกที่ระดับความดัน 4 bars ระยะเวลานาน 2 h และการแช่เย็นข้าวกล้องงอกสุกเป็น 48 h ก่อนการทำแห้งและทำพอง มีผลทำให้ได้ Puffed GBR ที่มีคุณภาพด้านการพองตัวและความกรอบเพิ่มมากขึ้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของวิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกก่อนการทำพองต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพองซึ่งพบว่า วิธีการหุงข้าวและสภาวะในการปรับสภาพข้าวกล้องงอกสุกด้วยความดันไฮโดรสแตติกที่แตกต่างกันมีผลต่อคุณภาพของข้าวกล้องงอกพอง โดยการศึกษาที่น่าสนใจเพิ่มเติมของการผลิตข้าวกล้องงอกพองคือการทำพองด้วยวิธีอื่น ๆ นอกจากการใช้เกลือเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน และการนำข้าวกล้องงอกพองไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพเพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคได้บริโภคอาหารที่มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูงต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

กนต์ธร ชำนิประศาสน์. (ม.ป.ป.). ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 105-106.

กรกฎ เพ็ชร์หัสณะโยธิน, สุธน เสถียรยานนท์, และ ธิดา อมร. 2561. นวัตกรรมการผลิตข้าวกล้องงอกให้สารกาบาสูง. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 27 (1): 115-129.

ณรงค์ โฉมเฉลา. 2550. น้ำมันมะพร้าว: บทบาทต่อสุขภาพและความงาม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: องค์การเภสัชกรรม.

นงนุช วงศ์สินชวน. 2555. การเพาะข้าวกล้องงอก. วารสารรูสมิแล 33 (2): 57-62. วิกิพีเดีย. (2562). กรดแกมมาบิวทีริก. สืบค้นจาก: https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma-Aminobutyric_acid

นันทิรา หงษ์ศรีสุวรรณ์. 2015. Hazards of Reused Cooking Oil. RMUTP Research Journal, 9(1): 163-175

นาฏนภางค์ พามขุนทด. 2560. ผลของวิธีการหุงและการเก็บรักษาข้าวสุกต่อปริมาณสตาร์ชที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิชญา โกมินทร์. 2553. การสำรวจสถานการณ์และพฤติกรรมการใช้น้ำมันทอดซ้ำในประเทศไทย. รายงานการวิจัย สถาบันการวิจัยสังคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.

อริญา ลาภโคกสูง. (2555). ผลของปริมาณอะมิโลสและโครงสร้างอะมิโลเพคตินในสตาร์ชข้าวพันธุ์ต่าง ๆ ต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของเอนไซม์ชนิดที่ 3. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Abrol YP, Gadgil S (1999) Rice in a variable climate. APC Publishing House, New Delhi, pp Agric Eng 26:1171–1176 and agriculture, 4th edn. Woodhead publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge,

Adebayo, E.A., Martinez-Carrera, D., Morales, P., Sobal, M., Escudero, H., Meneses, M.E., Avila-Nava, A., Castillo, I., and Bonilla, M. (2018). Comparative study of

antioxidant and antibacterial properties of the edible mushrooms Pleurotus levis, P. ostreatus, P. pulmonarius and P. tuber-regium. Internaitonal Journal of Food Science and Technology 53(5): 1316-1330.

Anderson JW (2003) Whole grains protect against atherosclerotic cardiovascular disease. Proc Nutr Soc 62(1):135–142

Anderson WT Jr. (1971). Identifying the convenience-oriented consumer. Journal of Marketing Research,8: 179-183.

Anonymous (1998) Evaluation of rice germplasm for biotic stresses. ICAR Ad-Hoc Research Network Programme, 1993–1998. Directorate of Rice Research, Hyderabad, p 284 antioxidant activity of Indian rice varieties. J Herbs Spices Med Plants 18:18–33 antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka.

Antoine JMR, Fung LAH, Grant CN, Dennis HT, Lalor GC (2012) Dietary intake of minerals and trace elements in rice on the Jamaican market. J Food Comp Anal 26(1):111–121

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2000). Official methods of analysis of AOAC international. (17^{th} ed). Washington DC, U.S.A: The Association of Official Analytical Chemistry.

Ayamdoo A J, Demuyakor B, Dogbe W, Owusu R, Ofosu M A. (2013a). Effect of varying parboiling conditions on physical qualities of Jasmine 85 and Nerica 14 rice varieties. Am J Food Technol, 8(1): 31–42.

Azhakanandam K, Power JB, Lowe KC, Cocking EC, Tongdang T, Jumel K, Davey MR (2000) Qualitative assessment of aromatic Indica rice (Oryza sativa L.): proteins, lipids and starch in grain from somatic embryo-and seed-derived plants. J Plant Physiol 156(5):783–789

Bagchi, T. B., Chattopadhyay, K., Sivashankari, M., Roy, S., Kumar, A., Biswas, T., & Pal, S. (2021). Effect of different processing technologies on phenolic acids, flavonoids and other antioxidants content in pigmented rice. Journal of Cereal Science, 100, 103263.

Balakrishna, A. K., Wazed, M. A., & Farid, M. (2020). A review on the effect of high-pressure processing (HPP) on gelatinization and infusion of nutrients. Molecules, 25(10), 2369.

Balasundram N, Sundram K, Samman S (2006) Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chem 99:191–203

Barbato, M., & Scoma, A. (2020). Mild hydrostatic-pressure (15 MPa) affects the assembly, but not the growth, of oil-degrading coastal microbial communities tested under limiting conditions (5° C, no added nutrients). FEMS Microbiology Ecology, 96(11), fiaa160.

Belitz, H. D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). Food chemistry. (4th ed). Revised and extended, 626.

BHATTACHARYA K.R., INDUDHARA SWAMY Y.M. (1967): Condition of drying parboiled paddy for optimum milling quality. Cereal Chemistry, 44: 592.

Bravo L (1998) Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. Nutr Rev 56:317–333

Buleon, A., Colonna, P., and Ball, S. (1998). Starch granules: Structure and biosynthesis. Biological Macromolecules 23 (2), 85-112.

Cáceres, P. J., Peñas, E., Martinez-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.

Cao W, Nishiyama Y, Koide S (2004) Physicochemical, mechanical and thermal properties of brown rice grain with various moisture contents. Int J Food Sci Tech 39(9):899–906

Chandrasekhar, P. R., & Chattopadhyay, P. K. (1990). Studies on microstructural changes of parboiled and puffed rice. Journal of Food Processing and Preservation, 14(1), 27-37.

Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Arjharn, W., Treeamnuk, 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, 00, e15892. https://doi.org/10.1111/jfpp.15892

Chavan JK, Kadam SS, Beuchat LR (1989) Nutritional improvement of cereals by sprouting. Crit Rev Food Sci Nutr 28(5):401–437

Chen H, Siebenmorgen TJ, Griffin K (1998) Quality characteristics of long-grain rice milled in two commercial systems. Cereal Chem 75(4):560–565

Cheruvanky, R. (2003). Phytochemical products: rice bran. Phytochemical functional foods, 347-376.

Chinma CE, Anuonye JC, Simon OC, Ohiare RO, Danbaba N (2015) Effect of germination on the physicochemical and antioxidant characteristics of rice flour from three rice varieties from Nigeria. Food Chem 185:454–458

CHINNASWAMY R., BHATTACHARYA K.R. (1983a): Studies on expanded rice. Optimal processing condition. Journal of Food Science, 48: 1604–1608

Cho, D. H., & Lim, S. T. (2016). Germinated brown rice and its bio-functional compounds. Food Chemistry, 196, 259-271.

Choi, H. D., Kim, Y. S., Choi, I. U., Park, Y. G., & Park, Y. D. (2006). Hypotensive effect of germinated brown rice on spontaneously hypertensive rats. Korean Journal of Food Science and Technology, 38, 448–451 (in Korean).

Choi, H. D., Kim, Y. S., Choi, I. U., Seok, H. M., & Park, Y. D. (2006). Anti-obesity and cholesterol-lowering effects of germinated brown rice in rats fed with high fat and cholesterol diets. Korean Journal of Food Science and Technology, 38, 674–678 (in Korean).

Choi, I. D., Kim, D. S., Son, J. R., Yang, C. I., Chun, J. Y., & Kim, K. J. (2006). Physicochemical properties of giant embryo rice (Keunnunbyeo). Agricultural Chemistry and Biotechnology, 49, 95–100.

Chotimarkorn C, Benjakul S, Silalai N (2008) Antioxidant components and properties of five long-grained rice bran extracts from commercial available cultivars in Thailand. Food Chem 111(3):636–641

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.

Deepa G, Singh V, Akhilender Naidu K (2012) Characterization of antioxidant compounds and

Deepa G, Singh V, Naidu KA (2008) Nutrient composition and physicochemical properties of Indian medicinal rice-Njavara. Food Chem 106(1):165–171

Dendy DAV (2005) Rice. In: Dendy DAV, Dobraszczyk BJ (eds) Cereal and cereal productschemistry and technology. Springer, New Delhi, pp 266–31

Donovan JW (1979) Phase-transitions of the starch-water system. Biopolymers 18:263–275

Dupuis, J.H., Liu, Q., and Yada, R.Y. (2014). Methodologies for increasing the resistant starch content of food starches: a review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety 13 (6): 1219-1234.

Dykes L, Rooney LW (2007) Phenolic compounds in cereal grains and their health benefits. Cereal Foods World 52:105–111

Earnshaw, R. (1996). High pressure food processing. Nutrition & Food Science 2 : 8-11.

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.

Farkas, D.F. and D. G. Hoover. (2000). High pressure processing. J. Food Sci. Supplement. 47-64.

Finocchiaro F, Ferrari B, Gianinetti A, Dall’Asta C, Galaverna G, Scazzina F (2007) Characterization of antioxidant compounds of red and white rice and changes in total antioxidant capacity during processing. Mol Nutr Food Res 51:1006–1019

Fukami K, Kawai K, Hatta T, Taniguchi H, Yamamoto K (2010) Physical properties of normal and waxy corn starches treated with high hydrostatic pressure. J Appl Glycosci 57:67–72

Furukawa T, Maekawa M, Oki T, Suda I, Lida S, Shimada H, Takamure I, Kadowaki KI (2007) The Rc and Rd genes are involved in proanthocyanidin synthesis in rice pericarp. Plant J 49:91–102

Gerhardt, A. L., & Gallo, N. B. (1998). Full-fat rice bran and oat bran similarly reduce hypercholesterolemia in humans. The Journal of nutrition, 128(5), 865-869.

Gibson, M. 2018. Food Science and the Culinary Arts. Academic Press. 323-340.

Gujral, H. S., Sharma, P., Kumar, A., & Singh, B. (2012). Total phenolic content and antioxidant activity of extruded brown rice. International Journal of Food Properties, 15(2), 301-311.

Gulati, T., & Datta, A. K. (2016). Coupled multiphase transport, large deformation and phase transition during rice puffing. Chemical Engineering Science, 139, 75–98. https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.08.057

Haralampu, S. G. (2000). Resistant starch—a review of the physical properties and biological impact of RS3. Carbohydrate polymers, 41(3), 285-292.

Hegenbart S (1996) Food product design. Understanding Starch Functionality. 1 Jan 1996, Weeks Publishing Company. Retrieved 22 June 2016. www.foodproductdesign.com

Heinemann RJB, Fagundes PL, Pinto EA, Penteado MVC, Lanfer-Marquez UM (2005) Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil. J Food Comp Anal 18(4):287–296

Heleno, S. A., Ferreira, R. C., Antonio, A. L., Queiroz, M. J. R., Barros, L., & Ferreira, I. C. 2015. Nutritional value, bioactive compounds and antioxidant properties of three edible mushrooms from Poland. Food bioscience, 11, 48-55.

Himmelsbach D S, Manful J T, Coker R D. 2008. Changes in rice with variable temperature parboiling: Thermal and spectroscopic assessment. Cereal Chem, 85(3): 384–390.

Hizukuri S (1985) Relationship between the distribution of the chain-length of amylopectin and the crystalline-structure of starch granules. Carbohydr Res 141:295–306

Hoke, K., Houška, M., Pru° chová, J., Gabrovská, D., Vaculová, K., & Paulíková, I. (2007). Optimisation of puffing naked barley. Journal of Food Engineering, 80(4), 1016–1022. https://doi.org/10.1016/j. jfoodeng.2006.08.012

Hoke, K., HOUŠOVÁ, J., & HOUŠKA, M. (2005). Optimum conditions of rice puffing. Czech J. Food Sci. Vol, 23(1), 1-11.

Hoover R (1995) Starch retrogradation. Food Rev Int 11:331–346

Hu C, Zawistowski J, Ling W, Kitts D (2003) Black (Oryza sativa L. indica) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model system. J AgriFood Chem 51(18):5271–5277

Hu C, Zawistowski J, Ling W, Kitts D (2003) Black rice pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide & biological model systems. J Agric Food Chem 51:5271–5177

Huang Y, Tong C, Xu F, Chen Y, Zhang C, Bao J (2016) Variation in mineral elements in grains of 20 brown rice accessions in two environments. Food Chem 192:873–878

Huang, R., Pan, X., Lv, J., Zhong, W., Yan, F., Duan, F., & Jia, L. (2018). Effects of explosion puffing on the nutritional composition and digestibility of grains. International Journal of Food Properties, 21(1), 2193-2204.

Irakli MN, Samanidou VF, Katsantonis DN, Biliaderis CG, Papadoyannis IN (2016) Phytochemical profiles and antioxidant capacity of pigmented and non-pigmented genotypes of rice (Oryza sativa L.) Cereal Res Commun 44:98–110

Ituen E U U, Ukpakha A C. (2011). Improved method of par-boiling paddy for better quality rice. World J Appl Sci Technol, 3(1): 31–40.

Iwaki K, Sugimoto Y (2004) Properties of tochinomi (Japanese horse chestnut) and hishinomi (water chestnut) starches. J Home Econ Jpn 55:13–19

Izawa T (2008) The process of rice domestication: a model based on recent data. Rice 1(2):127–134

Jayadeep, A., & Malleshi, N. G. (2011). Nutrients, composition of tocotrienols, tocopherols, and γ-oryzanol, and antioxidant activity in brown rice before and after biotransformation Nutrientes, composición de tocotrienoles,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

tocoferoles y γ-oryzanol, y actividad antioxidante del arroz integral antes y después de la biotransformación. CyTA-Journal of Food, 9(1), 82-87.

Jayaraman, R., Uluvar, H., Khanum, F., & Singh, V. 2019. Influence of parboiling of red paddy varieties by simple hot soaking on physical, nutrient, phytochemical, antioxidant properties of their dehusked rice and their mineral, starch, and antioxidant's bioaccessibility studies. Journal of food biochemistry, 43(7), e12839.

Jaybhaye RV, Pardeshi IL, Vengaiah PC and Srivastav PP (2014). Processing and technology for millet-based food products: a review. Journal of Ready to Eat Food, 1(2): 32-48.

Jiamjariyatam, R., Kongpensook, V., & Pradipasena, P. (2016). Prediction Models for Textural Properties of Puffed Rice Starch Product by Relative Crystallinity. Journal of Food Quality, 39(5), 445-455.

Joshi, M., Kaur, R., Kanwar, P., Dhiman, G., Sharma, G., Lata, S., Tilak, K., Gupta, N., and Mishra, T. (2016). To evaluate antioxidant activity of gamma-oryzanol extracted from rice bran oil. International Journal of Life Science and Pharma Research 6(3): 17-25.

Juliano BO (1985) Rice: Chemistry and Technology, 2nd edn. American Association of Cereal

Juliano BO, Bautista GM, Lugay JC, Reyes AC (1964) Rice quality, studies on physicochemical properties of rice. J Agric Food Chem 12:131–138

Juliano BO, Bechtel DB (1985) The rice grain and its gross composition. In: Juliano BO (ed) Rice chemistry and technology, 2nd edn. Am Assoc Cereal Chem, St Paul, pp 17–57

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.

Katopo H, Song Y, Jane J (2002) Effect and mechanism of ultrahigh hydrostatic pressure on the structure and properties of starches. Carbohydrate Polymer 47:233–244

Kayahara H, Tsukahara K, Tatai T (2001) Flavour, health and nutritional quality of pre-germinated brown rice. In: Spanier AM (ed) Food flavours and chemistry: advances of the new millennium. Royal Society of Chemistry, Cambridge, pp 546–551

Kent NL, Evers AD (1994) Technology of Cereals: an introduction for students of food science

Kesarwani, A., Chiang, P. Y., Chen, S. S., & Su, P. C. (2013). Antioxidant activity and total phenolic content of organically and conventionally grown rice cultivars under varying seasons. Journal of Food Biochemistry, 37(6), 661-668.

Kim HY, Hwang IG, Kim TM, Woo KS, Park DS, Kim JH et al (2012) Chemical and functional components in different parts of rough rice (Oryza sativa L.) before and after germination. Food Chem 134(1):288–293

Knorr D, Heinz V, Buckow R (2006) High pressure application for food biopolymers. Biochim Biophys Acta 1764:619–631

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.

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.

Kora, A. J. 2019. Applications of sand roasting and baking in the preparation of traditional Indian snacks: nutritional and antioxidant status. Bulletin of the National Research Centre, 43(1), 1-11.

Kumar, S., & Prasad, K. (2018). Effect of parboiling and puffing processes on the physicochemical, functional, optical, pasting, thermal, textural and structural properties of selected Indica rice. Journal of Food Measurement and Characterization, 12(3), 1707-1722.

Laborte, A. G., de Bie, K. C., Smaling, E. M., Moya, P. F., Boling, A. A., & Van Ittersum, M. K. (2012). Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: past trends and future outlook. European Journal of Agronomy, 36(1), 9-20.

Lamberts L, De Bie E, Vandeputte GE, Veraverbeke WS, Derycke V, De Man W, Delcour JA (2007) Effect of milling on colour and nutritional properties of rice. Food Chem 100(4):1496–1503

Lee, Y. R., Kim, J. Y., Woo, K. S., Hwang, I. G., Kim, K. H., Kim, K. J., Jeong, H. S. (2007). Changes in the chemical and functional components of Korean rough rice before and after germination. Food Science and Biotechnology, 16, 1006–1010.

Lerma-García, M. J., Herrero-Martínez, J. M., Simó-Alfonso, E. F., Mendonça, C. R., & Ramis-Ramos, G. (2009). Composition, industrial processing and applications of rice bran γ-oryzanol. Food Chemistry, 115(2), 389-404.

Li, J. H., Vasanthan, T., Hoover, R., & Rossnagel, B. G. (2003). Starch from hull-less barley: Ultrastructure and distribution of granule-bound proteins. Cereal chemistry, 80(5), 524-532.

Liu K, Cao X, Bai Q, Wen H, Gu Z (2009) Relationships between physical properties of brown rice and degree of milling and loss of selenium. J Food Eng 94(1):69–74

Liu RH (2004) Whole grain phytochemicals and health. J Cereal Sci 46(3):207–219

Louzada, P. R., Lima, A. C. P., Mendonca-Silva, D. L., Noël, F., De Mello, F. G., & Ferreira, S. T. (2004). Taurine prevents the neurotoxicity of β-amyloid and glutamate receptor agonists: activation of GABA receptors and possible implications for Alzheimer's disease and other neurological disorders. The FASEB Journal, 18(3), 511-518.

Ly, H. L., Tran, T. M. C., Tran, T. T. T., Ton, N. M. N., & Le, V. V. M. (2018). Application of ultrasound to protein extraction from defatted rice bran. International Food Research Journal, 25(2), 695-701.

Maisont, S., & Narkrugsa, W. (2009). Effects of some physicochemical properties of paddy rice varieties on puffing qualities by microwave “original”. Agriculture and Natural Resources, 43(3), 566-575.Manickavasagan, A., Santhakumar, C., & Venkatachalapathy, N. (Eds.). (2017). Brown rice. Springer.

Mason, T. J., Riera, E., Vercet, A., & Lopez-Buesa, P. (2005). Application of ultrasound. In Emerging technologies for food processing (pp. 323-351). Academic Press.

Mir S.A., Bosco S.J.D., Shah M.A., Mir M.M., Sunooj K.V. (2016b) Variety difference in quality characteristics, antioxidant properties and mineral composition of brown rice. J Food Measur Charact 10(1):177–184

Mir S.A., Bosco S.J.D., Sunooj K.V. (2013) Evaluation of physical properties of rice cultivars grown

Mir, S. A., Bosco, S. J. D., Shah, M. A., & Mir, M. M. (2016). Effect of puffing on physical and antioxidant properties of brown rice. Food Chemistry, 191, 139-146.

Mir, S. A., Shah, M. A., & Bosco, S. J. D. (2017). Variations in brown rice quality among cultivars. In Brown Rice (pp. 25-44). Springer, Cham.

Miura, D., Ito, Y., Mizukuchi, A., Kise, M., Aoto, H., & Yagasaki, K. (2006). Hypocholesterolemic action of pre-germinated brown rice in hepatomabearing rats. Life Science, 79, 259–264.

Mohan, B. H., Malleshi, N. G., & Koseki, T. (2010). Physico-chemical characteristics and non-starch polysaccharide contents of Indica and Japonica brown rice and their malts. LWT-Food Science and Technology, 43(5), 784-791.

Mohapatra D, Bal S (2006) Cooking quality and instrumental textural attributes of cooked rice for

Moko EM, Purnomo H, Kusnadi J, Ijong FG (2014) Phytochemical content and antioxidant properties of colored and non-colored varieties of rice bran from Minahasa, North Sulawesi,

Moongngarm A (2011) Influence of germination conditions on starch, physicochemical properties, and microscopic structure of rice flour. Int Conf Biol Environ Chem 1:78–82

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.

Moraru, C., & Kokini, J. (2003). Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2(4), 147–165.

Mukhopadhyay, S. P., Wood, J. A., Saliba, A. J., Blanchard, C. L., Carr, B. T., & Prenzler, P. D. (2015). Evaluation of puffing quality of australian desi chickpeas by different physical attributes. {LWT}—Food Science and Technology, 64(2), 959–965.

Murthy KRS (2001) Vagbatta's Ashtanga Hrdayam (Text, English translation, notes, appendix,

Murugesan, G., & Bhattacharya, K. R. (1991). Effect of some pretreatments on popping expansion of rice. Journal of Cereal Science, 13(1), 85-92.

Nagataki, A., Tomita, H., Himeda, Y., Takemori, T., & Fukuoka, M. (2018). A quantification method of retrogradation for cooked rice based on a single isolated peak in X-ray diffraction. Journal of Cereal Science, 79, 80-85.

Nambi, V. E., Manickavasagan, A., & Shahir, S. (2017). Rice milling technology to produce brown rice. In Brown Rice (pp. 3-21). Springer, Cham.

Nanda JS, Agrawal PK (2006) Nutrient management in rice, In: rice. Kalyani Publishers, New

Nath, A., & Chattopadhyay, P. (2008). Effect of process parameters and soy flour concentration on quality attributes and microstructural changes in ready-to-eat potato-soy snack using high-temperature short time air puffing. {LWT}—Food Science and Technology, 41(4), 707–715.

Ohtsubo KI, Suzuki K, Yasui Y, Kasumi T (2005) Bio-functional components in the processed pregerminated brown rice by a twin-screw extruder. J Food Compos Anal 18(4):303–316

Onakpoya IJ, Spencer EA, Thompson MJ, Heneghan CJ (2014) The effect of chlorogenic acid on blood pressure: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. J Hum Hypertens 29:77–81

Ou L, Kong LY, Zhang XM, Niwa M (2003) Oxidation of ferulic acid by Momordica charantia peroxidase and related anti-inflammation activity changes. Biol Pharm Bull 26:1511–1516

Parker R, Ring SG (2001) Aspects of the physical chemistry of starch. J Cereal Sci 34:1–17

Parr, A. J., & Bolwell, G. P. (2000). Phenols in the plant and in man. The potential for possible nutritional enhancement of the diet by modifying the phenols content or profile. Journal of the Science of Food and Agriculture, 80(7), 985-1012.

Pascual, C. D. S. C. I., Massaretto, I. L., Kawassaki, F., Barros, R. M. C., Noldin, J. A., & Marquez, U. M. L. (2013). Effects of parboiling, storage and cooking on the levels of tocopherols, tocotrienols and γ-oryzanol in brown rice (Oryza sativa L.). Food Research International, 50(2), 676-681.

Patil, S. B., & Khan, M. K. (2011). Germinated brown rice as a value-added rice product: A review. Journal of food science and technology, 48(6), 661-667.

Pompe, R., Briesen, H., & Datta, A. K. (2020). Understanding puffing in a domestic microwave oven. Journal of Food Process Engineering, 43(7), e13429.

Pozo, C., Rodríguez-Llamazares, S., Bouza, R., Barral, L., Castaño, J., Müller, N., & Restrepo, I. (2018). Study of the structural order of native starch granules using combined FTIR and XRD analysis. Journal of Polymer Research, 25(12), 1-8.

Ratithammatorn, T. (2017). Resistant Starch. Burapha Science Journal (วารสารวิทยาศาสตร์ บูรพา), 22(1), 166-176.

Reddy VS, Dash S, Reddy AR (1995) Anthocyanin pathway in rice (Oryza sativa L.): identification of a mutant showing dominant inhibition of anthocyanins in leaf and accumulation of proanthocyanidins in pericarp. Theor Appl Genet 91:301–312

Rinaldi, M., Littardi, P., Ganino, T., Aldini, A., Rodolfi, M., Barbanti, D., & Chiavaro, E. (2020). Comparison of physical, microstructural, antioxidant and enzymatic properties of pineapple cubes treated with conventional heating, ohmic heating and high-pressure processing. LWT, 134, 110207.

Rong, N., Ausman, L. M., & Nicolosi, R. J. (1997). Oryzanol decreases cholesterol absorption and aortic fatty streaks in hamsters. Lipids, 32(3), 303-309.

Roohinejad S, Omidizadeh A, Mirhosseini H, Saari N, Mustafa S, Mohd Yusof R, ... Yazid M (2009) Effect of pre-germination time of brown rice on serum cholesterol levels of hypercholesterolaemic rats. J Sci Food Agric 90(2):245–2

Sagar, V. R., & Suresh Kumar, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. Journal of Food Science and Technology, 47(1), 15–26. https://doi.org/10.1007/s13197-010-0010-8

Saha, S., & Roy, A. (2020). Puffed rice: A materialistic understanding of rice puffing and its associated changes in physicochemical and nutritional characteristics. Journal of Food Process Engineering, 43(9), e13479.

Saha, S., & Roy, A. (2022). Selecting high amylose rice variety for puffing: A correlation between physicochemical parameters and sensory preferences. Measurement: Food, 100021.

Sahay KM, Singh KK (1994) Unit operations of agricultural processing, 1st edn. Vikas Publishing

Santillana Farakos, S. M., & Frank, J. F. (2014). Challenges in the control of foodborne pathogens in low-water activity foods and spices. In The microbiological safety of low water activity foods and spices (pp. 15-34). Springer, New York, NY.

Satue-Gracia M, Heinonen IM, Frankel EN (1997) Anthocyanins as antioxidants on human low-density lipoprotein and lecithin-liposome system. J Agric Food Chem 45:3362–3367

Sebranek, J., & Neel, S. 2008. Rancidity and antioxidants. WFLO Commod. Storage Man, 1-3.

Shen Y, Jin L, Xiao P, Lu Y, Bao J (2009) Total phenolic, flavonoids, antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain colour, size and weight. J Cereal Sci 49:106–111

Shinde YH, Vijayadwhaja A, Pandit AB, Joshi JB (2014) Kinetics of cooking of rice: a review.

Shittu TA, Olaniyi MB, Oyekanmi AA, Okeleye KA (2012) Physical and water absorption characteristics of some improved rice varieties. Food Bioprocess Tech 5(1):298–309

Singh, N., Kaur, L., Sodhi, N. S., & Sekhon, K. S. (2005). Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars. Food chemistry, 89(2), 253-259.

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.

Slavin J (2003) Why whole grains are protective: biological mechanisms. Proc Nutr Soc 62(1): 129–134

Smitha MR, Parvathy R, Shalini V, Ratheesh M, Helen A, Jayalekshmy A (2013) Chemical indices, antioxidant activity and anti-inflammatory effect of extracts of the medicinal rice “njavara” and staple varieties: a comparative study. J Food Biochem 37:369–38

Sompong, R., Siebenhandl-Ehn, S., Linsberger-Martin, G., & Berghofer, E. (2011). Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka. Food chemistry, 124(1), 132-140.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Soponronnarit, S., Chiawwet, M., Prachayawarakorn, S., Tungtrakul, P., & Taechapairoj, C. (2008). Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. Journal of Food Engineering, 85(2), 268-276.

Spencer H, Brouder A-M, Mitullah W (2000) Food safety requirements and food experts from developing countries: the case of fish exports from Kenya to the European union. Am J Agric Econ 82(5):1159–1169

Stolt M, Oinonen S, Autio K (2001) Effect of high pressure on the physical properties of barley starch. Innov Food Sci Emerg Technol 1:167–175

Stute R, Kingler RW, Boguslawski S, Eshtiaghi MN, Knorr D (1996) Effects of high-pressure treatment on starches. Starch 48:399–408

Sugimoto Y, Watsuji T (2006) Some properties of lentil starches (Lens culinaris MEDIC). J Home Econ Jpn 57:635–640 (in Japanese with English abstract)

Sullivan JF and Craig JD Jr. (1984). The development of explosion puffing. Food Technology, 38(2): 52-55, 131.

Sun S, Zhang X, Tough DF, Sprent J (1998) Type I interferon- mediated stimulation of T cells by CPG DNA. J Exp Med 188:2335–2342

Suzuki M, Kimura T, Yamagishi K, Shinmoto H, Yamaki K (2004) Comparison of mineral contents in 8 cultivars of pigmented brown rice. Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi 51(8):424–427

Tamme, R., Laing, D., Steinmann, W. D., & Bauer, T. (2012). Thermal energy storage. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, 10551-10577.

Tanaka K, Sugimoto T, Ogawa M, Kasai Z (1980) Isolation and characterization of two types of protein bodies in the rice endosperm. Agric Biol Chem 44:1633–1639

Teixeira, A. S., Deladino, L., Garcia, M. A., Zaritzky, N. E., Sanz, P. D., & Molina-García, A. D. (2018). Microstructure analysis of high pressure induced gelatinization of maize starch in the presence of hydrocolloids. Food and Bioproducts Processing, 112, 119-130.

Thompson, S. A., & Ross, I. J. (1983). Compressibility and frictional coefficients of wheat. Transactions of the ASAE, 26(4), 1171-1176.

Tian, S., Nakamura, K., & Kayahara, H. (2004). Analysis of phenolic compounds in white rice, brown rice, and germinated brown rice. Journal of agricultural and food chemistry, 52(15), 4808-4813.

Tsuda T, Horio F, Osawa T (2002) Cyanidin 3-**O**-β-glucoside suppresses nitric oxide production during a zymosan treatment in rats. J Nutr Sci Vitaminol 48:305–310

Tsuda T, Horio F, Uchida K, Aoki H, Osawa T (2003) Dietary cyanidin 3-**O**-β-D-glucoside-rich purple corn colour prevents obesity and ameliorates hyperglycemia. J Nutr 133:2125–2130

US Food and Drug Administration. (2016). Hazard analysis and riskbased preventive controls for human food: draft guidance for industry.

Vlachos, N., Skopelitis, Y., Psaroudaki, M., Konstantinidou, V., Chatzilazarou, A., & Tegou, E. (2006). Applications of Fourier transform-infrared spectroscopy to edible oils. Analytica chimica acta, 573, 459-465.

Waigh TA, Gidley MJ, Komanshek BU, Donald AM (2000) The phase transformations in starch during gelatinisation: a liquid crystalline approach. Carbohydr Res 328:165–176

Waigh TA, Hopkinson I, Donald AM, Butler MF, Heidelbach F, Riekel C (1997) Analysis of the native structure of starch granules with X-ray microfocus diffraction. Macromolecules 30:3813–3820

Wang KM, Wu JG, Li G, Zhang DP, Yang ZW, Shi CH (2011) Distribution of phytic acid and mineral elements in three indica rice (Oryza sativa L.) cultivars. J Cereal Sci 54(1):116–121

Watanabe, M., Maeda, T., Tsukahara, K., Kayahara, H., & Morita, N. (2004). Application of pregerminated brown rice for breadmaking. Cereal Chemistry, 81(4), 450-455.

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

Whalen, P. (1992). Half products for microwave puffing of expanded food product. US Patent 5,102,679.

Wilson, T. A., Idreis, H. M., Taylor, C. M., & Nicolosi, R. J. (2002). Whole fat rice bran reduces the development of early aortic atherosclerosis in hypercholesterolemic hamsters compared with wheat bran. Nutrition Research, 22(11), 1319-1332.

Wu D X, Shu Q Y, Wang Z H, Xia Y W. (2002). Effect of gamma irradiation on starch viscosity and physicochemical properties of different rice. Radiat Phys Chem, 65(1): 79–86.

Wu F, Chen H, Yang N, Wang J, Duan X, Jin Z, Xu X (2013). Effect of germination time on physicochemical properties of brown rice flour and starch from different rice cultivars. J Cereal Sci 58(2):263–271

Wu, F., Yang, N., Touré, A., Jin, Z., & Xu, X. (2013). Germinated brown rice and its role in human health. Critical reviews in food science and nutrition, 53(5), 451-463.

Xie L, Chen N, Duan B, Zhu Z, Liao X (2008) Impact of proteins on pasting and cooking properties of waxy and non-waxy rice. J Cereal Sci 47:372–37

Xu, L., Zhao, Y., Xu, M., Yao, Y., Nie, X., Du, H., & Tu, Y. G. (2017). Effects of salting treatment on the physicochemical properties, textural properties, and microstructures of duck eggs. PLoS One, 12(8), e0182912.

Xu, Z., & Godber, J. S. (1999). Purification and identification of components of γ-oryzanol in rice bran oil. Journal of agricultural and food chemistry, 47(7), 2724-2728.

Yadav BK, Jindal VK (2007) Dimensional changes in milled rice (Oryza sativa L.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image analysis. J Food Eng

Yamamoto, K.; Kawai, K.; Fukami, K.; Koseki, S. Pressure Gelatinization of Potato Starch. Food (2009), 3, 57–66.

Yewale, C. R., & Chattopadhyay, P. K. (2013). High temperature short time air puffed ready-to-eat (rte) tapioca–peanut snack: Process parameters optimization. International Journal of Food Engineering, 9(4), 1–11.

Yoshida H, Tomiyama Y, Mizushina Y (2010) Lipid components, fatty acids and triacylglycerol molecular species of black and red rices. J Food Chem 123:210–215

Yu, S., Zhang, Y., Ge, Y., Zhang, Y., Sun, T., Jiao, Y., & Zheng, X. Q. (2013). Effects of ultrasound processing on the thermal and retrogradation properties of nonwaxy rice starch. Journal of Food Process Engineering, 36(6), 793-802.

Zhang MW, Zhang RF, Zhang FX, Liu RH (2010). Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties. J Agric Food Chem 58(13):7580–7587

Zhao C, Giusti MM, Malik M, Moyer MP, Magnuson BA (2004). Effects of commercial anthocyanin-rich extracts on colonic cancer and nontumorigenic colonic cell growth. J Agric Food Chem 52:6122–6128

Zhou Z, Robards K, Helliwell S, Blanchard C (2002). Composition and functional properties of rice. Int J Food Sci Tech 37(8):849–868

Zhu F, Cai YZ, Bao J, Corke H (2010). Effect of γ-irradiation on phenolic compounds in rice grain. Food Chem 120(1):74–77

Zhu, S. M., Hu, F. F., Ramaswamy, H. S., Yu, Y., Yu, L., & Zhang, Q. T. (2016). Effect of high-pressure treatment and degree of milling on gelatinization and structural properties of brown rice. Food and Bioprocess Technology, 9(11), 1844-1853.

Zimmermann, F. and C. Bergman. (1993). Isostatic high-pressure equipment for food preservation. Food Tech. 47(6): 162 – 163.

Zobel HF (1984). Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes. In: Whistler RL, BeMiller JN, Paschall EF (eds) Starch: chemistry and technology. Academic, London, pp 285–309

Zullaikah, S., Melwita, E., and Ju, Y.H. (2009). Isolating of oryzanol from crude rice bran oil. Bioresource Technology 100: 299-302.

ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการ (proceedings) ระดับนานาชาติ

1. Saksit Sonsomboonsuk, Boontarika sila, Tiraporn Junyusen, Pornpimol Moolkaew and Payungsak Junyusen. (2022). Evaluation of bioactive compounds and textural alteration of cooked germinated brown rice during storage. The 8th International and National Conference on Food Engineering Network of Thailand, 4 April 2022, Maejo University. (Award SILVER MEDAL: International Session – Graduate Track in Food Process Engineering Theme)

2. Sonsomboonsuk, S., Junyusen, T., Rintorn, S., Junyusen, P., and Pakawanit, P. (2021). Effects of Parboiling Pretreatments on Physicochemical and Microstructural Properties of Puffed Germinated Brown Rice. The 14th TSAE International Conference and 22nd TSAE National Conference, Khon Kaen University, Thailand, 12-13 May 2021. Page 15-21. (Award of good presentation)

บทความวิจัยที่ได้ยื่นขอจดสิทธิบัตร

1. เรื่อง วิธีการเตรียมข้าวกล้องงอกโดยการใช้ความดันไฮโดรสแตติกสำหรับการผลิตข้าวพอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

The 14th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference, 24-26 May 2021

The 14th TSAE International Conference

12-14 May 2021

Available online at www.tsae.asia

Effects of Parboiling Pretreatments on Physicochemical and Microstructural Properties of Puffed Germinated Brown Rice

Saksit Sonsomboonsuk[1]*, Tiraporn Junyusen[1], Siriporn Rintorn[1], Payungsak Junyusen[1], Phakkhananan Pakawanit[2]

[1]School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000
[2]Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand
*Corresponding author: Tel: +66-9-8547-8742, E-mail: saksitson8@gmail.com

Abstract

The objective of this study was to assess the effects of ultrasonication combined with steam parboiling pretreatment and salt puffing process on the physicochemical and microstructural properties of puffed germinated brown rice (GBR). The parboiling pretreatments of GBR included steam parboiling (SS), and ultrasound combined with steam parboiling (USS). Parboiled GBR was subsequently dried to get a moisture content of 10-14% and pretreated GBR was obtained. The pretreated GBR was subjected to hot salt puffing at 200-230ºC for 10-15 s and vigorously stirred to achieve puffed GBR. Results showed that moisture content and water activity (a_w) values of Puffed-USS were significantly lower than those of Puffed-SS ($p<0.05$). These results suggested that ultrasonic pretreatment induced porous structure inside the grain resulting in increased moisture evaporation during puffing process. Salt puffing significantly reduced bulk density of puffed GBR by expansion of grain structure, compared with that of pretreated GBR. Ultrasonic pretreatment insignificantly improved the expansion and crispness value of puffed GBR. Color values (L*, a*, and b*) of puffed GBR were significantly increased after puffing process. Increase in redness and yellowness values of puffed GBR indicated the formation of brown polymers from the Millard reaction. Microstructural image revealed that ultrasonic pretreatment altered internal structures of grain by increasing voids between intercellular space.

Keywords: Puffed germinated brown rice, Ultrasonic pretreatment, Salt puffing process, Physical properties

1 Introduction

In recent years, consumers are more interested in foods that provide a health benefit. As they are received more information and more aware of the associations between food and health. In addition, consumers perceive that the intake of low-fat foods and low-calories products could decrease the risk of obesity, coronary heart diseases, and diabetes (Junyusen et al. 2017). Germinated brown rice (GBR), considered to a value-added rice product, is well-known in high nutritional benefit as it has high levels of bioactive compounds such as γ-aminobutyric acid (GABA), vitamin E (tocols), γ-oryzanol, and phenolic compounds (Moongngarm and Saetung, 2010). Puffed rice, is high in resistant starch content, but it is a low-calorie product of rice, hence, it is preferred by calorie-conscious consumers.

Characteristics of puffed rice are expanded structure and crispy texture (Saha and Roy, 2020). Production of puffed rice called puffing process includes parboiling pretreatment followed by high temperature short time (HTST) treatment of dried parboiled rice in sand, oil, or hot air as a heating medium causing volumetric expansion of the grain, providing puffed rice. (Saha and Roy, 2020; Mir et al., 2016). The pleasant crispy texture, degree of expansion, and color of puffed rice are directly related to the degree of starch gelatinization during parboiling pretreatment, initial moisture content of dried parboiled rice, and puffing temperature and time. These are key parameters of puffing process to achieve the optimum quality (Mir et al., 2016; Pompe et al., 2020).

Ultrasound is a novel nonthermal technology for food processing. The advantages of utilizing ultrasound over conventional methods for food processing are productivity, reduced processing temperature and time, enhanced quality, and environmentally friendly (Chemat et al., 2011). High-intensity ultrasound, low-frequency in the range of 20-100 kHz, is commonly applied for food material due to its efficiency in facilitating the swelling and hydration, providing a great penetration of solvent into the cellular structure, and causing formation of porosity inside materials (Feng and Yang, 2011). Ultrasound has been used to improve heat transfer for cooking, freezing, and drying process in order to shorten the processing time and to enhance a quality of food product (Chemat et al., 2011).

However, there exists no study on the effect of ultrasound combined with steam parboiling

pretreatment on the physical and microstructural properties of puffed GBR. In addition, previous studies of puffing methods involved the hot sand-bed, oil, hot air, fluidized air, and microwave puffing (Mir et al., 2016; Pompe et al., 2020; Nath et al., 2007; Maisont and Narkrugsa, 2009; Saha and Roy, 2020). The effect of hot salt puffing process on the quality of puffed GBR is still very limited. Therefore, the objective of this study was to investigate the effect of ultrasonication combined with steam parboiling pretreatment and hot salt puffing process on the qualities of puffed GBR.

2 Materials and Methods

2.1 Materials

Germinated brown rice (GBR) was obtained by dehulling of germinated Khao Dok Mali 105 paddy prepared by Chatchavanthatri et al. (2020). Briefly, germinated paddy was prepared by following steps; (1) sanitizing surface paddy by 0.1% sodium hypochlorite, (2) soaking with water at 30±2ºC for 24 h, (3) germinating at 30±2ºC for 48 h, (4) sun drying of germinated paddy on the open air at day time until moisture content reduced to 12-14%, and (5) dehulling of germinated paddy. The GBR was then vacuum packed and stored at 4ºC for further experiment.

2.2 Preparation of pretreated and puffed GBR

On laboratory scale, GBR was pretreated with two different methods. First method was without ultrasonic treatment. A GBR (200 g) was soaked in 1 L distilled water at 30ºC for 60 min. Then, the soaked GBR was subjected to steam parboil at 100ºC until fully gelatinization (65±5 min). For ultrasonic treatment, a GBR was immersed in distilled water, and directly placed in an ultrasonic bath (35 kHz, DT514BH, Bandelin, Germany). The ultrasonic treatment was carried out at 30ºC for 5 min. The treated GBR was subsequently soaked for 55±5 min, and steam parboiled to achieve a complete gelatinization. The gelatinized GBR was subsequently dried using an oven (Universal Oven UF 110, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Germany) at 40ºC to obtain the moisture content between 10-14% (w.b.). The pretreated GBR was vacuum packed and stored at room temperature for further puffing process. Each experiment was performed in duplicate.

In this study, puffing process was performed using a hot salt (NaCl) as a heating medium. Briefly, a pretreated GBR was expanded in iron pan containing salt at 200-230ºC for 10-15 s and vigorously stirred with the salt to ensure uniform heating. The salt temperature was measured with an infrared thermometer (Testo 830-T2, Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany). The expanded (puffed) GBR was separated from salt and subsequently cooled down on aluminum tray. It was then packed and stored at room temperature for further analysis.

2.3 Moisture content and water activity (aw) measurement

Moisture content of pretreated and puffed GBR was performed using a moisture analyzer (MB-25, OHAUS Instruments Co., Ltd., Shanghai, China). Water activity (aw) was measured using a water activity meter (AquaLab Pre, METER Group, Inc., WA, USA). Triplicate determinations were performed for each sample.

2.4 Yield, expansion, bulk density, and length/breadth

Weight of GBR, pretreated and puffed GBR was determined by weighting on an analytical balance (MS3002TS, Mettler-Toledo, Inc., OH, USA). Volume of pretreated and puffed GBR was measured in a 100 mL glass graduated cylinder. The total yield, puffed yield, expansion volume, expansion ratio, and bulk density were calculated using equations 1 to 5, respectively. Four determinations were performed for each treatment.

Length/breadth ratio was measured by using a Vernier caliper following Mir et al. (2016). GBR, pretreated and puffed GBR were randomly selected and their length and breadth were measured. Each treatment was performed in eight replications.

$$\text{Total yield (\%)} = \frac{\text{weight of puffed GBR (g) x 100}}{\text{weight of GBR (g)}} \quad (1)$$

$$\text{Puffed yield (\%)} = \frac{\text{weight of puffed GBR (g) x 100}}{\text{weight of pretreated GBR (g)}} \quad (2)$$

$$\text{Expansion volume} = \frac{\text{volume of puffed GBR (mL)}}{\text{weight of pretreated GBR (g)}} \quad (3)$$

$$\text{Expansion ratio} = \frac{\text{volume of puffed GBR (mL)}}{\text{volume of pretreated GBR (mL)}} \quad (4)$$

$$\text{Bulk density (g/mL)} = \frac{\text{weight of puffed GBR (g)}}{\text{volume of puffed GBR (mL)}} \quad (5)$$

2.5 Color values

Color values of pretreated and puffed GBR were measured by colorimeter (MiniScan EZ 4500L, HunterLab, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) based on the CIE L*a*b* system (lightness, redness, and yellowness). The experiment was performed in six replications.

2.6 Texture analysis

Hardness and crispness of puffed GBR were evaluated by using a Texture Analyzer (TA.XTPlusC, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA) equipped with a

25 mm diameter aluminum cylindrical probe and a 50 kg-capacity compression load cell. Puffed GBR (30 g) were placed in an aluminum can with a diameter and height of 6 cm and 4 cm, respectively, and gently tapped five times before measurement. The compression parameters of pre-test, test, and post-test speed were 1, 2, and 10 mm.s^{-1}, respectively. The compression distance was 40% strain. The analyses were done in six replications. The hardness and crispness values were determined using Texture Exponent Software (version 7.0.6.0, Texture Technologies Corp. and Stable Micro Systems, Ltd., Hamilton, MA, USA).

2.7 Microstructural analysis

The microstructures of pretreated and puffed GBR were investigated using synchrotron radiation X-ray tomographic microscopy (SRXTM) which provided a 3D-image. SRXTM was carried out at beamline 1.2W, Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Thailand. X-ray projections of sample were collected for a complete dataset at 180 degrees with 0.5 angular increments. In order to minimize the artifacts, polychromatic X-ray was attenuated with 350 µm-thick aluminum foil, with a mean energy of about 11.5 keV. The X-ray projections were collected on a SCMOS camera with a pixel size of 1.44 µm. The data was pre-processed and reconstructed in three dimensions based on a filtered-back projection algorithm using Octopus Reconstruction software (Inside Matters BVBA, Belgium). After that, reconstructed images were visualized using Dristhri software developed by Ajay Limaye (Australian National University, Canberra, ACT, Australia).

2.8 Statistical analysis

In this study, results were expressed as means ± standard deviations. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to statistically assess the effect of different pretreatment methods on physical and microstructural properties of puffed GBR. Tukey-HSD multiple comparison was used to compare means, given 5% significance level ($p < 0.05$). The statistical analysis was carried out using Minitab® 17 (Minitab Inc., USA).

3 Results and Discussion

3.1 Yield and chemical properties of puffed GBR

Yield and chemical compositions of puffed GBR are shown in Table 1. Total yield and puffed yield of Puffed-SS and Puffed-USS were between 85.24-86.07% and 81.35-83.35%, respectively. These results indicated that the total yield and puffed yield did not affect by the pretreatment methods. Moisture content and water activity (aw) are important parameters indicating product stability during storage.

In this study, moisture content of pretreated GBR before subjecting to puffing process were between 12.58-13.53% (w.b.). The results showed that hot salt puffing process significantly reduced moisture content of puffed GBR (0.09-2.47%) ($p<0.05$). Puffed GBR had aw levels between 0.22-0.32, representing low-moisture foods (aw<0.60) (Syamaladevi et al., 2016). In addition, its value indicates prevention of microbial growth and shelf-stable product. The moisture content results showed similar trend as the aw. Levels of moisture content and aw of Puffed-USS were significantly lower than those of Puffed-SS ($p<0.05$). It was probably because 5-min ultrasonic pretreatment induced porous structure inside the grain resulting in increased moisture evaporation during puffing process (Feng and Yang, 2011). Insignificant different in salt content of puffed GBR were observed and the values were between 0.22-0.27% (88-108 mg sodium in 100 g puffed GBR). Thai adults are recommended to consume less than 2,400 mg of salt a day. In short, moisture content and aw values of puffed GBR were significantly affected by pretreatment methods ($p<0.05$).

Table 1 Yield and chemical properties of puffed GBR.

Treatment [1]	Total yield (%) [2]	Puffed yield (%) [2]	Moisture content (%, w.b.) [2]	a_w [2]	Salt content (%, d.b.) [2]
Puffed-SS	85.24±1.23	83.35±2.11	2.47±0.42^a	0.32±0.00^a	0.22±0.06
Puffed-USS	86.07±0.77	81.35±0.72	0.90±0.17^b	0.22±0.02^b	0.27±0.05

[1] SS and USS denote steam parboiling pretreatment and ultrasonic combined with steam parboiling pretreatment, respectively.

[2] The values present the mean of triplicate ± standard deviations. Different letters in each column represent statistically significant differences between treatments at $p<0.05$.

3.2 Physical properties of puffed GBR

In Table 2, bulk densities of raw GBR (RB), pretreated and puffed GBR were varied between 0.41-0.72 g mL^{-1}. Bulk densities of raw GBR and pretreated GBR were significantly higher than those of puffed GBR ($p<0.05$). These results indicated that steam parboiling process causes the starch

gelatinization and subsequently hardening the gelatinized starch by hot air oven drying, resulting in rigid and compact internal structure. Meanwhile, puffing process caused an expansion of internal structure. This is in accordance with previous work (Mir et al., 2016). Expansion volume and expansion ratio of puffed GBR were between 1.90-1.98 mL g^{-1} and 1.29-1.32, respectively. Ultrasonic pretreatment insignificantly improved the expansion of puffed GBR. According to Feng and Yang (2011), ultrasound can facilitate the swelling and degrade the carbohydrate leading to reduce molecular weights of carbohydrate. As starch is the primary carbohydrate in rice, the higher degree of starch gelatinization resulted in higher expansion of rice (Saha and Roy, 2020). In current study, bulk density, expansion volume and expansion ratio were lower than those studied by Maisont and Narkrugsa (2009), who reported that bulk density, expansion volume, and expansion ratio of puffed KDML105 GBR were 0.21 g mL^{-1}, 6.66 mL g^{-1} and 3.48, respectively. Saha and Roy (2020) reported that the expansion ratio of puffed rice could range from 4 to 10. The discrepancy suggested that the pretreatment and puffing process affect the physical properties of puffed GBR.

The length/breadth ratios of pretreated and puffed GBR (3.12-3.35) were insignificantly different from that of the raw GBR (3.46) ($p>0.05$). The puffed GBR had slightly lower in length/bread ratios, compared with raw and pretreated GBR. The length/breadth ratios of puffed GBR were consistent with those reported by Maisont and Narkrugsa (2009). In this study, it suggested that pretreatment and puffing process did not alter the size of GBR. These results were inconsistent with Mir et al. (2016), who reported that the length/breadth ratios of raw and parboiled brown rice (2.43-2.45) were significantly higher than that of expanded (puffed) brown rice (1.95) due to the expansion of rice resulting in lower the length/breadth ratio. Thus, further work is needed to optimize the pretreatment process of GBR for improving the expansion of puffed GBR by hot salt puffing process.

Table 2 Physical properties of raw GBR, and pretreated and puffed GBR.

Treatment [1]	Bulk density (g mL^{-1}) [2]	Length/breadth ratio [2]	Expansion volume (mL g^{-1}) [2]	Expansion ratio [2]
RB	0.72±0.02^a	3.46±0.15	-	-
Pretreated-SS	0.69±0.03^a	3.29±0.13	-	-
Pretreated -USS	0.68±0.02^a	3.35±0.32	-	-
Puffed-SS	0.41±0.01^b	3.26±0.30	1.90±0.20	1.29±0.12
Puffed-USS	0.44±0.04^b	3.12±0.36	1.98±0.06	1.32±0.07

[1] RB, SS, and USS denote raw GBR, steam parboiling pretreatment, and ultrasonic combined with steam parboiling pretreatment, respectively.

[2] The values present the mean of quadruplicate ± standard deviations. Different letters in each column represent statistically significant differences between treatments at $p<0.05$.

3.3 Color value of GBR, pretreated and puffed GBR

Figure 1 shown the L*, a*, and b* values of raw GBR (RB), pretreated and puffed GBR. In pretreated GBR, lightness (L*) values were significantly lower than those of raw and puffed GBR ($p<0.05$). These results indicated that two pretreatment methods reduced the lightness of sample corresponding to the occurrence of Maillard reaction during steam parboiling (Saha and Roy, 2020). Mir et al. (2016) reported that increase in lightness level of puffed rice was due to the expansion and formation of porous structure during puffing. The values of redness (a*) and yellowness (b*) of puffed GBR significantly increased when compared with raw and pretreated GBR ($p<0.05$). In contrast, Mir et al. (2016) found that a* and b* of puffed rice increased, compared with raw and parboiled rice. Saha and Roy (2020) also reported that the redness and yellowness increased in the parboiled rice, compared with non-parboiled rice. The present contradictory finding may be attributed to differences in pretreatment (parboiling) and puffing process (i.e., heating medium, puffing temperature and time). The high temperature with uniform heating of salt puffing process might be contributed to increase in redness and yellowness of puffed GBR. In short, The color values (L*, a*, and b*) of puffed GBR were significantly increased after puffing process;

however, 5-min ultrasonic pretreatment did not alter the color values of pretreated and puffed GBR.

3.4 Texture property of puffed GBR

Texture properties of puffed GBR including hardness and crispness are presented in Table 3. The hardness is a measurement of the maximum force during the compression, and the crispness relates to summation of total peak forces throughout the compression. The hardness of Puffed-USS was slightly lower than that of Puffed-SS ($p>0.05$). Similarly, insignificant difference in crispness was observed between Puffed-SS and Puffed-UPS. These results indicated that 5-min ultrasonic treatment did not improve the texture properties of puffed GBR. In this study, the trends of hardness and crispness of puffed GBR were generally similar to those of expansion volume and expansion ratio (Table 2).

Table 3 Hardness and crispness values of puffed GBR.

Treatment	Hardness (g)	Crispness
Puffed-SS	781.14±60.10	89.17±2.40
Puffed-USS	747.64±63.61	89.83±3.87

[1] SS and USS denote steam parboiling pretreatment and ultrasonic combined with steam parboiling pretreatment, respectively.

[2] The values present the mean of six replications ± standard deviations. Different letters in each column represent statistically significant differences between treatments at $p<0.05$.

3.5 Microstructural characteristic of pretreated and puffed GBR

The SRXTM images of pretreated and puffed GBR are given in Figure 2. Pretreated-SS showed the compact structure (longitudinal and cross sections). This is consistent with previous works (Saha and Roy, 2020; Mir et al., 2016), who reported that parboiling causes the starch gelatinization subsequently filling up the natural fissures inside the grain endosperm, resulting in more rigid and strength of grain. In addtion, this rigid structure will be become to a voided structure of puffed rice during puffing process (Saha and Roy, 2020). However, Pretreated-USS was considerably more porous than Pretreated-SS. This could be attributed to ultrasound inducing structural disruption subsequently the formation of voids inside the grain, contributing to improve the moisture evaporation.

As shown in Figure 2 (Puffed-SS and Puffed-USS), puffing process had a great effect on microstructure of puffed GBR. Puffed-SS and Puffed-USS had large pores in the core of grain, while the nonporous regions near the surface were observed. This is in accordance with previous work (Pompe et al., 2020). According to Saha and Roy (2020), who reported that the degree of gelatinization during parboiling had an impact on final puffed rice quality. Increasing the degree of gelatinization causes the surface more compact and thus easier to puff (Pompe et al., 2020). Thus, fully gelatinziation of starch by parboiling pretreatment is an important factor for producing optimal exansion of puffed GBR.

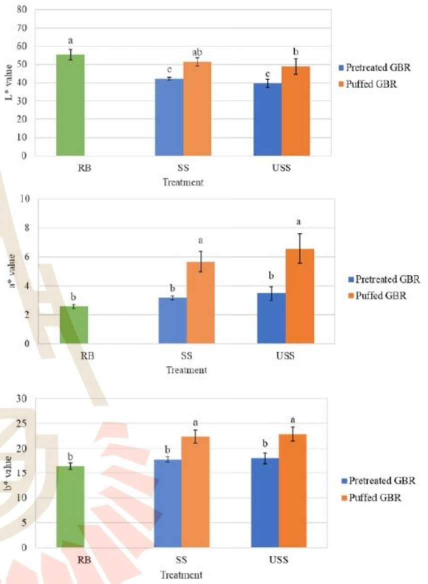


Figure 1 CIE L*, a*, b* color coordinates of samples. RB, SS, and USS denote raw GBR, steam parboiling pretreatment, and ultrasonic combined with steam parboiling pretreatment, respectively. The values present the mean of six replications ± standard deviations. Different letters in each column represent statistically significant differences between treatments at $p<0.05$.

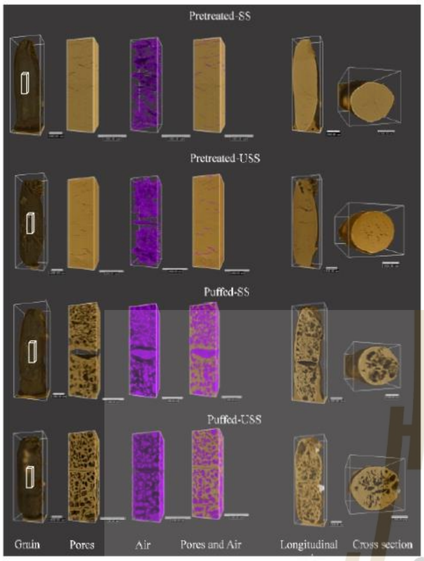


Figure 2 SRXTM images of pretreated and puffed GBR, where purple color indicates air presented inside grains.

4 Conclusions

This study focused on the effects of parboiling pretreatment and salt puffing process on the quality of puffed GBR. Results indicated that moisture content and aw values of puffed GBR were significantly affected by pretreatment methods. Ultrasound induced structural disruption subsequently the formation of voids inside the grain, contributing to improve the moisture evaporation. Salt puffing process significantly increased an expansion of internal structure. However, 5-min ultrasonic pretreatment did not improve the volumetric expansion of puffed GBR. The trends of hardness and crispness of puffed GBR were related to those of expansion volume and expansion ratio. Salt puffing process had a great effect on microstructure of puffed GBR. SRXTM images revealed that pretreated-USS was considerably more porous than Pretreated-SS due to ultrasound inducing structural disruption subsequently the formation of voids inside the grain. Puffed-SS and Puffed-USS had large pores in the core of grain, while the nonporous regions close to the surface were observed. As the degree of gelatinization within rice is essential for crispy texture of puffed rice, thus further work is needed to optimize the pretreatment process of GBR for improving the expansion volume and crispness of puffed GBR by using hot salt puffing process.

5 Acknowledgements

The authors would like to extend sincere gratitude to Suranaree University of Technology for the scholarship and research facilities to achieve this study.

6 References

Chatchavanthatri, N., Junyusen, T., Moolkaew, P., Arjharn, W., Junyusen, P. (2020). Effect of soaking and sprouting treatment on germination rate of paddy. In E3S Web of Conferences (Vol. 187, p. 04016). EDP Sciences

Chemat, F., Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. Ultrasonics sonochemistry, 18(4), 813-835.

Feng, H., Yang, W. 2011. Ultrasonic processing. In Nonthermal processing technologies for food (pp. 135-154). UK: Wiley-Blackwell and IFT Press.

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 & Technology, 24(1).

Maisont, S., Narkrugsa, W. 2009. Effects of some physicochemical properties of paddy rice varieties on puffing qualities by microwave "original". Agriculture and Natural Resources, 43(3), 566-575.

Mir, S. A., Bosco, S. J. D., Shah, M. A., Mir, M. M. 2016. Effect of puffing on physical and antioxidant properties of brown rice. Food Chemistry, 191, 139-146

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.

Nath, A., Chattopadhyay, P. K., Majumdar, G. C. 2007. High temperature short time air puffed ready-to-eat (RTE) potato snacks: Process parameter optimization. Journal of food Engineering, 80(3), 770-780.

Pompe, R., Briesen, H., Datta, A. K. 2020. Understanding puffing in a domestic microwave oven. Journal of Food Process Engineering, 43(7), e13429.

Saha, S., Roy, A. 2020. Puffed rice: A materialistic understanding of rice puffing and its associated changes in physicochemical and nutritional characteristics. Journal of Food Process Engineering, 43(9), e13479.

Syamaladevi, R. M., Tang, J., Villa-Rojas, R., Sablani, S., Carter, B., Campbell, G. (2016). Influence of water activity on thermal resistance of microorganisms in low-moisture foods: a review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15(2), 353-370.

ประวัติผู้เขียน

นายศักดิ์สิทธิ์ สอนสมบูรณ์สุข เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤษภาคม พ.ศ. 2540 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบุญวัฒนา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563

ปี พ.ศ.2563 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี